

ISSN 2222-8594 (Print)
ISSN 2415-7694 (Online)

НАУКОВИЙ ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

283

Серія "Техніка та енергетика АПК"

Київ – 2018

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК" / редкол. : С. М. Ніколаєнко (відп. ред.) та ін. – 2018. – Вип. 283. – С. 328.

Висвітлено результати наукових досліджень, проведених працівниками ННІ енергетики, автоматики та енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України, навчальних закладів Міністерства освіти і науки України та науково-дослідних інститутів НААН.

Редакційна колегія: С. М. Ніколаєнко, д-р пед. наук, проф. (відповідальний редактор); І. І. Ібатуллін, д-р с.-г. наук, проф.; В. Д. Войтюк, д-р техн. наук, проф.; В. В. Козирський, д-р техн. наук, проф. (заступники відповідального редактора); В. І. Кирилук, канд. с.-г. наук, доц. (відповідальний секретар); І. Л. Роговський, канд. техн. наук, старший наук. співр., О. Ю. Синявський, канд. техн. наук, доц. (заступники відповідального секретаря); В. В. Адамчук, д-р техн. наук, проф.; Л. В. Аніскевич, д-р техн. наук, проф.; Є. Г. Афтандіянц, д-р техн. наук, проф.; Л. В. Баль-Прилипо, д-р техн. наук, проф.; А. І. Бойко, д-р техн. наук, проф.; В. В. Бойко, канд. фіз.-мат. наук, доц.; В. М. Булгаков, д-р техн. наук, проф.; Д. Г. Войтюк, канд. техн. наук, проф.; Ю. Б. Гнучій, д-р фіз.-мат. наук, проф.; Г. А. Голуб, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Горобець, д-р техн. наук, проф.; М. В. Гребченко, д-р техн. наук, проф.; О. І. Давиденко, д-р техн. наук, проф.; П. Євич, д-р техн. наук, проф.; А. В. Жильцов, д-р техн. наук, доц.; В. В. Каплун, д-р техн. наук, проф.; В. В. Коваль, д-р техн. наук, проф.; І. П. Кондратенко, д-р техн. наук, проф.; О. Б. Коршунов, канд. техн. наук, доц.; В. І. Кравчук, д-р техн. наук, проф.; Є. Красовські, д-р техн. наук, проф.; В. П. Лисенко, д-р техн. наук, проф.; В. С. Ловейкін, д-р техн. наук, проф.; К. Г. Лопатько, д-р техн. наук, доц.; С. Марек, д-р техн. наук, проф.; І. І. Назаренко, д-р техн. наук, проф.; В. М. Несвідомін, д-р техн. наук, проф.; Т. Павловські, д-р техн. наук, проф.; С. Ф. Пилипака, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Самосюк, д-р техн. наук, проф.; Х. Собчук, д-р техн. наук, проф.; О. Б. Таширев, д-р техн. наук, проф.; В. В. Теслюк, д-р с.-г. наук, проф.; С. Г. Фришев, д-р техн. наук, проф.; В. В. Харченко, д-р техн. наук, проф.; А. Хоховські, проф.; С. П. Циганков, д-р техн. наук, проф.; С. А. Шворов, д-р техн. наук, проф.; Ю. Яцкевич, проф.

Відповідальний за випуск О. Ю. Синявський

Рекомендовано до друку вченою радою НУБіП України, протокол № 7 від 28.02.2018 р.

Збірник наукових праць включено до бібліографічних баз даних наукових публікацій PИHЦ, Index Copernicus, USJ, SIS, бази даних Ulrich's Periodicals Directory та проіндексовано в Google Scholar, Repec, MIAR, BASE, Research Bib.

Згідно з наказом Міністерства освіти і науки України № 747 від 13 липня 2015 р., Науковий вісник НУБіП України. Серія "Техніка та енергетика АПК" включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть бути опубліковані результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук.

Адреса редколегії: 03041, Київ-41, вул. Героїв Оборони, 15,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України, тел. 527-82-41

© Національний університет біоресурсів
і природокористування України, 2017

ЗМІСТ

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПИТОМУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ. В. В. КОЗИРСЬКИЙ, В. В. САВЧЕНКО, О. Ю. СИНЯВСЬКИЙ	8
ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНИХ КАМЕР БПЛА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АЗОТНОГО ПІДЖИВЛЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР НА ПРИКЛАДІ ПШЕНИЦІ ТА КУКУРУДЗИ. В. П. ЛИСЕНКО, О. О. ОПРИШКО, Д. С. КОМАРЧУК, Н. А. ПАСІЧНИК, А. І. МАРЦИФЕЙ	16
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНЦЕНТРАТОРНИХ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ОПТИЧНИХ СЕРЕДОВИЩ. Ш. І. КЛИЧОВ, С. А. БАХРАМОВ, З. Ш. КЛИЧОВ, В. В. ХАРЧЕНКО (рос. мовою)	23
ВИКОРИСТАННЯ КОГНІТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ УПРАВЛІННІ БІОТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ. Н. А. ЗАЄЦЬ, В. М. ШТЕПА	29
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФЕТ МОДУЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ. В. В. ХАРЧЕНКО (рос. мовою)	39
КОМПЛЕКТ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ОБЛАДНАННЯ ДО СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА НА ФЕРМАХ. О. Б. КОРШУНОВ, Б. П. КОРШУНОВ, А. В. ІВАНОВ (рос. мовою)	53
ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗБИРАННЯ ВРОЖАЮ СУНИЦІ САДОВОЇ. Р. О. ФІЛІППОВ, Д. О. ХОРТ, В. А. ШЕВКУН (рос. мовою)	60
СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТА ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ КАБЕЛЬНИХ І ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 6-35 КВ. М. В. ГРЕБЧЕНКО, О. В. КОЖУХАР	67
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ОРЕБРЕННЯ В УМОВАХ ПРИРОДНОЇ КОНВЕКЦІЇ. В. Г. ГОРОБЕЦЬ	75
МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ВИРОЩУВАННЯ ОВОЧІВ У ТЕПЛИЦЯХ. А. О. ДУДНИК (англ. мовою)	81
ОПТИМАЛЬНЕ ЗА ШВИДКОДІЄЮ ФАЗОВЕ АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ СИНТЕЗАТОРА МІТОК ТОЧНОГО ЧАСУ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ SMART-ТЕХНОЛОГІЙ. В. В. КОВАЛЬ, Д. О. КАЛЬЯН, Ю. А. МАКСИМЕНКО, О. В. САМКОВ	89
ДО ПИТАННЯ ПРО СУШІННЯ ГАЗІВ НА ОСНОВІ КОРОТКОЦИКЛОВОЇ БЕЗНАГРІВНОЇ АДСОРБЦІЇ. Б. Х. ДРАГАНОВ, Ю. Ф. СНЄШКІН	98
ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ВЛАСТИВОСТІ ОРТОФОСФАТУ БІСМУТУ ЛЕГОВАНОГО ІОНАМИ ЄВРОПІУ ТА ПРАЗЕОДИМУ. В. В. БОЙКО, В. П. ЧОРНИЙ, С. Г. НЕДІЛЬКО, К. В. ТЕРЕБІЛЕНКО, М. С. СЛОБОДЯНИК	103
ЗАСОБИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПОЛИВУ В СПОРУДАХ ЗАХИЩЕНОГО ҐРУНТУ. Л. Є. НИКИФОРОВА, М. О. СПОДОБА	111
АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН У ТЕПЛИЦІ З УРАХУВАННЯМ ЇХ СТАНУ. В. П. ЛИСЕНКО, Т. І. ЛЕНДЄЛ	118

ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ ТА ПЕРЕРОБКИ РІЗНИХ ВИДІВ БІОМАСИ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ. С. А. ШВОРОВ, В. Є. ЛУКІН, Д. С. КОМАРЧУК, В. І. ТРОХАНЯК, В. В. УСТИМЧУК	125
СТРУКТУРА І ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ ЛІТІЙ- ГЕРМАНАТНОЇ СКЛОКЕРАМІКИ, $Li_2Ox_7GeO_2$ ЛЕГОВАНОЇ ІОНАМИ ХРОМУ. С. Г. НЕДІЛЬКО, В. В. БОЙКО, Я. П. РИБАК, М. П. ТРУБІЦИН, М. Д. ВОЛНЯНСЬКИЙ, М. М. КОПТЄВ	132
ЗНАХОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ РІВНЯНЬ ІЗОТРОПНИХ ЛІНІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІПЕРБОЛІЧНИХ ФУНКЦІЙ ТА УТВОРЕННЯ МІНІМАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ. С. Ф. ПИЛИПАКА, М. М. МУКВИЧ	141
НЕІЗОТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ ІЗ ДЕРЕВИНИ СОСНИ. Д. М. КОРИНЧУК, К. О. КОРИНЧУК (рос. мовою)	148
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА КІЛЬЦЕВИХ МАГНІТОПРОВОДАХ. М. В. БРАГІДА	161
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ СПОТВОРЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ ВИЩИМИ ГАРМОНІКАМИ. А. М. ГЛАДКИЙ	167
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СНАББЕРНОМУ ВУЗЛІ ЕЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ. І. М. ГОЛОДНИЙ, О. В. САНЧЕНКО	174
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ІМІТАЦІЙНІЙ МОДЕЛІ. В. О. МІРОШНИК, Ю. Л. ЦИЦЮРСЬКИЙ	181
ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ АЕРОІОННОЇ ОБРОБКИ. В. А. МУЗИЧЕНКО	188
ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ. О. В. ОКУШКО, П. М. КОВТУН ...	194
ДО ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ДИНАМІКИ ТИПОВИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ. В. О. ГРИЩЕНКО	199
ЕНЕРГЕТИЧНІ ВТРАТИ ПРИ КОМУТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ. В. В. КОРОБСЬКИЙ, А. С. СІРОШТАН	208
МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ВИПАДКОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ОДНОФАЗНОЇ МЕРЕЖІ. Ю. В. ШУРУБ, А. О. ДУДНИК, Д. С. ЛАВІНСЬКИЙ	217
ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НВЧ-УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ КУКУРУДЗИ. А. І. ЧМІЛЬ, К. О. ЛАЗАРЮК	224
НЕЛІНІЙНЕ КВАЗІОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СТРІЧКОВИМ КОНВЕЄРОМ КОМПЛЕКСУ ПІДЛОГОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА. І. М. ГОЛОДНИЙ, А. В. ТОРОПОВ, Л. В. ТОРОПОВА (рос. мовою).....	240
ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ Й КІЛЬКОСТІ КАТОДНИХ СТАНЦІЙ ТА ЇХ ЗАХИСНОЇ ЗОНИ. В. Є. ВАСИЛЕНКОВ, Д. В. ТОПАЛОВ	239
НАНОРОЗМІРНІ ВУГЛЕЦЕВІ МАТЕРІАЛИ ЯК АДСОРБЕРИ ШКІДЛИВИХ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ НЕОРГАНІЧНИХ ОКСИДНИХ СПОЛУК. В. В. БОЙКО, С. Г. НЕДІЛЬКО, В. І. БОРИСЮК, Ю. А. ХИЖНИЙ	247

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ СВІТЛОКУЛЬТУРИ РОСЛИН У СПОРУДАХ ЗАХИЩЕНОГО ҐРУНТУ. Я. М. ЛУЦАК	255
МІКРОКРИСТАЛІЧНА ЦЕЛЮЛОЗА І КОМПОЗИТИ НА ЇЇ ОСНОВІ: СТРУКТУРА ТА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ. В. В. БОЙКО, В. П. ЧОРНИЙ, В. А. БАРБАШ, О. В. ЯЩЕНКО, О. М. АЛЕКСЄЄВ, Ю. Є. ГРАБОВСЬКИЙ, С. Г. НЕДІЛЬКО, Є. О. РЕЗНИЧЕНКО, В. П. ЩЕРБАЦЬКИЙ, М. С. НЕДЄЛЬКО	266
ПІДВИЩЕННЯ ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ. І. П. РАДЬКО, В. А. НАЛИВАЙКО, О. В. ОКУШКО, А. В. МІЩЕНКО, Є. О. АНТИПОВ	275
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ КАТЕГОРІЙНО-ФУНКТОРНОГО АНАЛІЗУ. М. А. СИЧ ..	281
ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННОЇ СИСТЕМИ ПІДВЕДЕННЯ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА ДО РУХОМОГО ПОЛОТНА. О. В. ШЕЛІМАНОВА	289
ЗВОРОТНІ ХВИЛІ ЛЕМБА У ПЛАСТИНІ КРИСТАЛУ CDS. П. П. ІЛЬІН	295
КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ МІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ ЦЕЛЮЛОЗИ ТА ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ОКСИДІВ: ВЛАСТИВОСТІ Й НАПРЯМ ЗАСТОСУВАННЯ. В. В. БОЙКО, В. П. ЧОРНИЙ, В. А. БАРБАШ, О. В. ЯЩЕНКО, О. М. АЛЕКСЄЄВ, Ю. Є. ГРАБОВСЬКИЙ, С. Г. НЕДІЛЬКО, Є. О. РЕЗНИЧЕНКО, В. П. ЩЕРБАЦЬКИЙ, М. С. НЕДЄЛЬКО	301
ВПЛИВ АДСОРБЦІЙНОГО ШАРУ МЕТАЛЕВИХ ЧАСТИНОК НА РОЗСІЯННЯ СВІТЛА. С. В. СТЕЦЕНКО	310
ТОПОЛОГІЧНА ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ КУСКОВО-ЛІНІЙНИХ ФУНКЦІЙ. Т. Г. КРИВОРОТ	315
МІЖПРЕДМЕТНІ ЗВ'ЯЗКИ У ПРОЦЕСІ ВИКЛАДАННЯ ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ МАЙБУТНІМ ІНЖЕНЕРАМ. О. Ю. ДЮЖЕНКОВА	321

CONTENTS

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THE SPECIFIC CONDUCTIVITY OF AQUEOUS SOLUTIONS. V. KOZYRSKYI, V. SAVCHENKO, A. SINYAVSKY ..	8
USAGE OF UAV OPTICAL CAMERAS TO MONITOR THE STATE OF NITROGEN NUTRITION OF THE WHEAT AND CORN. V. LYSENKO, O. OPRYSHKO, D. KOMARCHUK, N. PASICHNIK, A. MARTSYFEI	16
IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF CONCENTRATORY SOLAR PHOTOELECTRIC INSTALLATIONS BY CREATION OF SPECIAL OPTICAL ENVIRONMENTS. SH. KLYCHEV, S. BAKHRAMOV, Z. KLYCHEV, V. KHARCHENKO	23
USE OF COGNITIVE SIMULATION AT THE MANAGEMENT OF BIOTECHNOLOGICAL OBJECTS OF FOOD PRODUCTION. N. ZAIETS, V. SHTEPA	29
STUDY OF THE FET MODULE WORK WITH USE ELEMENTS OF MATHEMATICAL MODELING. V. KHARCHENKO	39
SET ENERGY-SAVING EQUIPMENT TO THE SYSTEM COOLING MILK ON THE FARM. A. KORSHUNOV, B. KORSHUNOV, A. IVANOV	53

APPLICATION OF TECHNICAL MEANS FOR HARVESTING STRAWBERRIES. R. FILIPPOV, D. KHORT, V. SHEVKUN	60
SYSTEM FOR DIAGNOSTICS AND PROTECTION AGAINST EARTH FAULTS OF CABLE AND OVERHEAD LINES 6-35 KV. N. GREBCHENKO, A. KOZHUKHAR	67
COMPARATIVE ANALYSIS OF VERTICAL SURFACES WITH VARIOUS TYPES OF WATER IN CONDITIONS OF NATURAL CONVECTION. V. GOROBETS	75
METHOD OF DESIGNING A RESOURCE EFFECTIVE CONTROL SYSTEM FOR VEGETABLE GROWING MODES IN GREENHOUSES. A. DUDNYK	81
SPEED OPTIMAL PHASE-LOCKED LOOP FOR PRECISE TIME INSTANTS SYNTHESIZER FOR INTEGRATED POWER SUPPLY SMART GRID SYSTEMS. V. KOVAL, D. KALIAN, Yu. MAKSIMENKO, A. SAMKOV	89
TO THE QUESTION OF DRINKING GASES ON THE BASIS OF SHORT- CIRCULAR NON-ADDRESSING ADSORPTION. B. DRAGANOV, Yu. SNESHKIN	98
LUMINESCENCE PROPERTIES OF BISMUTH ORTHOPHOSPHATE DOPED WITH EUROPIUM AND PRASEODYMIUM IONS. V. BOYKO, V. CHORNII, S. NEDILKO, K. TEREBILENKO, M. SLOBODYANIK	103
INFORMATION SUPPORT AUTOMATION IRRIGATION IN THE GREENHOUSE. L. NIKIFOROVA, M. SPODOBA	111
ALGORITHM OF FORMATION OF CONTROL STRATEGIES ON THE PROCESS OF GROWTH OF PLANTS IN THE HEAT WITH THEIR CONSIDERATIONS. V. LYSENKO, T. LENDIEL	118
TECHNOLOGY OF PREPARATION AND PROCESSING OF DIFFERENT BIOMASS SPECIES IN BIOGAS INSTALLATIONS. S. SHVOROV, V. LUKIN, D. KOMARCHUK, V. TROKHANYAK, V. USTIMCHUK	125
STRUCTURE AND LUMINESCENCE OF THE $Li_2Ox_7GeO_2$ LITHIUM- GERMANATE GLASS-CERAMICS DOPED WITH CHROMIUM IONS. S. NEDILKO, V. BOYKO, Ya. RYBAK, M. TRUBITSYN, M. VOLNYANSKII, M. KOPTYEV	132
DEFINITION OF PARAMETRIC EQUATIONS OF ISOTROPIC LINES BY HYPERBOLIC FUNCTIONS AND CONSTRUCTION OF MINIMAL SURFACES. S. PYLYPAKA, M. MUKVICH	141
NON-ISOTHERMAL ANALYSIS OF PELLETS FROM PINE WOOD. D. KORINCHUK, K. KORINCHUK	148
MATHEMATICAL MODELLING OF THE WELDING TRANSFORMER WITH RING MAGNETS. M. BRAGIDA	161
DYNAMICS EXAMINATION OF THE PROCESS OF SPINNING OF SYNOZOIDAL STRESS BY HIGH HARMONY. A. GLADKYI	167
INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF THE ELECTRON KEY SNUBERN UNIT VOLTAGE REGULATOR. I. GOLODNYI, A. SANCHENKO	174
RESEARCH OF THE DC MOTOR ON THE IMITATION MODEL. V. MIROSHNYK, Yu. TSITSYURSKIY	181
ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY THE PROCESS OF AEROION TREATMENT. V. MUZYCHENKO	188

APPLICATION OF MODERN ELECTRICAL TECHNOLOGIES IF THE REPAIR AND REHABILITATION WORKS WILL BE CARRIED OUT. O. OKUSHKO, P. KOVTUN	194
TO QUESTION OF MATHEMATICAL DESCRIPTION OF DYNAMICS OF TYPICAL AGRICULTURAL OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS. V. HRYSHCHENKO	199
ENERGY LOSSES IN COMMUTATION ELECTRIC ARC. V. KOROBSKYY, A. SIROSHTAN	208
METHOD OF DESIGNING AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH RANDOM LOADING POWERED FROM A SINGLE-PHASE NETWORK. Yu. SHURUB, A. DUDNYK, D. LAVINSKIY	217
THE SUBSTANTIATION OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE MICROWAVE INSTALLATION FOR THE INTERMEDIATE PROCESSING OF CORN SEEDS. A. CHMIL, K. LAZARIUK	224
NON-LINEAR QUASI-OPTIMAL CONTROL OF THE BELT CONVEYOR OF THE GRAIN STORAGE COMPLEX. I. GOLODNYI, A. TOROPOV, L. TOROPOVA	230
DETERMINATION OF POWER AND QUANTITY OF CATHODE STATIONS AND THEIR PROTECTIVE ZONE . V. VASILENKOV, D. TOPALOV	240
NANOSIZE CARBONACEOUS MATERIALS AS ADSORBERS OF INORGANIC HARMFUL OXIDES TO THE ENVIRONMENT. V. BOYKO, S. NEDILKO, V. BORISYUK, Y. KHIZHNY	247
RESEARCH OF WAYS TO INCREASE THE LIGHT-CULTURE OF PLANTS IN THE FACILITY OF THE PROTECTED GROUND. Y. LUTSAK	255
MICROCRYSTALLINE CELLULOSE AND CELLULOSE-BASED COMPOSITES: STRUCTURE AND POSSIBILITIES OF APPLICATION. V. BOYKO, V. CHORNII, V. BARBASH, O. YASHCHENKO, A. ALEKSEEV, Yu. HRABOVSKIY, S. NEDILKO, E. REZNICHENKO, V. SHCHERBATSKYI, M. NEDIELKO	266
ENHANCEMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS IN HIGHER EDUCATIONAL STAFF. I. RADKO, V. NALIVAYKO, O. OKUSHKO, A. MISHCHENKO, I. ANTIPOV	275
RESEARCH OF THE TECHNOLOGICAL COMPLEX OF THE SUGAR REFINERY WITH THE USE OF THE CATEGORICAL-FUNCTORIAL ANALYSIS. M. SYCH ..	281
THE REASONING OF THE CHOICE OF THE JET SYSTEM'S PARAMETERS FOR THE DRY AGENT'S SUPPLYING TO THE MOVING CLOTH OF MATERIAL. O. SHELIMANOVA	289
BACKWARD LAMB WAVES IN CDS CRYSTAL PLATE. P. P. IL'IN	295
COMPOSITES BASED ON MICROCRYSTALLINE CELLULOSE AND LUMINESCENT OXIDES: PROPERTIES AND A WAY OF APPLICATION. V. BOYKO, V. CHORNII, V. BARBASH, O. YASHCHENKO, A. ALEKSEEV, YU. HRABOVSKIY, S. NEDILKO, E. REZNICHENKO, V. SHCHERBATSKYI, M. NEDIELKO	301
INFLUENCE OF THE ADSORPTIVE LAYER OF METAL PARTICLES ON LIGHT SCATTERING. S. STETSENKO	310
TOPOLOGICAL EQUIVALENCE PIECEWISE-LINEAR FUNCTIONS. T. KRIVOROT ..	315
INTERSUBJECT COMMUNICATIONS IN THE MATHEMATICS TEACHING TO THE FUTURE ENGINEERS. O. DYUZHENKOVA	322

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПИТОМУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

В. В. КОЗИРСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор

В. В. САВЧЕНКО, кандидат технічних наук, доцент

О. Ю. СИНЯВСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

**Національний університет біоресурсів і природокористування
України**

E-mail: vit1986@ua.fm

Анотація. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень впливу магнітного поля на зміну питомої електропровідності водних розчинів. На основі отриманого аналітичного виразу для питомої електропровідності багатокомпонентного розчину електроліту встановлено, що вона залежить від ступеня електролітичної дисоціації, заряду, рухливості та концентрації іонів. Під дією магнітного поля змінюється розчинність солей, що зумовлює зміну коефіцієнта електролітичної дисоціації та питомої електропровідності розчину. Зміна питомої електропровідності залежить від квадрата магнітної індукції та швидкості руху розчину. Найбільше питома електропровідність розчину збільшується за магнітної індукції 0,065 Тл та швидкості руху розчину 0,4 м/с.

Ключові слова: водний розчин, питома електропровідність, ступінь електролітичної дисоціації, розчинність, магнітна індукція, швидкість руху розчину

Актуальність. Обробка поливної води та розчинів мінеральних добрив у магнітному полі уможливорює збільшення врожайності сільськогосподарських культур, зменшення захворюваності рослин, підвищення якості продукції та покращення використання мінеральних добрив [1].

Але нині не повною мірою розкрито механізми й закономірності дії магнітного поля на розчини [1].

Відсутність пояснення дії магнітного поля на процеси, які відбуваються у водному розчині, не дає можливості встановити всі діючі фактори під час його обробки у магнітному полі та визначити їх оптимальні значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині теорія магнітної обробки водних систем знаходиться на стадії висунення і обґрунтування гіпотез, хоча експериментально встановлено, що магнітна обробка води змінює її фізико-хімічні властивості: прискорюються коагуляція і абсорбція, змінюються розчинність солей і концентрація газів, кристалізація і змочування, магнітна сприйнятливність, в'язкість, гідратація іонів, кінетика хімічних реакцій [1, 2].

Поливна вода, живильні та клітинні розчини є багатокомпонентними розчинами електrolітів. Тому теоретичний і практичний інтерес становить дослідження зміни питомої електропровідності таких розчинів під дією магнітного поля.

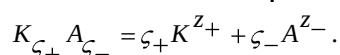
Мета дослідження – встановлення впливу магнітного поля на питому електропровідність водних розчинів.

Матеріали і методи дослідження. Експериментальні дослідження зміни питомої електропровідності за обробки водного розчину в магнітному полі проводили з розчином такого складу: амоній азотнокислий – 11,36 г/л; натрій азотнокислий – 0,12 г/л; калій сірчаноокислий – 1,56 г/л; кальцій фосфорнокислий двозаміщений – 6,6 г/л; магній сірчаноокислий семиводний – 1,05 г/л. За складом і концентрацією мінеральних елементів цей розчин подібний до клітинного розчину рослин.

Розчин пропускали через магнітне поле, яке створювалося постійними магнітами з інтерметалічного композиту NdFeB. Магнітну індукцію регулювали зміною відстані між магнітами і вимірювали тесламетром 43205/1. Швидкість розчину становила 0,4 м/с, а температура – 20 °С.

Питому електропровідність визначали до магнітної обробки розчину і після неї лабораторним кондуктометром КЛБ-1М.

Результати досліджень та їх обговорення. Іони утворюються за дисоціації солей та кислот унаслідок хімічної реакції:



Таким чином, за дисоціації з однієї молекули утворюється $\zeta+$ катіонів із валентністю $z+$ та $\zeta-$ аніонів із валентністю $z-$. Позначимо через β добуток цих величин:

$$\beta = \zeta+ z+ = \zeta- z-. \quad (1)$$

Кількість катіонів і аніонів, відповідно, буде

$$n_{i+} = \zeta i+ n_i; \quad (2)$$

$$n_{i-} = \zeta i- n_i. \quad (3)$$

Частка молекул, яка розпалася на іони, визначається ступенем електролітичної дисоціації [3, 4]:

$$\alpha = \frac{n}{N} = \frac{n}{N_a C}, \quad (4)$$

де n – кількість молекул, яка розпалася на іони;

N – загальне число молекул;

N_a – число Авогадро, молекул/моль;

C – молярна концентрація речовини, моль/л.

В електролітах електричний струм створюється іонами. Припустимо, що між двома електродами, розташованими на відстані l , знаходиться розчин електроліту з площею перерізу Ω . До електродів прикладене зовнішнє електричне поле з напруженістю E . Під дією цього поля іони починають упорядкований рух, створюючи при цьому електричний струм I . Якщо розчин складається з k електролітів, то сила струму

$$I = \sum_i^k (I_{i+} + I_{i-}) \quad (5)$$

де I_{i+} і I_{i-} – складові загального струму, які створюються катіонами і аніонами.

Сила струму буде дорівнювати сумарному заряду позитивно і негативно заряджених іонів, які перетинають площу перерізу Ω за одиницю часу, тобто іонів, які знаходяться в об'ємі $v_i \Omega$. Тому складові сили струму від іонів i -го виду будуть дорівнювати

$$I_{i+} = n_{i+} \Omega v_{i+} z_{i+} e, \quad (6)$$

$$I_{i-} = n_{i-} \Omega v_{i-} z_{i-} e, \quad (7)$$

де e – елементарний заряд, Кл.

Іон починає рухатися зі швидкістю v_i під дією сили зовнішнього електричного поля:

$$F_{e_i} = z_i e E = z_i e \frac{U}{l}, \quad (8)$$

де U – напруга, прикладена до електродів, В;

l – відстань між електродами, м.

Оскільки рух відбувається в середовищі з кінцевою в'язкістю, буде виникати сила тертя

$$F_{m_i} = k_{m_i} v_i; \quad (9)$$

де k_m – коефіцієнт тертя, Н·с/м.

У розчині також існують сили взаємодії F_e між іонами електроліту один з одним, а також між іонами електроліту і молекулами розчинника. Як і сила тертя, ця сила пропорційна швидкості іонів. Введемо поправку на сили взаємодії за допомогою коефіцієнта електропровідності [5]:

$$f_i = \frac{F_m}{F_m + F_e}. \quad (10)$$

Під дією цих сил іон буде рухатися з певним прискоренням. За другим законом Ньютона:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = F_{e_i} - F_{m_i} - F_{\epsilon_i}, \quad (11)$$

де m_i – маса іона, кг.

Підставивши (8), (9) у рівняння (11), отримаємо:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = z_i e \frac{U}{l} - \frac{1}{f_i} k_{m_i} v_i, \quad (12)$$

або

$$m_i \frac{dv_i}{dt} + \frac{1}{f_i} k_{m_i} v_i = z_i e \frac{U}{l}. \quad (13)$$

Розв'язавши (13), знаходимо рівняння руху іона:

$$v_i = \frac{f_i z_i e U}{k_{m_i} l} \left(1 - e^{-\frac{k_{m_i}}{f_i m_i} t} \right). \quad (14)$$

Оскільки коефіцієнти тертя і взаємодії іонів значно перевищують

масу іона, то величиною $e^{-\frac{k_{m_i}}{f_i m_i} t}$ можна знехтувати [4] і вважати, що іон рухається з рівномірною швидкістю

$$v_i = \frac{f_i z_i e U}{k_{m_i} l} = v_i^0 f_i \frac{U}{l}, \quad (15)$$

де v_i^0 – абсолютна швидкість іона.

Підставивши вираз для швидкості руху іона (15) у рівняння (6) і (7), отримаємо вирази для складових сили струму:

$$I = n_{i+} \Omega v_{i+}^0 f_{i+} z_{i+} e \frac{U}{l} \quad (16)$$

$$I = n_{i-} \Omega v_{i-}^0 f_{i-} z_{i-} e \frac{U}{l}. \quad (17)$$

Тоді

$$I = \sum_{i=1}^k (n_{i+} \Omega v_{i+}^0 f_{i+} z_{i+} e \frac{U}{l} + n_{i-} \Omega v_{i-}^0 f_{i-} z_{i-} e \frac{U}{l}). \quad (18)$$

Оскільки число Фарадея визначається виразом

$$F = eN_a, \quad (19)$$

то формулу (18) можна записати у вигляді

$$I = \frac{\Omega F U}{N_a l} \sum_{i=1}^k (n_{i+} v_{i+}^0 f_{i+} z_{i+} + n_{i-} v_{i-}^0 f_{i-} z_{i-}). \quad (20)$$

З урахуванням (1) – (4) отримаємо:

$$I = \frac{\Omega F U}{l} \sum_{i=1}^k f_i \alpha_i \beta_i C_i (v_{i+}^0 + v_{i-}^0), \quad (21)$$

або

$$I = \frac{\Omega U}{l} \sum_{i=1}^k f_i \alpha_i \beta_i C_i (\lambda_{i+}^0 + \lambda_{i-}^0) = \frac{\Omega U}{l} \sum_{i=1}^k f_i \alpha_i \beta_i \lambda_i^0 C_i, \quad (22)$$

де λ_i^0 – рухливість іона, $\text{См} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$.

За законом Ома

$$I = \sigma U, \quad (23)$$

де σ – провідність розчину.

Тоді

$$\sigma = \frac{\Omega}{l} \sum_{i=1}^k f_i \alpha_i \beta_i \lambda_i^0 C_i. \quad (24)$$

Оскільки

$$\sigma = \kappa \frac{\Omega}{l}, \quad (25)$$

де κ – питома електропровідність, $\text{См}/\text{м}$, то

$$\kappa = \sum_{i=1}^k f_i \alpha_i \beta_i \lambda_i^0 C_i. \quad (26)$$

Ступінь електролітичної дисоціації та коефіцієнт взаємодії залежать від концентрації електроліту. Тому залежність (26) для широкого діапазону зміни концентрації має складний характер.

Під дією магнітного поля зростає ступінь електролітичної дисоціації [6]:

$$\alpha_M = \alpha e^{\frac{\mu(K_i^2 B^2 + 2K_i B \nu)}{2RT}}, \quad (27)$$

де α_M і α – ступінь електролітичної дисоціації після й до магнітної обробки розчину;

μ – зведена маса іонів, кг;

B – магнітна індукція, Тл;

K – коефіцієнт, який залежить від концентрації та виду іонів, а також кількості перемагнічувань, $\text{м}/(\text{с} \cdot \text{Тл})$;

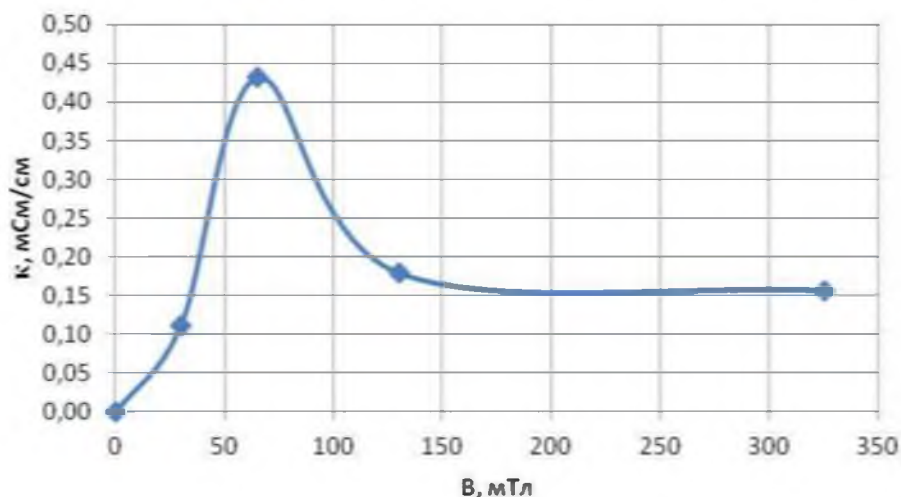
R – універсальна газова стала, $\text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$;

T – температура, К.

Унаслідок зміни коефіцієнта електролітичної дисоціації, під дією магнітного поля змінюється питома електропровідність розчину:

$$\gamma = \sum_{i=1}^k f_i \alpha_i \beta_i \lambda_i^0 C_i e^{\frac{\mu(K_i^2 B^2 + 2K_i Bv)}{2RT}} \quad (28)$$

За зміни магнітної індукції від 0 до 0,065 Тл питома електропровідність водних розчинів збільшується, а за подальшого збільшення магнітної індукції починає зменшуватися (див. рисунок).



Залежність зміни питомої електропровідності розчину солей від магнітної індукції за швидкості руху розчину 0,4 м/с

Оскільки за обробки водного розчину в магнітному полі збільшується його питома електропровідність, покращується розчинність солей.

Висновки і перспективи. Під дією магнітного поля змінюється питома електропровідність розчину внаслідок зміни коефіцієнта електролітичної дисоціації. Зміна питомої електропровідності розчину за магнітної обробки залежить від квадрата магнітної індукції і швидкості руху розчину в магнітному полі. Найбільше питома електропровідність розчину збільшується за магнітної індукції 0,065 Тл та швидкості руху розчину 0,4 м/с. Магнітна обробка водних розчинів покращує розчинність речовин, які знаходяться в ньому.

Список літератури

1. Классен В. И. Омагничивание водных систем / В. И. Классен. – [2-е изд.]. – М. : Химия, 1982. – 296 с.
2. Крупнова Т. Г. Действие внешних силовых полей на неорганические дисперсные системы / Т. Г. Крупнова, О. В. Ракова // Исследования в области естественных наук. – 2014. – № 2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://science.snauka.ru/2014/02/6613>

3. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство / [Б. П. Никольский, Н. А. Смирнова, М. Ю. Панов и др.] ; под ред. акад. Б. П. Никольского. – Л. : Химия, 1987. – 880 с.
4. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия / Л. И. Антропов. – М. : Высшая школа, 1984. – 519 с.
5. Синявський О. Ю. Автоматичне керування мінеральним живленням рослин у гідропонних теплицях / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко. – К. : Компрінт, 2016. – 249 с.
6. Савченко В. В. Вплив магнітного поля на розчинність солей / В. В. Савченко // Науковий вісник НУБіП України. – 2014. – Вип. 194, ч. 2. – С. 68–72.

References

1. Klassen, V. I. (1982). Omagnichivaniye vodnykh system [Magnetization of water systems]. Moscow: Khimiya, 296.
2. Krupnova, T. G., Rakova, O. V. (2014). Deystviye vneshnikh silovykh poley na neorganicheskiye dispersnyye sistemy [The effect of external force fields on inorganic disperse systems] Issledovaniya v oblasti estestvennykh nauk, 2. Available at: <http://science.snauka.ru/2014/02/6613>.
3. Nikol'skiy, B. P., Smirnova, N. A., Panov M .Yu. (1987). Fizicheskaya khimiya. Teoreticheskoye i prakticheskoye rukovodstvo [Physical chemistry. Theoretical and practical guidance]. Leningrad: Khimiya, 880.
4. Antropov, L. I. (1984). Teoreticheskaya elektrokhiimiya [Theoretical Electrochemistry]. Moscow: Vysshaya shkola, 519.
5. Synyavsky, A. Y., Savchenko, V. V. (2016). Avtomatychne keruvannia mineralnym zhyvlenням росlyn u hidropennykh teplytsiakh [Automatic control of mineral nutrition of plants in hydroponic greenhouses]. Kyiv: TsP «Komprynt», 249.
6. Savchenko, V. V. (2014). Vplyv mahnitnoho polia na rozchynnist solei [Influence of a magnetic field on solubility of salts]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 194 (2), 68–72.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УДЕЛЬНУЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

**В. В. Козырский,
В. В. Савченко,
А. Ю. Синявский**

Аннотация. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния магнитного поля на изменение удельной электропроводности водных растворов. На основе полученного аналитического выражения для удельной электропроводности многокомпонентного раствора электролита установлено, что она зависит от степени электролитической диссоциации, заряда, подвижности и концентрации ионов. Под действием магнитного поля изменяется растворимость солей, что обуславливает изменение коэффициента электролитической диссоциации и удельной электропроводности раствора. Изменение удельной электропроводности зависит от квадрата магнитной

индукции и скорости движения раствора. Более всего удельная электропроводность раствора увеличивается при магнитной индукции 0,065 Тл и скорости движения раствора 0,4 м/с.

Ключевые слова: водный раствор, удельная электропроводность, степень электролитической диссоциации, растворимость, магнитная индукция, скорость движения раствора

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THE SPECIFIC CONDUCTIVITY OF AQUEOUS SOLUTIONS

V. Kozyrskyi,
V. Savchenko,
A. Sinyavsky

Abstract. The results of theoretical and experimental studies of the effect of a magnetic field on the change in the specific electrical conductivity of aqueous solutions are given. On the basis of the obtained analytical expression for the specific conductivity of a multicomponent soluble electrolyte, it is established that it depends on the degree of electrolytic dissociation, charge, mobility, and ion concentration. Under the action of a magnetic field, the solubility of salts changes, which causes the change in the electrolytic dissociation coefficient and the specific electrical conductivity of the solution. The change in the electrical conductivity depends on the square of the magnetic induction and the speed of the solution. Most of all, the specific electrical conductivity of the solution increases with a magnetic induction of 0.065 T and a velocity of 0.4 m/s.

Keywords: aqueous solution, specific electrical conductivity, degree of electrolytic dissociation, solubility, magnetic induction, velocity of the solution

ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНИХ КАМЕР БПЛА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АЗОТНОГО ПІДЖИВЛЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР НА ПРИКЛАДІ ПШЕНИЦІ ТА КУКУРУДЗИ

В. П. ЛИСЕНКО, доктор технічних наук, професор
О. О. ОПРИШКО, кандидат технічних наук, доцент
Д. С. КОМАРЧУК, кандидат технічних наук
Н. А. ПАСІЧНИК, кандидат сільськогосподарських наук
А. І. МАРЦИФЕЙ, аспірант*

**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: dmitruyk@gmail.com

Анотація. Розглянуто питання застосування для моніторингу стану азотного підживлення камери GoPro Hero 4 зі штатним (оптичним) та інфрачервоним об'єктивом. Мета дослідження – оцінка спектральних характеристик камери з інфрачервоним фільтром і можливість її використання для моніторингу стану азотного підживлення кукурудзи. Проведено інструментальне оцінювання спектральних каналів оптичної камери GoPro Hero 4. Визначено, що при використанні ІК об'єктива відбувалася фіксація випромінювання по двох каналах 640–690 нм, тобто, фактично, частина «червоної» ділянки оптичного спектра і канал 820–880 нм інфрачервоного діапазону.

Показано можливість створення стресових індексів для кукурудзи при використанні інфрачервоного об'єктива та досвід порівняльного калібрування цифрової камери з еталонною камерою. При інструментальному оцінюванні спектральних каналів камери GoPro Hero 4 з інфрачервоним об'єктивом встановлено фіксацію для будь-якого з каналів «червоної» складової спектра, при цьому відношення ІК і оптичних складових індивідуальне для кожного каналу. Під час моніторингу стану азотного харчування кукурудзи визначено, що інфрачервоний діапазон є кращим. Запропоновано спектральний індекс при використанні ІК фільтра для штатної фотокамери БПЛА.

Ключові слова: БПЛА, індекси, азотне живлення, кукурудза, NDVI, UAV

Актуальність. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для моніторингу стану рослинності надає принципово нові можливості в технологіях точного землеробства. Стандартні рішення на базі супутникових платформ розроблювалися для вирішення питань, пов'язаних із оцінкою врожаю і погано пристосовані, у разі оперативного застосування, для визначення оптимальних дозувань добрив при

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. П. Лисенко
© В. П. Лисенко, О. О. Опришко, Д. С. Комарчук, Н. А. Пасічник, А. І. Марцифей, 2018

підживленні рослин. Завдяки низькій ціні знімків високої роздільної здатності, незалежно від наявності хмар та оперативності отримання результатів, БПЛА в складі комплексу технологій точного землеробства надають аграріям принципово нові можливості щодо програмування врожаю.

На сьогодні серійно випускають спеціалізовані сенсори для спектрального моніторингу для БПЛА, такі як Slantrange, AgroCam PRO NIR та ін. З урахуванням того, що підгодівля рослин здійснюється кілька разів і лише в певні фази вегетації, поширення таких вузькоспеціалізованих систем обмежене їх високою вартістю. Економічно для господарств було б краще мати універсальне обладнання, але штатні камери, що працюють в оптичному діапазоні й застосовуються для таких культур, як пшениця [1], для кукурудзи можуть бути неефективними [2]. Робота оптичної камери в інфрачервоному діапазоні можлива, якщо конструктивно замість звичайного використовувати інфрачервоний об'єктив. У цьому випадку користувач отримає три канали, які відповідають червоному зеленому та синьому каналам.

Мета дослідження – оцінка спектральних характеристик камери з інфрачервоним фільтром і можливість її використання для моніторингу стану азотного харчування кукурудзи.

Матеріали і методи дослідження. Для досліджень було обрано екшн- камеру GoPro Hero 4, яку було укомплектовано стандартним та інфрачервоним об'єктивами. Завдяки малій вазі, камера адаптована для використання з БПЛА. На першому етапі розглянуто відтворюваність отриманих результатів при використанні тестової та еталонної цифрових фотокамер. Як еталон було обрано систему Slantrange 3p. Дана система має апаратне рішення радіочастотної корекції за допомогою зенітного датчика і здатна сама оброблювати дані моніторингу безпосередньо під час польоту, що принципово пришвидшує процес зондування посівів. Завдяки цим перевагам, дане обладнання затребуване для великих підприємств, оскільки дає змогу обстежити до 400 гектарів за годину.

Порівняльний аналіз проводили на різних біологічних об'єктах з колекції ботанічного саду Національного університету біоресурсів і природокористування України (Київ). Виміри проводили як у приміщенні теплиці, так і на відкритому повітрі 6.09.2017 року за похмурої погоди. Штучне освітлення в теплиці не використовували. Відстань між об'єктом і датчиком становила 1,2–1,5 метра. При використанні комплексу Slantrange 3p для аналізу брали чорнові дані у форматі tiff, де кожен шар відповідав певному спектральному каналу, радіочастотну корекцію за даними від зенітного датчика не проводили. Отримані результати подано в табл. 1.

Результати досліджень та їх обговорення. Виходячи з наведених даних для вимірів інтенсивності складових кольору різними камерами встановлено, що точність неприйнятно низька. Так, різниця по червоному каналу становила 57 одиниць, що дорівнює майже 20% від загальної шкали. Розглядаючи ІЧ діапазон встановлено, що найбільш близьким за

значеннями до результатів вимірювань ІК каналу Slantrange виявився 2 канал (зелений), однак результати коливалися в значних діапазонах до 26 одиниць. Тобто, підхід до порівняльного дослідження різних камер для виведення коригувальних залежностей не виявив прийнятних результатів.

Інструментальна оцінка спектральних каналів датчика екшн-камери. Для оцінки спектральних каналів цифрових фотоапаратів використовують European Machine Vision Association (EMVA) -1288 [3], який як тестові джерела випромінювання використовує спеціальні джерела випромінювання. Як такі може бути використано набір джерел світла з фіксованим і доволі вузьким спектром випромінювання (лазери, світлодіоди, газорозрядні лампи) або налаштоване в широкому діапазоні джерело, наприклад, лампи розжарювання або газорозрядна в комплекті з монохроматором тощо. Безпосередньо в дослідженнях як джерело безперервного по спектру світла використовували лампу розжарювання типу КГМ.

Результати порівняльного дослідження інтенсивності складових кольору по спектральних каналах для рослинних об'єктів

		R	G	B	NIR	GP – SI			GP nir – SI nir		
						R	G	B	R	G	B
	GP	118	129	115		33	40	40			
	GP nir	178	57	147					113	-8	82
	SI	85	89	75	65						
	GP	141	134	104		61	55	36			
	GP nir	194	78	168					134	18	108
	SI	80	79	68	60						
	GP	104	145	43		4	42	-14			
	GP nir	199	80	176					125	6	102
	SI	100	103	57	74						
	GP	105	128	114		32	16	54			
	GP nir	193	69	165					132	8	104
	SI	73	112	60	61						

Для отримання зображення предмета у світлі певної довжини хвилі використовували модифікований подвійний монохроматор ДФС-12, який в умовах даного експерименту дав змогу виділити світло довжини хвилі λ з точністю $\Delta\lambda < 0.8$ нм. Зображення предмета проектувалося на вихідну щілину монохроматора, де розташовувалася камера. Розмір вихідної і вхідної щілини було вибрано так, щоб отримати яскраве зображення без «засвічування» камери. Детально лабораторна установка описана в роботі Yu. A. Hizhnyi в [4]. Отримані результати показано на рис.1.

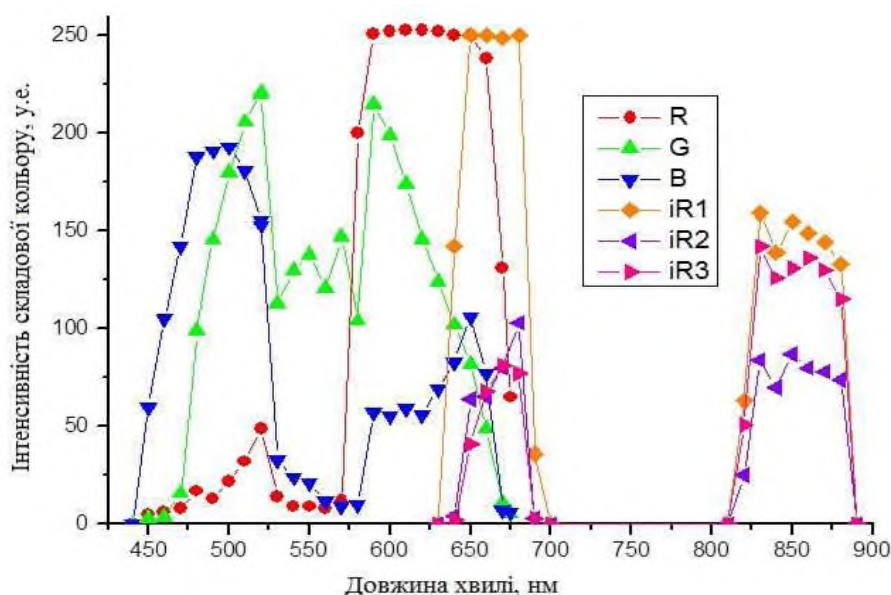


Рис. 1. Інтенсивність спектральних каналів фотокамери GoPro Hero 4 залежно від довжини хвилі для оптичного (R, G, B) та інфрачервоного об'єктивів (iR1, iR2, iR3)

Виходячи з отриманих результатів визначення спектральних каналів фотокамери зі звичайним та інфрачервоним об'єктивами інструментальним шляхом, можна зробити такі висновки:

1. При використанні ІЧ об'єктива МР відбувалася фіксація випромінювання по двох каналах 640–690 нм, тобто фактично частина «червоної» ділянки оптичного спектра і канал 820–880 нм інфрачервоного діапазону. При цьому три наявні канали мають свою специфіку, а саме:

- iR1, який відповідає червоному каналу в форматі jрег, має максимальне граничне значення в оптичному діапазоні й максимум (130–160 одиниць) в ІЧ спектрі;
- iR2, який відповідає зеленому каналу в форматі jрег, має приблизно однакові значення інтенсивності як в оптичному, так і ІЧ діапазонах;
- iR3, який відповідає синьому каналу в форматі jрег, має максимальні значення в ІЧ спектрі і найнижчі з усіх ІЧ каналів у «червоному» діапазоні.

2. Виходячи з цього, є можливість розгляду як окремих інформативних каналів відповідних складових адитивної моделі кольороутворення при використанні для моніторингу рослинності цифрових камер з ІЧ об'єктивом.

Дослідження можливості моніторингу кукурудзи з використанням цифрового фотоапарата з інфрачервоного об'єктива проводили в умовах польового стаціонару кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва НУБіП України, де проводили моніторинг кукурудзи (гібрид ...) на стан азотного стресу. При постановці досліду було використано такі варіанти внесення добрив: 1) без добрив (контроль); 2) Р80; 3) Р80К80; 4) N60Р80К80; 5) N90Р120К120 (рис. 2).



Рис. 2. Польовий стаціонар, посіви кукурудзи зйомка при штатному (оптичному) та інфрачервоних об'єктивах для камери GoPro Hero 4 (07.06.2017)

Рослини перебували у фазі вегетації 7–8 листків. Визначення вмісту азоту в сухій речовині здійснювали в лабораторних умовах фотометричним методом з реактивом Несслера. Отримані дані за спектрами подано на рис. 3.

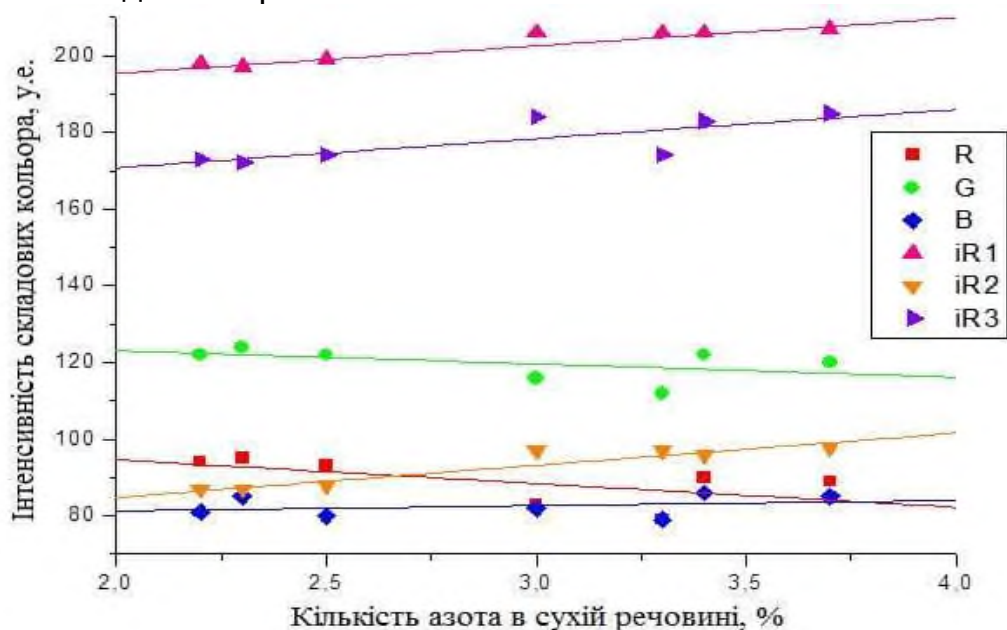


Рис. 3. Залежність інтенсивності складових кольору від кількості азоту в листках кукурудзи

Виходячи з отриманих даних, залежність найбільш виражена в інфрачервоній області для першого і другого каналів (iR1 і iR2). За аналогією з найбільш поширеним індексом NDVI, автори пропонують індекс, побудований за тими самими принципами, але з використанням тільки інфрачервоних «каналів» iRb

$$iRb = (iR1 - iR2)/(iR1 + iR2).$$

При апроксимації у вигляді лінійної залежності індексу iRb від кількості азоту коефіцієнт детермінації становив 0,86.

Висновки і перспективи. 1. Досвід порівняльного калібрування цифрової камери з еталонною камерою виявився невдалим.

2. При інструментальному оцінюванні спектральних каналів камери GoPro Hero 4 з інфрачервоним об'єктивом встановлено фіксацію для будь-якого з каналів «червоної» складової спектра, при цьому відношення ІК і оптичних складових індивідуальне для кожного каналу.

3. Під час моніторингу стану азотного харчування кукурудзи визначено, що інфрачервоний діапазон є кращим.

4. Запропоновано спектральний індекс при використанні ІК фільтра для штатної фотокамери БПЛА.

Список літератури

1. Lysenko V. Usage of flying robots for monitoring nitrogen in wheat crops / Vitalii Lysenko, Oleksiy Opryshko, Dmytro Komarchuk, Nadiia Pasichnyk, Nataliia Zaets, Alla Dudnyk (2017) // The 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications September 21–23, Bucharest, Romania, Vol.1. P. 30–34.

2. Lysenko V. Remote sensing on-line crop monitoring for yield programming / Lysenko Vitaliy, Opryshko Oleksiy, Komarchuk Dmyriy, Pasichnyk Natalya, Opryshko Nadiya (2016). – MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol. 18. No 3. P. 53–59.

3. EMVA Standard 1288 Release 3.0 November 29, (2010). European Machine Vision Association [<http://www.emva.org>].

4. Hizhnyi Yu A. Electronic structures and origin of intrinsic luminescence in Bi-containing oxide crystals / Yu. A. Hizhnyi, S. G. Nedilko, V. P. Chornii, M. S. Slobodyanik, I. V. Zatovsky, K. V. Terebilenko (2014). Electronic structures and origin of intrinsic luminescence in Bi-containing oxide crystals BiPO₄, K₃Bi₅(PO₄)₆, K₂Bi(PO₄)(MoO₄), K₂Bi(PO₄)(WO₄) and K₅Bi(MoO₄)₄ // Journal of Alloys and Compounds. Vol. 614. P. 420–435.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КАМЕР БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АЗОТНОЙ ПОДКОРМКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ПРИМЕРЕ ПШЕНИЦЫ И КУКУРУЗЫ

**В. Ф. Лысенко,
А. А. Опрышко,
Д. С. Комарчук,
Н. А. Пасечник,
А. И. Марцифey**

Аннотация. Рассмотрены вопросы применения для мониторинга состояния азотной подкормки камеры GoPro Hero 4 со штатным (оптическим) и инфракрасным объективом. Цель исследования – оценка спектральных характеристик камеры с инфракрасным фильтром и возможность ее использования для мониторинга состояния азотной подкормки кукурузы. Проведена инструментальная

оценка спектральных каналов оптической камеры GoPro Hero 4. Определено, что при использовании ИК объектива происходила фиксация излучения по двум каналам 640–690 нм, то есть, фактически, части «красного» участка оптического спектра и канала 820–880 нм инфракрасного диапазона.

Показана возможность создания стрессовых индексов для кукурузы при использовании инфракрасного объектива и опыт сравнительной калибровки цифровой камеры с эталонной камерой. При инструментальной оценке спектральных каналов камеры GoPro Hero 4 с инфракрасным объективом установлена фиксация для любого из каналов «красной» составляющей спектра, при этом отношение ИК и оптических составляющих индивидуально для каждого канала. Определено, что инфракрасный диапазон является лучшим при мониторинге состояния азотного питания кукурузы. Предложен спектральный индекс при использовании ИК фильтра для штатной камеры БПЛА.

Ключевые слова: БПЛА, индексы, азотное питание, кукуруза, NDVI, UAV

USAGE OF UAV OPTICAL CAMERAS TO MONITOR THE STATE OF NITROGEN NUTRITION OF THE WHEAT AND CORN

V. Lysenko,
O. Opryshko,
D. Komarchuk,
N. Pasichnik,
A. Martsyfei

Abstract. The application issues for monitoring the nitrogen state of the GoPro Hero 4 camera with a standard (optical) and infrared lens are considered. The aim of the work was to evaluate the spectral characteristics of the camera with an infrared filter and the possibility of using it to monitor the state of nitrogen nutrition of maize. An instrumental evaluation of the spectral channels of the GoPro Hero 4 optical camera was made. It was determined that when the IR lens was used, radiation was fixed on two channels of 640–690 nm, that is, in fact a part of the "red" part of the optical spectrum and a channel of 820–880 nm of the infrared range.

The possibility of creating stress indices for corn is shown when using an infrared lens. The experience of comparative calibration of a digital camera with a reference camera is shown. With the instrumental evaluation of the spectral channels of the GoPro Hero 4 camera with an infrared lens, a fixation for any of the channels of the "red" component of the spectrum is established, with the ratio of IR and optical components individually for each channel. It is determined that the infrared range is more preferable when monitoring the state of nitrogen nutrition of maize. A spectral index is proposed for the use of an IR filter for a standard UAV camera.

Keywords: UAV, indices, nitrogen nutrition, corn, NDVI

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНЦЕНТРАТОРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПУТЕМ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕД

Ш. И. КЛЫЧЕВ, доктор технических наук, профессор
С. А. БАХРАМОВ, доктор технических наук, профессор

З. Ш. КЛЫЧЕВ, инженер

Академия Наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

В. В. ХАРЧЕНКО, доктор технических наук, профессор
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Россия

Аннотация. Целью исследования был анализ возможностей увеличения плотности оптического излучения для повышения эффективности концентраторных солнечных фотоэлектрических установок.

Расчетно и экспериментально исследована возможность увеличения эффективности концентраторных фотоэлектрических установок при использовании оптических сред.

Показано, что за счет использования оптических сред возможно уменьшение площади фотоэлемента в 1,5–1,7 раза при одной и той же мощности солнечной установки. Использование указанного подхода представляется эффективным средством повышения эффективности солнечных концентраторных систем фотоэлектрического преобразования солнечной энергии.

Ключевые слова: *солнечная фотоэлектрическая установка, оптическая среда, концентратор, солнечное излучение*

Актуальность. В настоящее время наиболее важная проблема на пути широкого использования солнечной энергии это обеспечение экономической рентабельности солнечных установок. Основные пути решения этой задачи – повышение КПД преобразования и (или) снижение стоимости солнечных установок.

Анализ последних исследований и публикаций. Одними из перспективных в этом плане солнечных установок являются солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ), преобразующие концентрированное солнечное излучение [1, 2]. В качестве одного из путей повышения эффективности солнечных модулей предложено использование оптических методов, в частности, повышение эффективности систем концентратор-фотопреобразователь [3]. В [4–6] были определены условия повышения плотности оптического излучения в оптических средах, подтвержденные экспериментально.

Цель исследования – анализ возможностей увеличения плотности оптического излучения для повышения эффективности концентраторных СФЭУ.

Материалы и методы исследования. Схема системы, включающей первичный концентратор (K - параболоид, линза Френеля и др.) и вторичный концентратор (оптическая среда) в виде сферической линзы (L) с центром кривизны, в фокусе F параболоида приведена на рис. 1 (PV – каскадный фотоэлемент) [5].

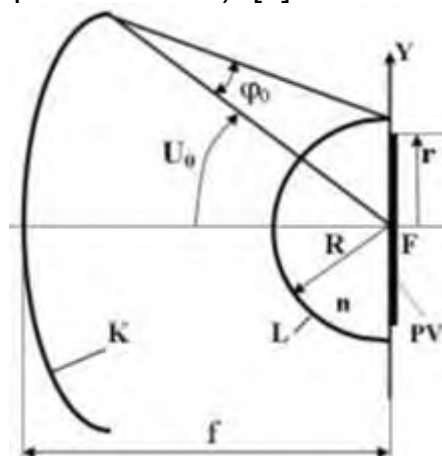


Рис. 1. Система концентратор-линза (оптическая среда)

Основными параметрами системы K-L являются: φ_0 – угловой радиус Солнца, n – показатель преломления и R – радиус кривизны линзы (среды), U_0 – угол раскрытия, f – фокусное расстояние и σ – среднеквадратическая неточность поверхности концентратора (неточность поверхности рассматривается как случайные угловые отклонения нормалей, распределенные по равномерному закону).

На рис. 2 приведено распределение концентрации (а) и потоков (б) в фокальной плоскости параболоидного концентратора на воздухе ($n = 1$) и в системе концентратор – линза (оптическая среда – дистиллированная вода с $n = 1.33$), когда приемник располагается внутри оптической среды. Френелевские потери на границе среды в данной системе не превышают 2–3 %.

Результаты исследований и их обсуждение. Теоретические расчеты проводились в предположении постоянства n . Как видно из рис. 2а, в системе K-L, повышается не только концентрация, но и уменьшаются размеры пятна изображения Солнца. Причем важно то, что эти эффекты имеют место как для точного, так и неточного концентратора. Анализ показывает, что указанные эффекты в среде обусловлены двумя факторами.

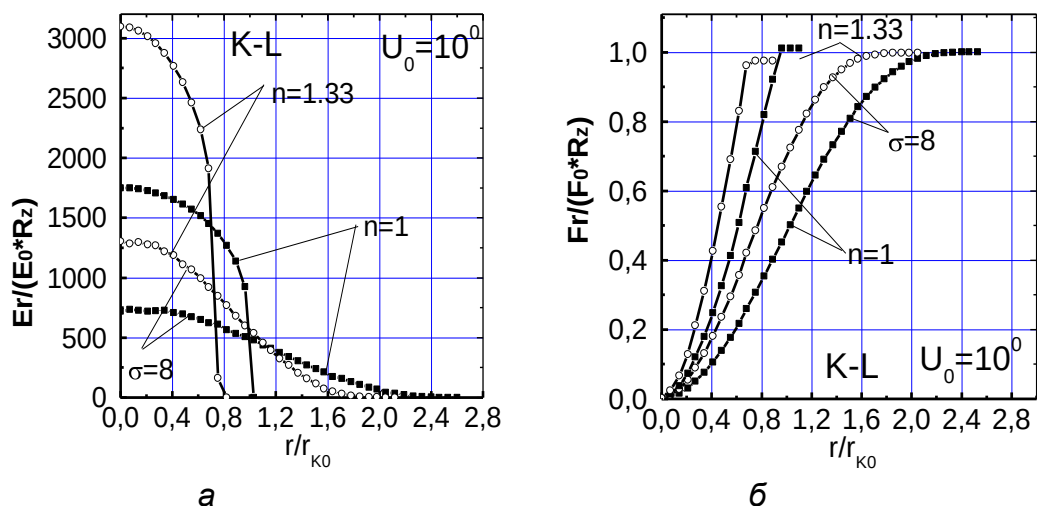


Рис. 2. Концентрации и потоки в фокальной плоскости концентратора на воздухе (о) и в системе К-Л в среде (■) для точного ($\sigma=0$) и неточного ($\sigma=8$ угловых минут) концентратора

Первый фактор – оптические свойства линзы, что приводит к уменьшению пятна изображения и второй – увеличение яркости излучения в среде (пропорционально квадрату показателя преломления среды). Причем, как видно из рис. 2б, потоки в исходном пятне и уменьшенном одинаковы. Очевидно, что в этом случае, уменьшение размеров пятна само приводит к повышению средней плотности (концентрации). Однако доказательством влияния второго фактора является то, что на концентрацию в фокусе оптические свойства линзы не влияют (осевые лучи идут по нормальям сферической поверхности и не преломляются), т.е. увеличение плотности в фокусе связано только с одним фактором – увеличением яркости излучения в среде. Далее по пятну действуют оба фактора. В целом это объясняет и эффекты повышения плотности излучения в среде (воде), полученные в [8] для системы источник – плоская среда. Т.е. также имеет место влияние двух факторов [4], и можно предположить, что поток от источника на полуплоскости должен оставаться постоянным, как в воздухе, так и в среде. Обнаруженные эффекты имеют практическое значение и позволяют уменьшить размеры фотоэлемента.

Так, в рассмотренной системе, когда допустимый поток, перехватываемый фотоэлементом, составляет 95 %, уменьшение площади фотоэлемента за счет применения оптической среды (жидкая линза, или линза с другой оптической средой с промежуточным жидким слоем между линзой и фотоэлементом) составит для точного концентратора около 1,8 раза, а для неточного – 1,7 раза. При этом, соответственно, возрастает и средняя по приемнику концентрация.

С целью подтверждения этих эффектов были проведены экспериментальные исследования. В качестве имитации поля концентрации был использован распределенный источник с угловыми размерами порядка 10 угловых градусов, а в качестве среды

использовали воду. Приемник представлял фотоэлемент, изготовленный в ФТИ АН РУз. На рис. 3 представлены ВАХ этого фотоэлемента на воздухе (а) и в воде (б).

Как видно, в первом случае, когда элемент находится на воздухе, максимальная снимаемая мощность составляет около 0.671 мВт, а в воде – около 1.53 мВт, или увеличение почти в 2,3 раза.

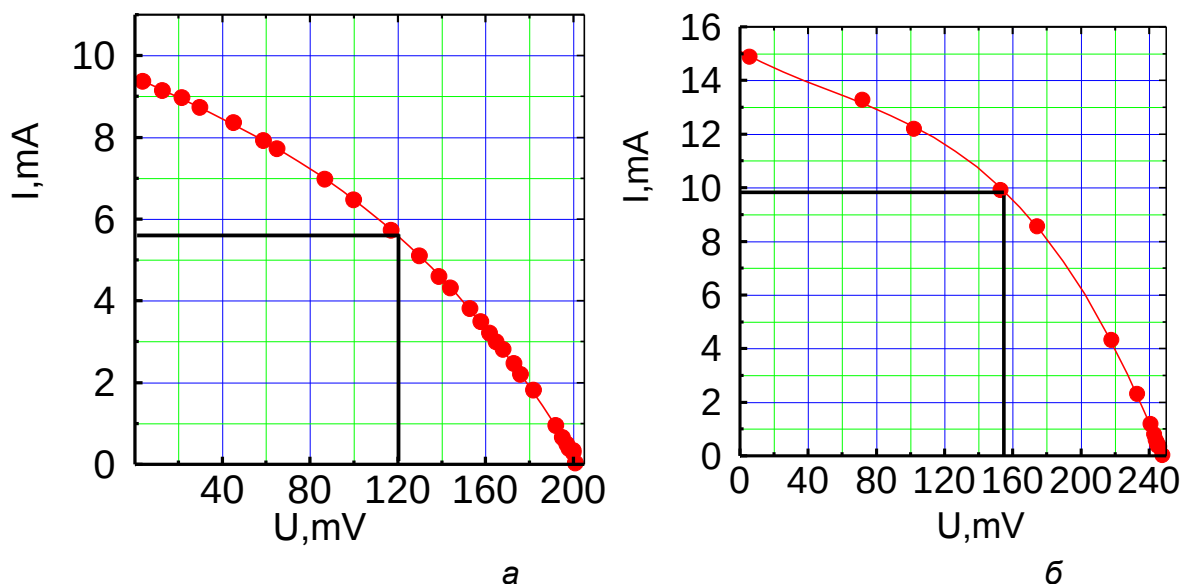


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика фотоэлемента на воздухе (а) и в воде (б) при одинаковом расстоянии между источником и фотоэлементом

Такое увеличение выходной мощности обусловлено следующими факторами: перераспределением потока излучения в воде [6], увеличением яркости излучения в воде, а также уменьшением потерь отражения на границе среда-фотоэлемент. Также были проведены экспериментальные исследования эффектов в многослойных оптических средах и также было получено увеличение плотности излучения.

Выводы и перспективы. Приведенные выше результаты убедительно показывают, что использование оптических сред в концентраторных СФЭУ позволяет уменьшить размеры фотоэлемента в 1,5–1,7 раза, при одной и той же мощности СФЭУ, что в целом способствует улучшению экономических характеристик концентраторных СФЭУ. Использование указанного подхода представляется эффективным средством повышения эффективности солнечных концентраторных систем фотоэлектрического преобразования солнечной энергии. Дальнейшие исследования было бы целесообразно посвятить поиску материалов, которые могли бы быть использованы для создания оптических сред и которые обладали бы свойствами, обеспечивающими стабильное и устойчивое функционирование реальных энергетических систем на практике.

Список литературы

1. Перспективы создания космических солнечных батарей с концентраторами излучения и многопереходными гетероструктурными фотопреобразователями / В. М. Андреев, В. А. Грилихес, Б. А. Соколов [и др.] // Известия Академии наук. – 2003. – Вып. 3. – С. 60–69.
2. Masafumi Yamaguchi A., Tatsuya Takamoto B., Kenji Araki C., Nicholas Ekins-Daukes. A Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential // Solar Energy, 79 (2005). – P. 78–85.
3. Бахрамов С. А. Повышение эффективности систем концентратор – фотопреобразователь / С. А. Бахрамов, Ш. И. Клычев, В. В. Харченко // Труды 7-й Международной научно-технической конференции, 18–19 мая 2010 года. Ч. 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – С. 93–97.
4. Клычев Ш. И. Концентрация солнечного излучения в оптической среде / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, Ю. А. Дудко // Гелиотехника. – 2009. – № 3. – С. 78–81.
5. Клычев Ш. И. Оптические среды – как способ повышения эффективности концентраторных солнечных фотоэлектрических установок / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, В. В. Харченко, З. Ш. Клычев // Гелиотехника. – 2012. – № 2. – С. 71–73.
6. Klychev Sh. I., Bakhramov S. A., Klychev Z. Sh., Kharchenko V. V. Optical media as a way to improve performance of solar concentrator photoelectric devices. Applied Solar Energy. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 123–125.
7. Клычев Ш. И. Повышение эффективности модульных солнечных фотоэлектрических установок / Ш. И. Клычев, С. А. Бахрамов, З. И. Клычев, В. В. Харченко // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2017. – Вип. 261. – С. 20–28.
8. Клычев Ш. И. Перераспределение потока излучения в оптической среде с плоской границей / Ш. И. Клычев // Гелиотехника. – 2010. – № 3. – С. 77–79.

References

1. Andreyev, V. M., Grilikhes, V. A., Sokolov B. A. [et al.]. (2003). Perspektivy sozdaniya kosmicheskikh solnechnykh batarey s kontsentratorami izlucheniya i mnogoperekhodnymi geterostrukturnymi fotopreobrazovatelayami [Prospects for the creation of space solar batteries with radiation concentrators and multi-transient heterostructure photoconverters] Izvestiya Akademii nauk, 3, 60–69.
2. Masafumi Yamaguchi, A., Tatsuya Takamoto, B., Kenji Araki, C., Nicholas Ekins-Daukes. (2005). A Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential. Solar Energy, 79, 78–85.
3. Bakhramov, S. A., Klychev, S. I., Kharchenko. V. V. (2010). Povysheniye effektivnosti sistem kontsentrator – fotopreobrazovatel' [Increasing the efficiency of the concentrator-photoconverter systems]. Trudy 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ch. 4 Vozobnovlyayemyye istochniki energii. Mestnyye energoresursy. Ekologiya. Moscow: GNU VIESKH, 93–97.
4. Klychev, Sh. I., Bakhramov, S. A., Dudko, Yu. A. (2009). Kontsentratsiya solnechnogo izlucheniya v opticheskoy srede [The concentration of solar radiation in an optical medium]. Geliotekhnika, 3, 78–81.
5. Klychev, Sh. I., Bakhramov, S. A., Kharchenko, V. V., Klychev, Z. Sh. (2012). Opticheskiye sredy – kak sposob povysheniya effektivnosti kontsentratornykh

solnechnykh fotoelektricheskikh ustanovok [Optical media – as a way to increase the efficiency of concentrator solar photovoltaic installations]. *Geliotekhnika*, 2, 71–73.

6. Klychev, Sh. I., Bakhramov, S. A., Klychev, Z. Sh., Kharchenko, V. V. (2012). Optical media as a way to improve performance of solar concentrator photoelectric devices. *Applied Solar Energy*, 48 (2), 123–125.

7. Klychev, Sh. I., Bakhramov, S. A., Klychev, Z. I., Kharchenko, V. V. (2017). Povysheniye effektivnosti modul'nykh solnechnykh fotoelektricheskikh ustanovok [Increasing the efficiency of modular solar photovoltaic systems]. *Naukoviy visnik NUBiP Ukraïni. Seriya: Tekhnika ta energetika APK*, 261, 20–28.

8. Klychev, Sh. I. (2010). Pereraspredeleniye potoka izlucheniya v opticheskoy srede s ploskoy granitse [Redistribution of the radiation flux in an optical medium with a plane boundary]. *Geliotekhnika*, 3, 77–79.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНЦЕНТРАТОРНИХ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ОПТИЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

**Ш. І. Кличов,
С. А. Бахрамов,
З. Ш. Кличов,
В. В. Харченко**

Анотація. Метою дослідження був аналіз можливостей збільшення густини оптичного випромінювання для підвищення ефективності концентраторних сонячних фотоелектричних установок.

Розрахунково й експериментально досліджено можливість збільшення ефективності концентраторних фотоелектричних установок при використанні оптичних середовищ.

Показано, що за рахунок використання оптичних середовищ можливе зменшення площі фотоелемента в 1,5–1,7 раза за однієї і тієї самої потужності сонячної установки. Використання зазначеного підходу є ефективним засобом підвищення ефективності сонячних концентраторних систем фотоелектричного перетворення сонячної енергії.

Ключові слова: сонячна фотоелектрична установка, оптичне середовище, концентратор, сонячне випромінювання

IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF CONCENTRATORY SOLAR PHOTOELECTRIC INSTALLATIONS BY CREATION OF SPECIAL OPTICAL ENVIRONMENTS

**Sh. Klychev,
S. Bakhramov,
Z. Klychev,
V. Kharchenko**

Abstract. The aim of the study was to analyze the possibilities of increasing the density of optical radiation to improve the efficiency of concentrator solar photovoltaic systems.

The possibility of increasing the efficiency of concentrator photovoltaic installations using optical media has been calculated and experimentally studied.

It is shown that due to the use of optical media it is possible to reduce the area of the photocell by 1,5–1,7 times with the same power of the solar installation. The use of this approach seems to be an effective means of increasing the efficiency of solar concentrator systems of solar energy photoelectric conversion.

Keywords: solar photovoltaic system, optical medium, concentrator, solar radiation

УДК 681.513.5:663.4

ВИКОРИСТАННЯ КОГНІТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ УПРАВЛІННІ БІОТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Н. А. ЗАЄЦЬ, кандидат технічних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: z-n@ukr.net

В. М. ШТЕПА, кандидат технічних наук, доцент
керівник НДЛ «Екоінженерія»

Поліський державний університет, Республіка Білорусь
E-mail: shns1981@gmail.com

Анотація. Обґрунтовано використання нечітких когнітивних карт для сценарного управління біотехнологічними об'єктами харчових виробництв. Показано, що для використання когнітивних карт як інструменту агрегування знань групи експертів потрібно встановити точні значення нечітких змінних зв'язків між факторами, що становить труднощі при створенні когнітивної карти з великою кількістю вершин. Було розроблено алгоритм створення і практичного використання нечіткої системи узагальнення оцінки експертів у штатному режимі.

Поставлено задачу самоадаптації розроблюваної нечіткої когнітивної карти при зміні експертних оцінок або параметрів об'єкта, оскільки одним із головних недоліків систем на основі нечіткої логіки є їх нездатність самонавчатися і для їх підстроювання необхідне повторне залучення експертів при повній функціональній зупинці. Для вирішення поставленої задачі використовували апарат нечітких нейронних мереж.

© Н. А. Заєць, В. М. Штепа, 2018

Було створено нечітку когнітивну карту, яка функціонує згідно зі спрощеним алгоритмом нечіткого висновку та дає змогу сценарно досліджувати поведінку системи при зміні величин концептів. Апробовано та побудовано в середовищі MatLAB нечітку нейронну мережу для узагальнення експертних оцінок з відповідними функціями належності.

Ключові слова: *нечіткі когнітивні карти, нейронна мережа, вагові коефіцієнти, сценарії управління, множина концептів*

Актуальність. На сьогодні прогнозування стану і деяких параметрів біотехнологічних об'єктів харчових виробництв пов'язано із залученням групи експертів даної предметної області. Зручним інструментом агрегації знань численної і, як правило, сильно розподіленої групи експертів, є математичний апарат когнітивних карт і нечітких когнітивних карт (НKK). Типово когнітивна карта представляється як знаковий орграф. Перевагами використання НKK, порівняно зі звичайними когнітивними картами, є наочність, що є важливим чинником під час роботи групи експертів предметної області та здатність чисельно описувати процеси, які моделюються. Оскільки більшість фактичної інформації по об'єкту управління отримується з експертних оцінок, то вона багато в чому має суб'єктивний характер [1]. Причому, думки експертів щодо одного й того самого питання можуть істотно, іноді принципово, відрізнятись. Тому завдання оптимального узагальнення експертних думок з метою побудови адекватної НKK, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методологія когнітивного моделювання, призначена для аналізу й прийняття рішень в непередбачених ситуаціях, заснована на моделюванні суб'єктивних уявлень експертів про ситуацію і включає:

- методологію структуризації ситуації;
- модель подання знань експерта, як знаковий орграф (когнітивна карта) (F, W) , де F – безліч факторів ситуації, W – безліч причинно-наслідкових відносин між факторами ситуації;
- методи аналізу ситуації.

Методологія когнітивного моделювання розвивається в напрямі вдосконалення апарату аналізу і моделювання ситуації [1–4]. У праці [2] адаптований метод аналізу нечіткої бази до вирішення завдання встановлення аналогії соціально-економічних систем, що моделюються різними нечіткими графами. У праці [4] запропоновано підхід, що використовує нечіткі множини для моделювання сили керуючого впливу за різних типів зв'язків між попередньою і наступною цілями функціонування. Однак існуюча методологія структуризації ситуації і модель подання знань експерта не дає змоги аналізувати складні ситуації. Створення великих моделей, які включають десятки або сотні факторів, потребує розробки іншої моделі подання знань про ситуацію, методології структуризації непередбачених складних ситуацій, методів пояснення та інтерпретації результатів моделювання й підтримки генерації рішень.

Одним із ефективних засобів вирішення такої ситуації є нечіткі когнітивні карти, де множина зв'язків між концептами, подана як числові значення ступенів причинності таких зв'язків. На основі побудованої НКК формується матриця взаємовпливів концептів, після чого досліджується поведінка і надійність карти. Розраховуються її системні показники – консанси, дисонанси.

Для використання когнітивних карт, як інструмент агрегування знань групи експертів, потрібно встановити точні значення нечітких змінних зв'язків між факторами, що становить труднощі при створенні когнітивної карти з великою кількістю вершин. Для автоматичного настроювання значень змінних зв'язків використовуються алгоритми навчання когнітивної карти. Завдання навчання когнітивної карти полягає в мінімізації помилки результату прогнозування. Помилка прогнозування оцінюється як похибка між прогнозованими показниками карти і реальними значеннями факторів, відомих з історичних спостережень.

Мета дослідження – розробити структуру нечіткої когнітивної карти, що включатиме нечітку нейронну мережу узагальнення експертних оцінок з метою адаптивного коригування матриці взаємного впливу концептів НКК.

Матеріали і методи дослідження. При подальших дослідженнях використаємо узагальнені НКК, кожен концепт яких характеризується терм-множиною лінгвістичної змінної:

$$T_i = (T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_j}^i), \quad (1)$$

де m_j – число типових станів концепта.

Для опису станів кожного терма T_k^i будується терм-множина із функцією належності $\mu_{T_k^i}(x)$. Зв'язки між типовими станами кожної пари концептів задаються нечіткими змінними. Відповідна матриця НКК формується на стадії постановки проекту.

Матриця E , з позиції теорії нечітких множин, може трактуватись як лінгвістична змінна, тобто терм T , а складові частини цього рядка – як елементи t_{ij} з множини можливих значень. Наприклад, експертна оцінка відповіді на питання кількості розведення чистої культури дріжджів у стерильному суслі (розведення 1:100), при $n = 5$, може мати такий вигляд: $E = (0/3; 0/3.5; 0/4; 0/4.5; 0/5)$. Де в знаменнику – об'єм чистої культури дріжджів (л), у чисельнику – кількість позитивних оцінок.

Отже, експертна матриця повинна мати вигляд:

$$E = \{e_{ij} / v_{ij}\}, \quad (2)$$

де v_{ij} – усі можливі значення оцінок градацій експертних висновків, у яких може знаходитися результат стосовно i -го елемента (у нашому прикладі $V = 3, \dots, 5$ л).

Елементи матриці є ординатами функції належності $g(x)$ (x – вхідний сигнал), а експертна матриця буде мати більш простий вигляд:

$$E = (e_{ij}) = \begin{pmatrix} e_{11} & \dots & e_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & \dots & e_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Причому, рядки будуть відповідати кількості експертів, а стовпці – кількості оцінюваних показників (параметрів) виниклої проблеми (явища, процесу тощо).

Блок-схема алгоритму створення і практичного використання нечіткої системи узагальнення оцінки експертів у штатному режимі наведена на рис. 1.

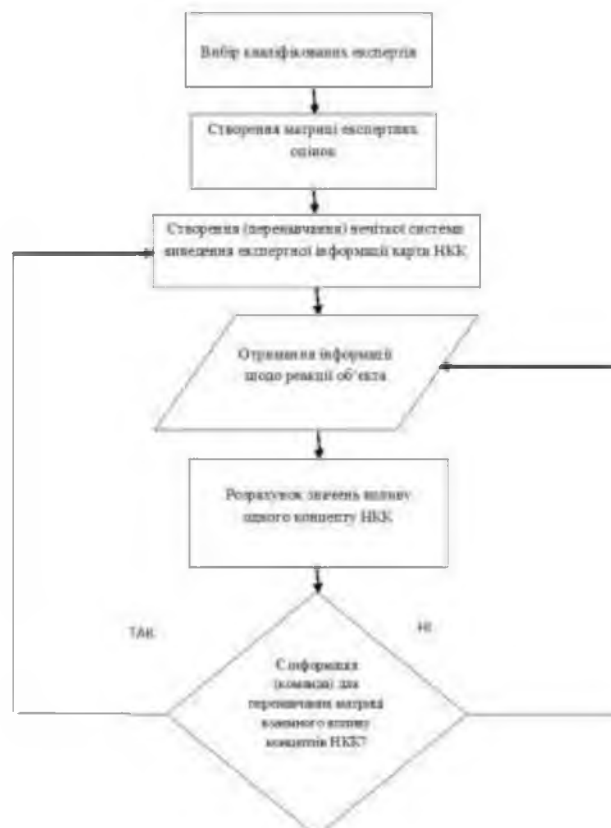


Рис. 1. Блок-схема алгоритму створення та адаптивного коригування матриці взаємного впливу концептів НКК

Однак одним із головних недоліків систем на основі нечіткої логіки є їх нездатність самонавчатися [6], для їх підстроювання необхідне повторне залучення експертів при повній функціональній зупинці. Для вирішення нашої задачі необхідною є здатність до самоадаптації при зміні експертних оцінок або параметрів об'єкта.

Тому має сенс використовувати апарат нечітких нейронних мереж – нейронних мереж із чіткими сигналами, вагами і активаційною функцією, але з об'єднанням їх з використанням t-норми, t-конорми або інших операцій [18].

При цьому входи, виходи і ваги нечіткої нейронної мережі (ННМ) – дійсні числа з необхідного нам діапазону [0, 1].

Узагальнений же алгоритм роботи ННМ такий: припустимо, що мережею повинне бути реалізоване невідоме відображення:

$$y^k = f(X^k) = f(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

за наявності навчальної множини:

$$X^1, y^1, \dots, X^N, y^N. \quad (5)$$

Для моделювання невідомого відображення f використаємо спрощений алгоритм нечіткого висновку, застосовуючи наступну форму запису предикатних правил:

$$P_i: \text{якщо } x_1 \in A_{i1} \text{ і } x_2 \in A_{i2} \text{ і } \dots \text{ і } x_n \in A_{in}, \text{ ТОДІ } y = z_i, \quad i = 1, 2, \dots, T, \quad (6)$$

де A_{ij} – нечіткі числа трикутної форми;

z_i – дійсні числа.

Визначення ступеня істинності i -го правила здійснюється за допомогою операції множення (Larsen):

$$\alpha_i = \prod_{j=1}^n A_{ij}(x_j^k), \quad (7)$$

і визначаючи вихід нечіткої системи дискретним аналогом центроїдного методу:

$$o^k = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^m \alpha_i}. \quad (8)$$

Введення функції помилки для k -го пред'явленого зразка вигляду:

$$E_k = \frac{1}{2} (o^k - y^k)^2, \quad (9)$$

дає змогу, як у звичайних (стандартних) нейронних мережах, використати градієнтний метод для підстроювання параметрів заданих предикатних правил. Так, величини z_i можна коригувати за співвідношенням:

$$z_i := z_i - \eta \frac{\partial E_k}{\partial z_i} = z_i - \eta (o^k - y^k) \frac{\alpha_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (10)$$

де η – константа, що характеризує швидкість навчання.

Результати досліджень та їх обговорення. Програмно модуль розрахунку вагових коефіцієнтів НКК можна створити та дослідити у системі MatLAB, інтегрований у відповідний математичний апарат нечітких нейронних мереж. Структуру нечіткої когнітивної карти розробляли виходячи з експериментальних досліджень та об'єктно-орієнтованого аналізу пивзаводу. Задача НКК – визначення ефективних стратегій та сценаріїв управління заданим технологічним комплексом. Формування значень вагових коефіцієнтів на основі експертних оцінок

повинно вирішити проблему неможливості оперативного опитування експертів при зміні параметрів функціонування технологічного комплексу.

Відповідну структуру нечіткої когнітивної карти розробляли у співпраці з трьома експертами пивоварного виробництва. Функціонування такої НКК здійснюється у напрямку від входу до виходу, згідно із залежністю:

$$Y = F(X, W) \quad (11)$$

де X – вхідні впливи системи, яка моделюється, включаючи і зовнішні фактори;

W – матриці взаємовпливів.

Оскільки у нас матиме місце зворотний зв'язок, рекурентний вигляд функціональної залежності:

$$Y(t) = X(t-1), Y(t-1), W \quad (12)$$

де t – період розвитку системи (для пивзаводу – 1 доба).

Створена НКК, яка функціонуватиме згідно зі спрощеним алгоритмом нечіткого висновку, дасть змогу сценарно досліджувати поведінку системи при зміні величин концептів.

Згідно з розробленою методикою та експертними оцінками трьох фахівців, формуємо значення коефіцієнтів матриці НКК. Максимальна різниця між думками кваліфікованих експертів становила 30%. Також очевидно, що просте зведення до середньоарифметичного значення не буде коректним, оскільки призведе до фактичної втрати суті експертної оцінки.

Експертам було запропоновано заповнити таблицю визначення ступеня близькості у діапазоні $[0, 1]$ різних значень коефіцієнта до встановленого ним, причому обов'язковою умовою було те, що значення 1,0 матимуть 3 числові показники матриці НКК, також по 3 значення встановлюють для ступенів 0,9 та 0,8. У середовищі MatLAB створили нечітку нейронну мережу (ANFIS) для узагальнення експертних оцінок (рис. 2) з відповідними функціями належності (рис. 3).

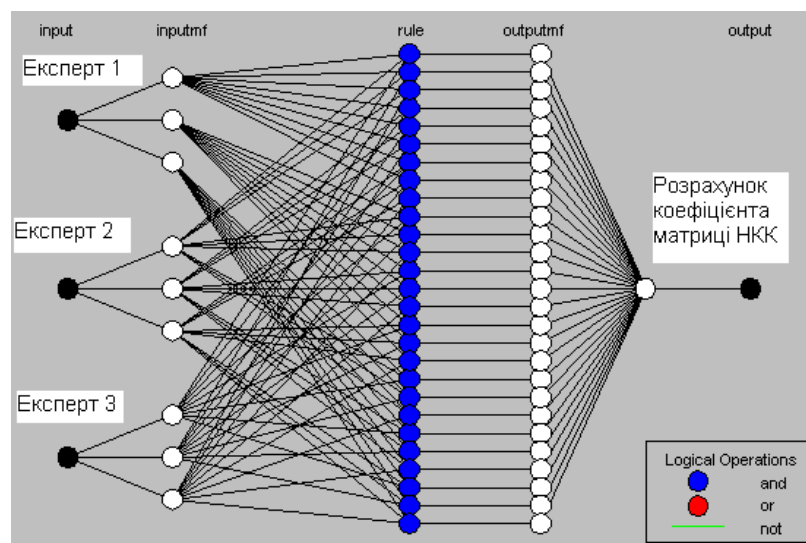


Рис. 2. Архітектура нечіткої нейронної мережі (ANFIS) узагальнення експертних оцінок

Виходячи зі статистичних даних, було створено систему узагальнення експертної думки, причому при навчанні бралися за входи думки експертів (числові значення коефіцієнтів), вихід – ступень близькості до експертної «1» (для всіх експертів).

На основі ANFIS (рис. 2) отримали в пакеті “MatLAB” систему нечіткого висновку (рис. 3) із відповідними продукційними правилами (рис. 4) та графічною інтерпретацією (рис. 5).

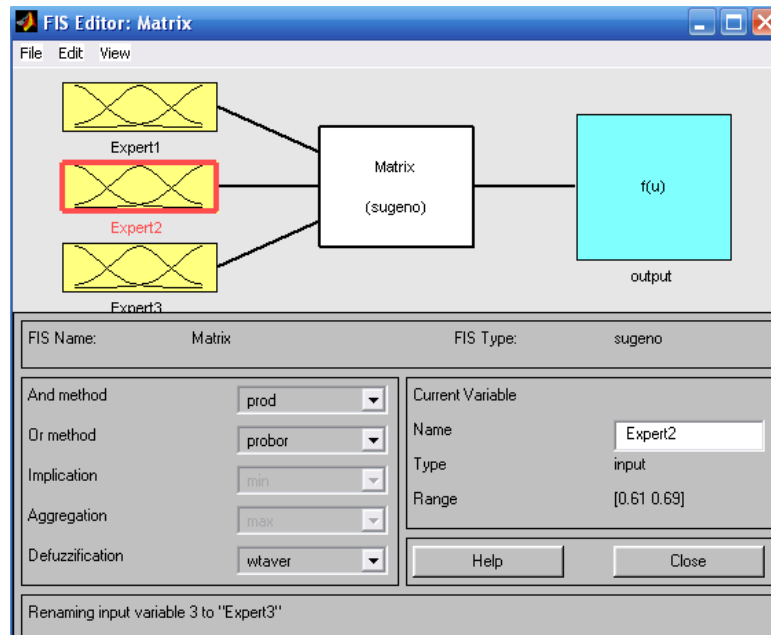


Рис. 3. Система нечіткої оцінки експертної думки

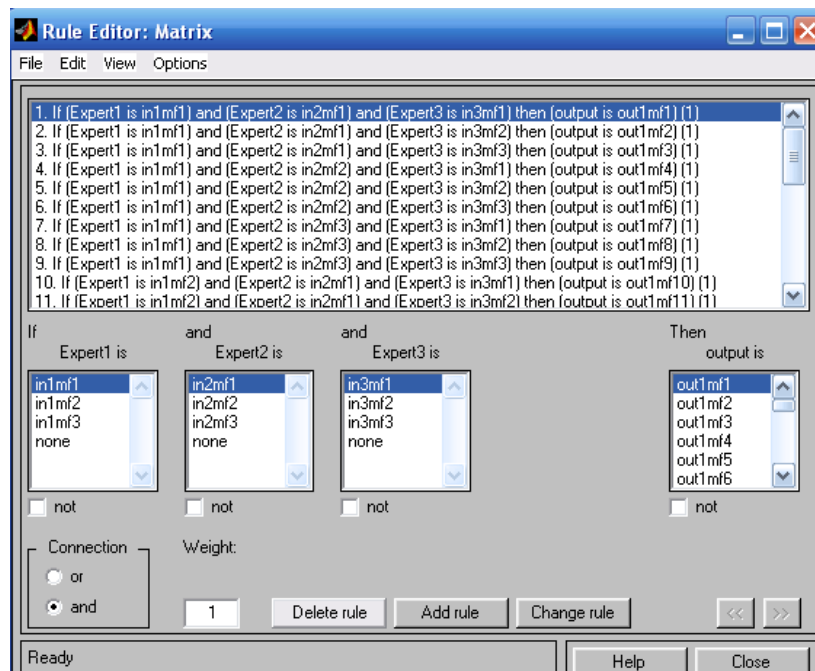


Рис. 4. Інтерфейс продукційних правил нечіткої системи оцінки експертної думки

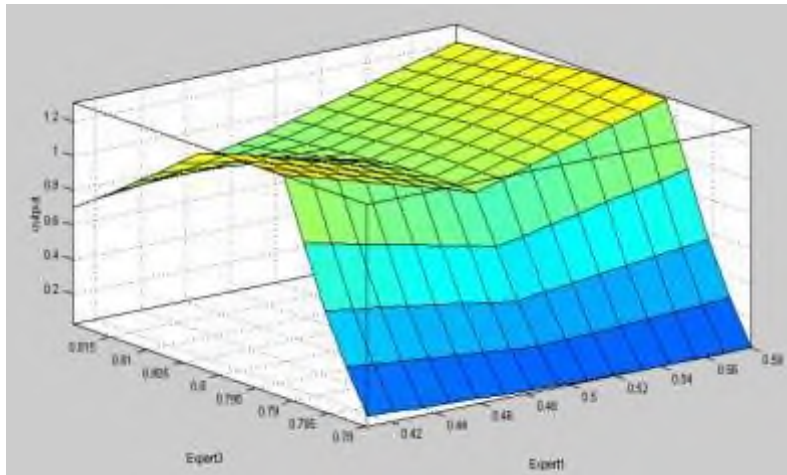


Рис. 5. Поверхня відгуку оцінки експертної думки

Тоді, із використанням вікна інтерактивного дослідження правил нечітких продукцій, знаходили консолідовані значення експертних оцінок, за яких ступінь достовірності становитиме – «1». Використавши створену методику встановили, що вихідне значення встановлюється 1,0 (консолідована думка експертів), коли коефіцієнт дорівнює 0,71 (на більше, ніж на 7% відрізняється від середньоарифметичного значення початкової думки експертів).

Висновки і перспективи. Обґрунтовано та розроблено методику адаптивного формування матриці взаємного впливу концептів нечіткої когнітивної карти пивзаводу на основі використання нечіткої нейронної мережі. Виходячи з технологічних особливостей досліджуваного об'єкта, задається інтервал, через який виконується сценарне планування. Створюване програмне забезпечення включає реалізацію роботи обох модулів, що забезпечує умову адаптивності: при виході системи за межі встановленої ефективності можливе перенавчання системи.

Список літератури

1. Carvalho J. P. Rule-based fuzzy cognitive maps and fuzzy cognitive maps – a comparative study // In Proceedings of the 18th international conference of the North American fuzzy information. – 1999. – by NAFIPS. P.115–119.
2. Федулов А. С. Обобщенные нечеткие когнитивные карты / А. С. Федулов, В. В. Борисов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2004. – № 4. – С. 3–21.
3. Miao Y. Transformation of cognitive maps / Miao, Y., Miao, Ch., Tao, X., Shen, Zh., Liu, Zh. // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2010. – P. 114–124.
4. Боженюк А. В. Об использовании нечетких баз и антибаз при анализе нечетких когнитивных карт / А. В. Боженюк, Л. А. Гинис // Наука і освіта. – 2004. – № 4 – С. 276–285.
5. Засць Н. А. Інтелектуальна система визначення ефективних стратегій управління технологічними комплексами в умовах невизначеності : Матеріали XXIV Міжнародної конференції з автоматичного управління / Н. А. Засць // Основи автоматики, 2017. – С. 70–72.

6. Системи штучного інтелекту: нечітка логіка, нейронні мережі, нечіткі нейронні мережі, генетичний алгоритм / [Лисенко В. П., Решетюк В. М., Штепа В. М., Заєць Н. А.] / – К. : НУБІП України, 2014. – 336 с.

References

1. Carvalho, J. (1999). Rule-based fuzzy cognitive maps and fuzzy cognitive maps - a comparative study. 1999 In Proceedings of the 18th international conference of the North American fuzzy information, 115–119.
2. Fedulov, A. S., Borisov, V. V. (2004). Obobshchennyye nechetkiye kognitivnyye karty [Generalized fuzzy cognitive maps]. Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye, 4, 3–21.
3. Miao, Y., Miao, Ch., Tao, X., Shen, Zh., Liu, Zh. (2010). Transformation of cognitive maps 2010 IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 114–124.
4. Bozhenyuk, A. V. Ginis, L. A. (2004). Ob ispol'zovanii nechetkikh baz i antibaz pri analize nechetkikh kognitivnykh kart [On the use of fuzzy bases and antibases in the analysis of fuzzy cognitive maps]. Nauka i osvita, 4, 276–285.
5. Zaiets, N. A. (2017). Intelligent system for determining effective strategies for managing technological complexes in conditions of uncertainty. 2017 materials of the XXIV International Conference on Automatic Control Fundamentals of Automation, 70–72.
6. Lysenko, V. P, Reshetyuk V. M., Shtepa V. M., Zaiets N. A. (2014). Systemy shtuchnoho intelektu: nechitka lohika, neyronni merezhi, nechitki neyronni merezhi, henetychnyy alhorytm [Systems of artificial intelligence: fuzzy logic, neural networks, fuzzy neural networks, genetic algorithm]. Kyiv: NUBIP Ukr., 336.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

**Н. А. Заец,
В. Н. Штепа**

Аннотация. Обосновано использование нечетких когнитивных карт для сценарного управления биотехнологическими объектами пищевых производств. Показано, что для использования когнитивных карт в качестве инструмента агрегирования знаний группы экспертов нужно установить точные значения нечетких переменных связей между факторами, что представляет трудности при создании когнитивной карты с большим количеством вершин. Был разработан алгоритм создания и практического использования нечеткой системы обобщения оценки экспертов в штатном режиме.

Поставлена задача самоадаптации разрабатываемой нечеткой когнитивной карты при изменении экспертных оценок или параметров объекта, так как одним из главных недостатков систем на основе нечеткой логики является их неспособность самообучаться и для их подстройки необходимо повторное привлечение экспертов при полной функциональной остановке. Для решения поставленной задачи использовали аппарат нечетких нейронных сетей. Было создано

нечеткую когнитивную карту, которая функционирует согласно упрощенного алгоритма нечеткого вывода и позволяет сценарно исследовать поведение системы при изменении величин концептов. Апробирована и построена в среде MatLAB нечеткая нейронная сеть для обобщения экспертных оценок с соответствующими функциями принадлежности.

Ключевые слова: нечеткие когнитивные карты, нейронная сеть, весовые коэффициенты, сценарии управления, множество концептов

USE OF COGNITIVE SIMULATION AT THE MANAGEMENT OF BIOTECHNOLOGICAL OBJECTS OF FOOD PRODUCTION

N. Zaiets,
V. Shtepa

Abstract. The use of fuzzy cognitive maps for scenario management of biotechnological objects of food production is grounded. It is shown that to use cognitive maps as a tool for aggregating the knowledge of a group of experts, it is necessary to establish the exact value of fuzzy variable relationships between factors, which presents difficulties in creating a cognitive map with a large number of vertices. An algorithm was developed for the creation and practical use of a fuzzy system for generalizing the evaluation of experts in the regular mode. Since one of the main disadvantages of systems based on fuzzy logic is their inability to self-learn and for their adjustment, it is necessary to re-engage experts at full functional stop. The article sets the task of self-adaptation of the fuzzy cognitive map being developed when changing expert estimates or object parameters. To solve this problem, the apparatus of fuzzy neural networks was used. A fuzzy cognitive map was created that operates according to a simplified algorithm of fuzzy inference and allows you to scrutinize the behavior of the system when the values of concepts change. A fuzzy neural network was tested and constructed in MatLAB environment for generalization of expert estimations with corresponding membership functions.

Keywords: fuzzy cognitive maps, neural network, weights, control scenarios, many concepts

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФЭТ МОДУЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. В. ХАРЧЕНКО, доктор технических наук, профессор
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), г. Москва, Россия

Аннотация. Целью исследования была оценка состояния работ по моделированию ФЭТ модулей и перспектив использования такого подхода.

Представлены результаты исследования параметров теплофотозлектрических модулей, которые на практике трудно получить для проектирования энергетических систем с использованием ФЭТ модулей. Поэтому необходимый объем информации было бы удобно получать, применяя методы компьютерного или математического моделирования.

Предлагаемые в настоящее время решения не позволяют сформулировать подход для решения практических задач по оптимизации конструкции ФЭТ модулей, а также по выбору оптимальных технологических решений для их применения в конкретных технологиях или комплексах. Это показывает, что работа в направлении создания простого, но в то же время эффективного аппарата для моделирования в заданной области представляется крайне полезной.

Ключевые слова: солнечная радиация, солнечный элемент, фотозлектрический модуль, теплофотозлектрический модуль

Актуальность. Солнечная энергетика несомненно, особенно с учетом темпов ее развития, может быть названа энергией будущего, а объемы ее рынка будут неуклонно расти рис.1

Анализ последних исследований и публикаций. В качестве установок, осуществляющих энергоснабжение автономных потребителей с использованием солнечной энергии, успешно применяются комбинированные системы на основе фотозлектрических модулей и солнечных коллекторов. При этом электрическая энергия вырабатывается одним типом приборов (фотозлектрический модуль), а тепловая – в приборах другого типа (солнечный коллектор). Но кроме этих двух типов устройств для утилизации солнечной энергии существует и представлен на рынке третий тип – устройства, совмещающие в себе одновременно приборы двух вышеуказанных типов. Это, так называемые фотозлектрические тепловые (ФЭТ) модули, которые в зарубежной литературе именуются как PV Thermal modules (PVTM).

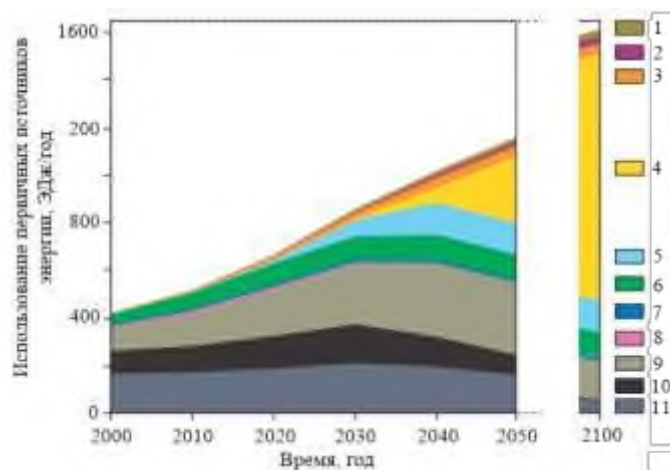


Рис 1. Оценка состояния и прогноз производства энергии первичных источников в мире до 2100 года [1]

1 – энергия геотермальных источников; 2 – энергия других возобновляемых источников; 3 – тепло от солнечного излучения (СИ); 4 – электроэнергия от СИ (фотоэлектрическое преобразование); 5 – ветровая электроэнергия; 6 – энергия биомассы; 7 – энергия ГЭС; 8 – энергия АЭС; 9 – энергия газа; 10 – энергия угля; 11 – энергия нефтепродуктов

Расширение масштабов использования на практике специальных устройств для комплексной утилизации приходящего солнечного излучения с одновременной выработкой электроэнергии и теплоты (Фотоэлектрические тепловые модули) требует совершенствования их конструкции и отработки технологии применения, что, в свою очередь, вызывает необходимость проведения широкого круга исследований

Экспериментальные исследования в направлении изучения параметров ФЭТ модулей и их характеристик в процессе функционирования в реальных энергетических системах трудоемки и затратны. Существенную помощь в получении необходимых массивов информации могло бы дать применение методов моделирования.

Цель исследования – оценка состояния работ по моделированию ФЭТ модулей и перспектив использования такого подхода.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являются теплофотоэлектрические модули. Основным методом решения поставленной задачи – анализ представленных в литературе источников на предмет получения данных о полученных результатах оценки параметров ФЭТ модулей в процессе работы энергетических систем и выделение результатов применения методов моделирования для исследования модулей и систем.

Результаты исследований и их обсуждение. Типы ФЭТ модулей и их общая характеристика. Когенерационный фотоэлектрический тепловой (ФЭТ) модуль – это устройство, которое одновременно выполняет преобразование солнечной энергии в электричество и тепло. ФЭТ модуль, объединенный с баком-аккумулятором, аккумуляторной батареей, инвертором и вспомогательным оборудованием, составляют систему

энергоснабжения. В зависимости от вида теплоносителя различают жидкостные (а) и воздушные (б) ФЭТ модули (рис. 2). Особенно перспективными можно рассматривать ФЭТ модули, созданные как сочетание обычных PV и SC-коллекторов в одном компоненте [3, 4]. Коллекторы PVT, как уже отмечалось, обычно изготавливают с использованием стандартного теплового коллектора, поглотитель которого покрыт слоем PV.

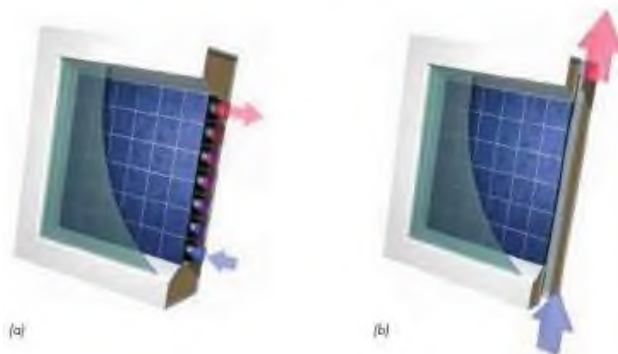


Рис. 2. Изображение жидкостного (а) и воздушного (б) ФЭТ (PVT) модулей [1]

Тепловая энергия передается воздуху [5] или воде [6–8], тогда как PV вырабатывают электроэнергию [3, 4]. Общий результат этих технологий – одновременное производство электроэнергии и тепла [9].

В целом ФЭТ установки могут быть классифицированы по ряду различных признаков, таких как: тип используемой фотоэлектрической панели (на аморфном кремнии, поли- и монокристаллическом кремнии, тонких пленках), остекленный или неостекленный модуль, тип теплоносителя (вода/гликоль или воздух), наличие концентратора, и т. д.

Можно выделить следующие основные группы систем энергоснабжения с использованием ФЭТ модулей:

1. Установки на основе плоских жидкостных ФЭТ модулей.
2. Установки на основе плоских воздушных ФЭТ модулей.
3. ФЭТ фасады зданий.
4. ФЭТ установки с концентратором.
5. Системы на основе теплового насоса и плоских ФЭТ модулей.

Принципиальная схема системы энергоснабжения с использованием ФЭТ модуля представлена на рис. 3 [2].

Потребитель, имея такую установку (систему), получает возможность получать одновременно и электрическую и тепловую энергию. Развитие ФЭТ модули получили, в основном, за рубежом, где были созданы различные типы систем на их основе, некоторые из которых получили коммерческую реализацию [1, 2]. В России подобных разработок выполнено немного. В основном это работы, выполненные в ВИЭСХ [12–15]. За длительный период развития работ в данном направлении было проведено множество исследований различных

аспектов работы ФЭТ модуля, к наиболее интересным из которых можно отнести ряд работ [4, 5, 7–11, 18, 19].

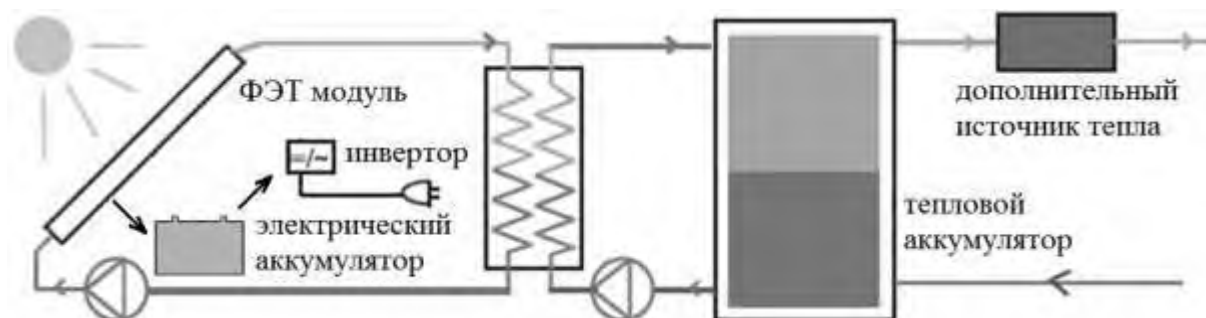


Рис. 3. Типовая схема системы энергоснабжения с использованием ФЭТ модуля

На базе плоского солнечного теплового коллектора, выполненного в форме пустотелой фляги и входящего в состав солнечной водогрейной установки [3], ранее мы разработали и изготовили макет когенерационного ФЭ теплового модуля, принципиальная схема которого представлена на рис. 4 [20].

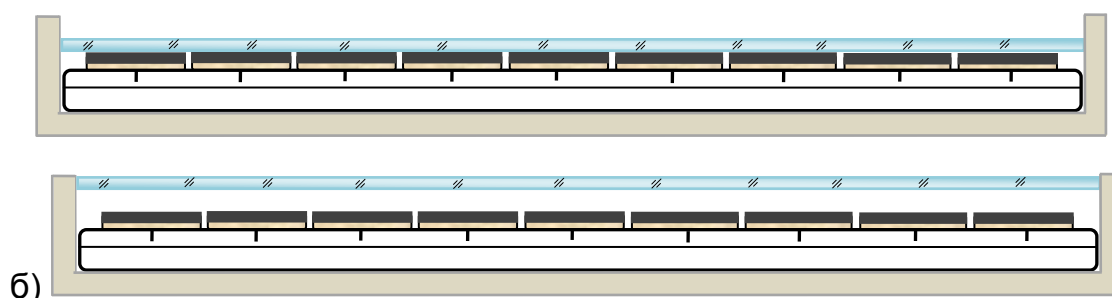


Рис. 4. Схема фотоэлектрического модуля на поверхности гелиоводонагревателя в форме пустотелой фляги (продольный разрез):

а) без воздушной прослойки; б) с воздушной прослойкой.

Схема прихода солнечного излучения на поверхность абсорбера с размещенными на ней солнечными элементами представлена на рис. 5 [19].

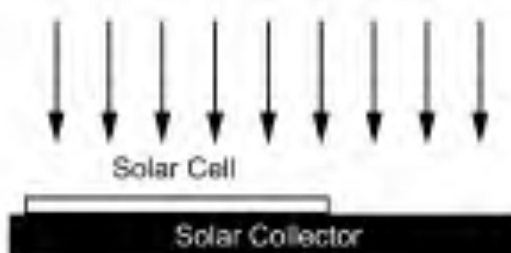


Рис. 5. Поступление СИ на поверхность абсорбера (справа) и солнечных элементов (слева)

Жидкостные ФЭТ модули на основе коммерчески доступных гелиоколлекторов с солнечными элементами, располагающимися на поверхности абсорбера, широко представлены на рынке. (Фирма Millennium Electric с 1991 года поставляет на рынок ФЭТ модули такого типа) [6]. Жидкостные ФЭТ модули производятся в Китае (фирма Helios Photovoltaic Co., Ltd.) [7]. Фирмой Res-regenerative energietechnik und systeme GmbH (Германия) выпускаются модули двух типов. Такие компании как Zhuhai Singyes Green Building Technology Co. Ltd. (Китай) [8], Solimpeks Solar Energy Corp. (Турция) [9], NES Ltd. (Болгария) [10], SIA ALTENERGO (Латвия) [11] в номенклатуре производимой ими продукции имеют ФЭТ модули.

Исследования параметров ФЭТ модулей и энергетических установок на их основе. Результаты ряда работ, посвященных рассмотрению конструкции модуля, динамике нагрева жидкости в баке-аккумуляторе и ряду других проблем, детально рассмотрены в [17]. Для такого рода исследований разрабатывались специальные технические средства и приспособления для фиксации показаний датчиков, установленных в различных частях ФЭТ модуля (рис. 6).

В [5] выполнены работы по теоретической оценке эффективности работы основных конструкций и конфигураций ФЭТ модулей. Рассмотрены варианты конструкций девяти модулей. При оценке предполагалось, что модули работают по схеме с принудительной циркуляцией теплоносителя с расходом жидкости $76 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$. В расчетах солнечная радиация была принята на уровне 800 Вт/м^2 , температура окружающей среды – $20 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость ветра – 1 м/с , температура неба – $4 \text{ }^\circ\text{C}$ и угол наклона коллектора 45° .

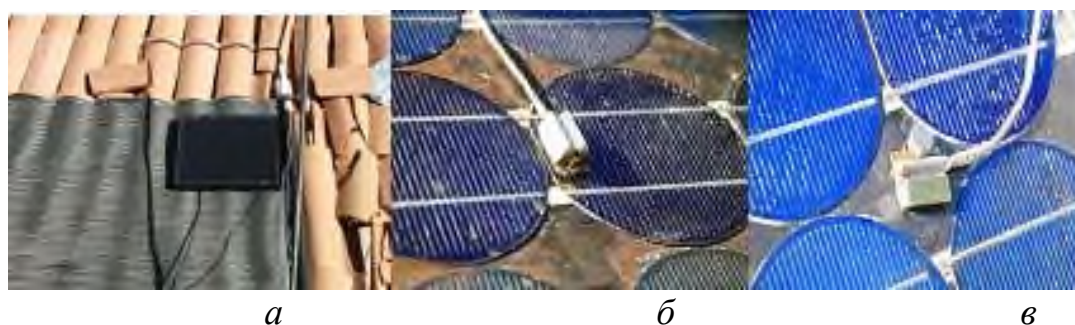


Рис. 6. Размещение датчиков в различных участках ФЭТ модуля и системы на их основе [5]

В ряде работ приводятся подробные описания проблем создания и использования ФЭТ модулей [5, 17, 21]. В обзоре [17], в котором приведен обширный материал по описанию и исследованию работы ФЭТ модулей различных типов, приводится, в частности, информация о комплексном исследовании динамики нагрева ФЭТ модуля в течение первого периода эксплуатации, анализ которой открывает большие возможности получения информации для дальнейшего совершенствования конструкции ФЭТ модуля и поиска оптимальных режимов его эксплуатации. Выборочная информация по динамике поведения системы приведена на рис.7.

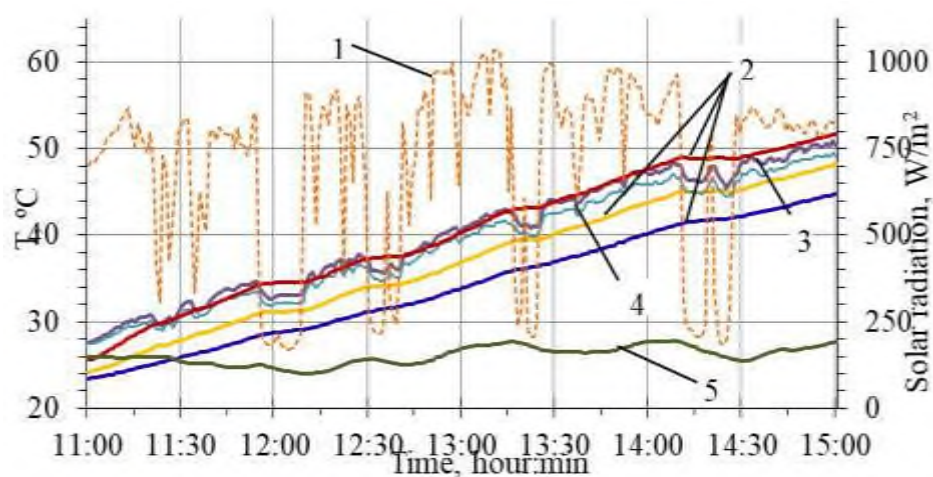


Рис. 7. Динамика изменения параметров системы с ФЭТ модулем в течение заданного периода его эксплуатации

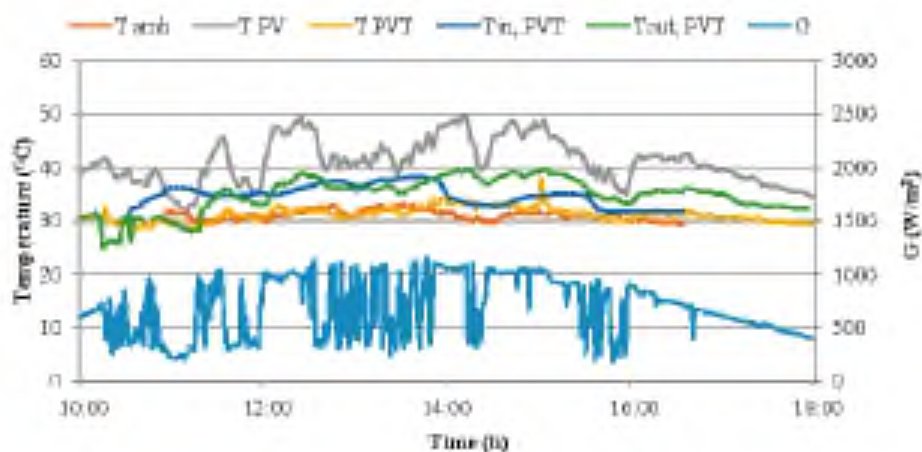


Рис. 8. Температура окружающей среды, ФЭТ и ФЭ модулей и солнечная радиация

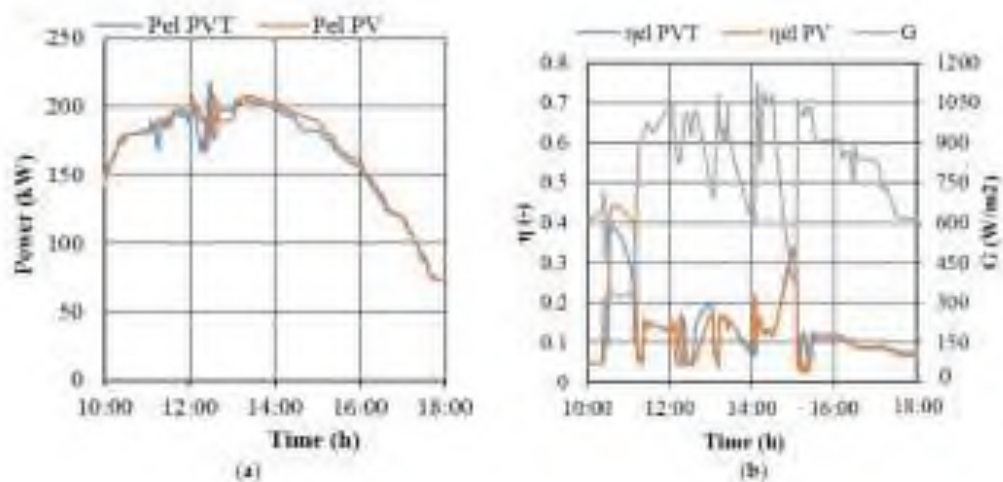


Рис. 9. Дневная температура ФЭТ и ФЭ модулей (а) и эффективность (b)

В [21] приведены аналогичные результаты (рис. 8, 9). Здесь же, наряду с экспериментальными исследованиями, проведены работы по моделированию. Для динамического моделирования энергетических характеристик была разработана схема экспериментальной установки, состоящая из четырех стеклянных солнечных PVT-коллекторов и четырех поликристаллических кремниевых PV-панелей для производства электроэнергии и бытовой горячей воды (рис. 10). Установка также включает водоохлаждаемый резервуар для хранения воды, с внутренним теплообменником. Схема расчетной системы изображена на рис. 10, она включает в себя три основные системные петли: жидкостная петля солнечного коллектора, связывающая по воде солнечное поле и накопительный бак с помощью насоса, подающего воду с постоянной скоростью; контур горячей воды, связанный с выходной водой из резервуара-хранилища ТК и поставляемый непосредственно потребителям или смешиваемый через тройник (TP), с водопроводной водой до набора горячей воды заданной температуры; водопроводная вода, связанная с сетевой водой, подаваемой с помощью жидкостного потока с контролируемой температурой (FD) в резервуар-хранилище.

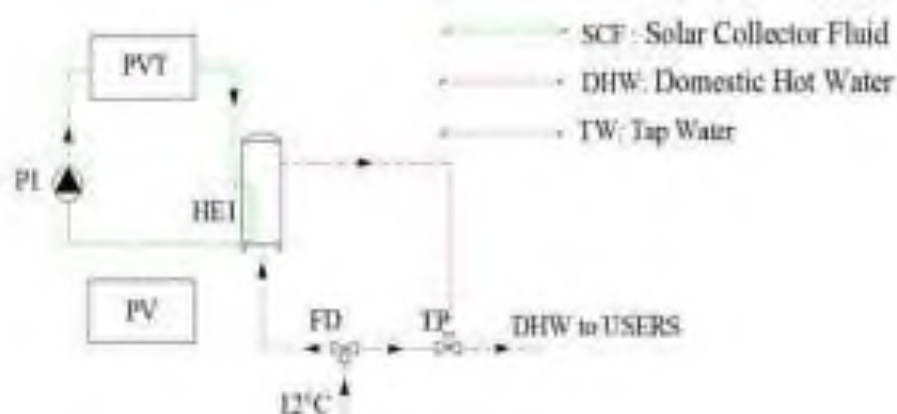


Рис. 10. Схема установки

Одновременно с технической моделью была рассмотрена и экономическая модель. Конечной целью рассматриваемой статьи было сравнение ФЭТ модулей, полученных по новой технологии (глазурированные коллекторы, с более традиционными ФЭ панелями).

Выполнено два типа анализов: численные, основанные на динамическом моделировании, и экспериментальный, целью которых было сравнение реальных характеристик ФЭ и ФЭТ коллекторы, состоящие из одних и тех же ФЭ-моделей в сочетании с установками для отбора воды. В обоих случаях результаты проанализированы с энергетической и экономической точек зрения. Необходимо отметить, что эти два подхода строго связаны, поскольку входные параметры численных моделей соответствуют экспериментальной установке. Симуляционная модель установки была разработана в среде TRNSYS с целью оценки энергетической и экономической эффективности эталонной

технологии PVT (то есть остекления коллекторов) по сравнению с испытанной PV-технологией. Численные результаты показали, что:

- электрическая энергия, создаваемая чисто фотоэлектрическими панелями PV (1778 кВтч/год), выше, чем PVT (1156 кВтч /год). Но при этом коллекторы PVT, кроме того, дают значительное количество тепловой энергии (1433 кВтч /год);

- электрическая эффективность фотоэлектричества, равная 17,9 %, тогда как коллекторы PVT показывают суммарную эффективность 26 % (сумма электрической эффективности – 11,6 % и тепловой – 14,4 %);

- во время летней работы температура на выходе PVT часто достигала 40 °C, тогда как зимой коллекторы PVT в основном используются для предварительного нагрева воды до заданной температуры с последующим догревом с помощью резистивного нагрева;

- экономическая целесообразность исследуемых систем (системы PV и PVT) в обоих случаях является положительной. Срок окупаемости около 4 лет.

Экспериментальные результаты показывают, что между фотоэлектрическими панелями и коллекторами PVT наблюдается значительная разность температур (около 10 °C). Средние электрические характеристики коллекторов и PV и PVT почти совпадают и варьируются в пределах 15 %. В отличие от указанной работы, в [23] догрев воды после ФЭТ модуля осуществляется в дополнительно устанавливаемых солнечных коллекторах.

В работе [24] была разработана и испытана в MANIT Bhopal, с целью проверки ее работоспособности, солнечная теплофотоэлектрическая (PV/T) система (рис. 11). Было установлено, что электрическая эффективность ФЭ части системы снижается по мере увеличения ее рабочей температуры. Предложена специальная конструкция, позволяющая снизить рабочую температуру ФЭ модулей и поддерживать электрическую эффективность на достаточном уровне.



Рис. 11. Экспериментальная система с ФЭТ и ФЭ (слева) модулями

Предложена классификация ФЭТ систем, выполнена оценка эффективности плоской пластины солнечного коллектора PV/T и сравнения его характеристик с солнечной ФЭ системой. Эксперименты проводились в метеоусловиях Бхопала (широта 23.16 °N; долгота 77.24 °E) в Индии в

течение 18/04/2014 с 10.00 утра до 5.00 вечера. ФЭТ модуль был построен с использованием солнечной панели из поликристаллического кремния мощностью 37 Вт площадью 0,3216 м², за панелью устанавливался медный лист и медная трубка, которые выполняли функцию поглотителя, воспринимающего тепло от панели и передающего его воде в медных трубах. Насос мощностью 18 Вт использовался для циркуляции воды в системе. Электрическая эффективность системы составляла около 7,57 %, дневной тепловой КПД составлял 50,1 %, а общая эффективность системы превышала 73 %. Эти результаты показывают, что электрические и тепловые характеристики комбинированной системы при использовании ФЭТ модулей намного выше, чем при использовании только ФЭ (PV). Этот вид системы (PV/T) особенно подходит для получения нагретой воды с низкой температурой, например для предварительного нагрева бытовой воды.

Одним из способов повышения эффективности фотоэлектрических систем является охлаждение их во время работы тонкой пленкой воды, с дополнительной системой утилизации теплоты, переданной этой воде [25]. Экспериментальные измерения как комбинированной системы, так и стандартной фотоэлектрической панели показали, что мощность и электрический КПД объединенной системы выше традиционной. Кроме того, поскольку тепло, удаляемое с PV-панели водной пленкой, не теряется, общая эффективность комбинированной системы становится еще выше. Опытная установка (рис. 12), состояла из двух аналогичных фотоэлектрических панелей (PV) каждая площадью 0,44 м². Максимальное выходное напряжение и ток составляли, соответственно, 23 В, 2,61 А с max выходной мощностью 60 Вт. Одна из панелей охлаждалась пленкой воды. Другая панель использовалась в качестве контрольной. Чтобы создать пленку воды над фотогальванической панелью, трубка с разрезом вдоль нее была установлена на верхнем конце этой панели. Вода, закачиваемая в питающую трубку, из щели течет по панели в виде тонкой пленки. Мощность насоса для циркуляции воды составляет 0,25 л.с.



Рис. 12. Солнечная фотоэлектрическая панель с пленкообразующим устройством

Результаты работы показали, что вода, собранная в нижней части панели, может использоваться для отопления. Если вода откачивается назад, к верхнему концу панели, она будет иметь желаемый уровень температуры. Общий выход энергии комбинированной системы (собранная тепловая и электрическая энергия для объединенных площадей) значительно увеличился по сравнению с электрической энергией с обычной фотоэлектрической панели.

Было показано, что общая эффективность комбинированной системы на один порядок больше, чем эффективность обычной панели. В работе моделирование не использовалось, что существенно снизило объем возможных получаемых результатов.

Выводы и перспективы. Экспериментальные работы по созданию макетов ФЭТ модулей и оценке их параметров чрезвычайно трудоемки. Поэтому для получения всей информации, необходимой для проектирования энергетических систем, на практике получить трудно. Необходимый объем информации было бы удобно получать, применяя методы компьютерного или математического моделирования. Однако такого рода работ в литературе представлено совершенно недостаточно.

В некоторых из описанных выше работ вопросы моделирования в большей или меньшей степени рассматриваются, но недостаточно активно. Предлагаемые решения не позволяют сформулировать подход, который мог бы обеспечить создание продукта, который можно было бы использовать на практике для решения практических задач по оптимизации конструкции ФЭТ модулей, а также по выбору оптимальных технологических решений для их применения в конкретных технологиях или комплексах. Это показывает, что работа в направлении создания простого, но в то же время эффективного аппарата для моделирования в заданной области, представляется крайне полезной.

Список литературы

1. Global market for residential and commercial solar thermal technologies // BCC Research LLC. – Available at: <http://www.bccresearch.com/pressroom/report/code/EGY069A>.

2. PVT Roadmap – a European guide for the development and market introduction of PV-thermal technology; 2006, PVT forum. – Available at: <http://www.pvtforum.org/index.html>.

3. Никитин Б. А. Солнечная водогрейная установка // Сельский механизатор. – 2006. – № 8. – С. 36.

4. Zondag H. A., Vries D. W., Van Hendel, W.G.J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A. The thermal and electrical yield of a PV- thermal collector // Solar Energy. – 2002. – 72 (2). – P. 113–128.

5. Zondag H. A., Vries D. W., Van Hendel, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A. The yield of different combined PV-thermal collector designs. // Solar Energy. – 2003. – 74 (3). – P. 253–269.

6. Fraisse G., Ménézo C., Johannes K. Fraisse G., Menez C., Johannes K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type // Solar Energy. – 2007. – 81 (11). – P. 1426–1438.

7. The Multi Solar System (PVT) // Millennium Electric. – Available at: <http://www.millenniumsolar.com/default.asp?catid=>.
8. PV Thermal (PVT) Module // Helios Photovoltaic. – Available at: <http://www.helios-pv.com/en/products/pv-thermal>.
9. Photo-Thermal and Photovoltaic Composite Module // Zhuhai Singyes Green Building Technology Co., Ltd. – Available at: http://ru.made-in-china.com/co_sye750/product_Photo-Thermal-and-Photovoltaic-Composite-Module-Anjia01-_hesogyey.html.
10. PV-T Hybrid Collectors // Solimpeks Solar Energy Corp. – Available at: <http://www.solimpeks.com/pv-t-hybrid-collectors>.
11. Hybrid photo-thermal collector SUNSYSTEM PVT 240 // SUNSYSTEM. – Available at: <http://www.sunsystem.bg/en/fotovoltaika/PV-T/>.
12. Никитин Б. А. Оценка распределения энергии приходящей солнечной радиации на выработку электричества и тепла в когенерационном фотоэлектрическом модуле / Б. А. Никитин, П. В. Тихонов, В. В. Харченко // Труды 7-й Международной научно-технической конференции, 18–19 мая 2010 года. Ч. 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – С. 159–164.
13. Тихонов П. В. Системы энергоснабжения на основе когенерационных фотоэлектрических и тепловых модулей и тепловых насосов / П. В. Тихонов, В. В. Харченко // Труды 7-й Международной научно-технической конференции, 18–19 мая 2010 года. Ч. 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2014. – С. 275–279.
14. Ковалёв А. А. Использование солнечных теплофотоэлектрических модулей для энергоснабжения биогазовой установки с тепловым насосом / А. А. Ковалёв, В. А. Панченко, В. В. Харченко // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 5 (20). – С. 233–240.
15. Харченко В. В. Повышение эффективности энергетических установок на базе тепловых фотоэлектрических модулей / В. В. Харченко, Б. А. Никитин, А. Т. Беленов // Науковий вісник НУБіП України. – 2014. – Вип. 194, ч. 3. – С. 45–51.
16. Chow T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Applied Energy. – 2010. – Vol. 87. – P. 365–369.
17. Kharchenko V., Panchenko V., Tikhonov P., Vasant. P. Cogenerative PV Thermal Modules of Different Design for Autonomous Heat and Electricity Supply // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. – IGI Global, 2018. – P. 86–120.
18. Zakharchenko R., Licea-Jime'nez L, Pe'rez-Garci'a S. A., Vorobeiv P., Dehesa-Carrasco U., Pe'rez-Robels J. F. et al. Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system. // Sol Energy Mater Sol Cells. – 2004. – № 82 (1–2). – P. 253–261.
19. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Gusarov V. Investigation of experimental flat PV thermal module parameters in natural conditions // Proceedings of 5th International Conference TAE 2013, Trends in Agricultural Engineering, 2–3 September, 2013, Prague, Czech Republic. – P. 309–313.
20. Харченко В. В. Выбор параметров фотоэлектрического теплового модуля / В. В. Харченко, Б. А. Никитин, П. В. Тихонов // Сборник трудов IX Международной ежегодной конференции «Возобновляемая и малая энергетика 2012». – М. : Комитет по проблемам применения возобновляемых источников энергии. – С. 292–297.

21. Buonomano A., Calise F., Vicidomini M. Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors. *Energies* 2016, 9, 497.
22. Zondag H. A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2008, 12, 891–895.
23. Теплоснабжение с использованием фотоэлектрических модулей / В. В. Харченко, Б. А. Никитин, П. В. Тихонов, А. Э. Макаров // *Техника в сельском хозяйстве*. – 2013. – № 5. – С. 11.
24. Rawat P., Debbarma M., Mehrotra S., Sudhakar K. Design, development and investigation of solar photovoltaic/thermal (PV/T) water collector system. *International Journal of Science, Environment and Technology*, Vol. 3, No 3, 2014, 1173–1183.
25. Hosseini R., Hosseini N., Khorasanizadeh H. An experimental study of combining a photovoltaic system with a heating system. *World Renewable Energy Congress 2011-Sweden 8–13 May 2011, Linkoping, Sweden, Photovoltaic Technology, Proceedings*. P. 2993–3000.

References

1. Global market for residential and commercial solar thermal technologies // BCC Research LLC. – Available at: <http://www.bccresearch.com/pressroom/report/code/EGY069A>.
2. PVT Roadmap – a European guide for the development and market introduction of PV-thermal technology; 2006, PVT forum. – Available at: <http://www.pvtforum.org/index.html>.
3. Nikitin, B. A. (2006). Solnechnaya vodogreynaya ustanovka [Solar water heater]. *Sel'skiy mekhanizator*, 8, 36.
4. Zondag, H. A., Vries, D. W., Van Hendel, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A. (2002). The thermal and electrical yield of a PV- thermal collector // *Solar Energy*. 72 (2), 113–128.
5. Zondag, H. A., Vries, D. W., Van Hendel, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A. (2003). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 74 (3), 253–269.
6. Fraisse, G., Ménézo, C., Johannes, K. Fraisse, G., Menezo, C., Johannes, K. (2007). Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. *Solar Energy*, 81 (11), 1426–1438.
7. The Multi Solar System (PVT). Millennium Electric. Available at: <http://www.millenniumsolar.com/default.asp?catid=>.
8. PV Thermal (PVT) Module. Helios Photovoltaic. Available at: <http://www.helios-pv.com/en/products/pv-thermal>.
9. Photo-Thermal and Photovoltaic Composite Module. Zhuhai Singyes Green Building Technology Co., Ltd. Available at: http://ru.made-in-china.com/co_sye750/product_Photo-Thermal-and-Photovoltaic-Composite-Module-Anjia01-_hesogyey.html.
10. PV-T Hybrid Collectors. Solimpeks Solar Energy Corp. Available at: <http://www.solimpeks.com/pv-t-hybrid-collectors>.
11. Hybrid photo-thermal collector SUNSYSTEM PVT 240. SUNSYSTEM. Available at: <http://www.sunsystem.bg/en/fotovoltaika/PV-T/>.
12. Nikitin, B. A., Tikhonov, P. V., Kharchenko, V. V. (2010). Otsenka raspredeleniya energii prikhodyashchey solnechnoy radiatsii na vyrabotku elektrichestva i tepla v kogeneratsionnom fotoelektricheskom module [Estimating the

distribution of energy of incoming solar radiation to the generation of electricity and heat in a cogeneration photovoltaic module]. Trudy 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ch. 4. Vozobnovlyayemye istochniki energii. Mestnyye energoresursy. Ekologiya. Moscow: GNU VIESKH, 159–164.

13. Tikhonov, P. V., Kharchenko, V. V. (2014). Sistemy energosnabzheniya na osnove kogeneratsionnykh fotoelektricheskikh i teplovykh moduley i teplovykh nasosov [Power supply systems based on cogeneration photovoltaic and thermal modules and heat pumps]. Trudy 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ch. 4. Vozobnovlyayemye istochniki energii. Mestnyye energoresursy. Ekologiya. Moscow: GNU VIESKH, 275–279.

14. Kovalev, A. A., Panchenko, V. A., Kharchenko, V. V. (2016). Ispol'zovaniye solnechnykh teplofotoelektricheskikh moduley dlya energosnabzheniya biogazovoy ustanovki s teplovym nasosom [Use of solar thermal and photovoltaic modules for the power supply of a biogas plant with a heat pump]. Innovatsii v sel'skom khozyaystve, 5 (20), 233–240.

15. Kharchenko, V. V., Nikitin, B. A., Belenov, A. T. (2014). Povysheniye effektivnosti energeticheskikh ustanovok na baze teplovykh fotoelektricheskikh moduley [Increasing the efficiency of power plants based on thermal photovoltaic modules]. Naukoviy visnik NUBiP Ukraïni, 194 (3), 45–51.

16. Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Applied Energy, 87, 365–369.

17. Kharchenko, V., Panchenko, V., Tikhonov, P., Vasant, P. (2018). Cogenerative PV Thermal Modules of Different Design for Autonomous Heat and Electricity Supply. Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. IGI Global, 86–120.

18. Zakharchenko, R., Licea-Jime'nez, L., Pe'rez-Garci'a, S. A., Vorobeiv, P., Dehesa-Carrasco, U., Pe'rez-Robels, J.F. et al. (2004). Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system. Sol Energy Mater Sol Cells, 82 (1–2), 253–261.

19. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Gusarov V. (2013). Investigation of experimental flat PV thermal module parameters in natural conditions. Proceedings of 5th International Conference TAE 2013, Trends in Agricultural Engineering, 2-3 September, 2013, Prague, Czech Republic, 309–313.

20. Kharchenko, V. V., Nikitin, B. A., Tikhonov, P. V. (2012). Vybor parametrov fotoelektricheskogo teplovogo modulya [Choice of the parameters of the photoelectric thermal module]. Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy ezhegodnoy konferentsii «Vozobnovlyayemaya i malaya energetika 2012. Moscow: Komitet po problemam primeneniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii, 292–297.

21. Buonomano, A., Calise, F., Vicidomini, M. (2016). Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors. Energies, 9, 497.

22. Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renew. Sustain. Energy Rev., 12, 891–895.

23. Kharchenko, V. V., Nikitin, B. A., Tikhonov, P. V., Makarov, A. E. (2013). Teplosnabzheniye s ispol'zovaniyem fotoelektricheskikh moduley [Heating with photovoltaic modules]. Tekhnika v sel'skom khozyaystve, 5, 11.

24. Rawat, P., Debbarma, M., Mehrotra, S., Sudhakar, K. (2014). Design, development and investigation of solar photovoltaic/thermal (PV/T) water collector system. International Journal of Science. Environment and Technology, 3 (3), 1173 – 1183.

25. Hosseini, R., Hosseini, N., Khorasanizadeh, H. (2011). An experimental study of combining a photovoltaic system with a heating system. World Renewable Energy Congress 2011-Sweden 8–13 May 2011, Linköping, Sweden, Photovoltaic Technology, Proceedings, 2993–3000.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФЕТ МОДУЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В. В. Харченко

Анотація. Метою дослідження була оцінка стану робіт з моделювання ФЕТ модулів і перспектив використання такого підходу.

Подано результати дослідження параметрів теплофотоелектричних модулів, які на практиці отримати важко для проектування енергетичних систем з використанням ФЕТ модулів. Тому необхідний обсяг інформації було б зручно отримувати, застосовуючи методи комп'ютерного або математичного моделювання.

Пропоновані нині рішення не дають змоги сформулювати підхід для вирішення практичних завдань щодо оптимізації конструкції ФЕТ модулів, а також з вибору оптимальних технологічних рішень для їх застосування в конкретних технологіях або комплексах. Це показує, що робота зі створення простого, але, водночас, ефективного апарату для моделювання в заданій області є вкрай корисною.

Ключові слова: сонячна радіація, сонячний елемент, фотоелектричний модуль, теплофотоелектричний модуль

STUDY OF THE FET MODULE WORK WITH USE ELEMENTS OF MATHEMATICAL MODELING

V. Kharchenko

Abstract. The aim of the study was to assess the status of the work on the modeling of FET modules and the prospects for using this approach.

The results of the study of the parameters of the thermoelectric photovoltaic modules are presented, which show that in practice it is difficult to design power systems using FET modules in practice. Therefore, the necessary amount of information would be convenient to receive, using methods of computer or mathematical modeling.

The solutions currently proposed do not allow us to formulate an approach for solving practical problems in optimizing the design of FET modules, as well as in selecting the optimal technological solutions for their application in specific technologies or complexes. This shows that the work towards the creation of a simple but at the same time an effective apparatus for modeling in a given area is extremely useful.

Keywords: solar radiation, solar cell, photoelectric module, thermoelectric photoelectric module

КОМПЛЕКТ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА НА ФЕРМАХ

А. Б. КОРШУНОВ, кандидат технических наук, доцент

Б. П. КОРШУНОВ, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

А. В. ИВАНОВ, аспирант*

**Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), г. Москва, Россия**

Аннотация. Разработка энергосберегающих технологий для охлаждения молока – одна из актуальнейших проблем в молочном животноводстве. Одним из эффективных путей снижения затрат энергии и повышения экологической чистоты технологического процесса производства молока на фермах является использование природного холода и экологически чистых хладоносителей с низкой температурой заморозки. В связи с этим, в ФНАЦ ВИМ проводятся исследования по разработке и внедрению комплекта энергосберегающего оборудования к системе охлаждения молока, работающего с использованием природного холода и экологически чистых хладоносителей с низкой температурой заморозки.

Предложена технологическая схема и произведен расчет потребления электроэнергии на первичную обработку молока по месяцам. Построены графики изменения затрат на электроэнергию в зависимости от среднегодовой температуры наружного воздуха. Применение системы с комплектом энергосберегающего оборудования для охлаждения молока позволяет повысить надежность, сохранить высокое качество молока и уменьшить эксплуатационные затраты. При этом расходы на электроэнергию уменьшаются в 1,5...3 раза в зависимости от региона, где устанавливается комплект.

Ключевые слова: охлаждение, молоко, энергосбережение, природный холод, экологически чистый, хладоноситель с низкой температурой заморозки

Актуальность. Рациональное использование природных ресурсов тепла, холода, а также электроэнергии является важной задачей при ведении экологически чистого агрохозяйствования и одним из основных требований при разработке энергосберегающих технологий и установок при производстве и хранении сельскохозяйственной продукции. Особенно это актуально при охлаждении и хранении молока, так как в этой отрасли сельскохозяйственного производства больше, чем в других, необходима реконструкция охлаждающих систем и наиболее серьезный

*Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент А. Б. Коршунов

© А. Б. Коршунов, Б. П. Коршунов, А. В. Иванов, 2018

ущерб терпит экономика страны от недостаточной мощности и надёжности холодильного оборудования и низкого качества молока.

Анализ последних исследований и публикаций. По данным [1], затраты электроэнергии на ферме в 200 голов со средним годовым удоем 4000 кг в год составляют на подогрев воды 717,5 ГДж (199305 кВт.ч), а на производство холода и хранения молока в резервуарах – 255,2 ГДж (70889 кВт.ч), что составляет около 20% от всего расхода электроэнергии на ферме за год.

Кроме того, согласно нормам ЕС, молоко соответствующее требованиям нашего 1-го и тем более 2-го сорта считается непригодными к потреблению, а в стране по экспертным оценкам производится около 90 % такого молока [2].

Одна из основных причин низкого качества молока – нарушение технологий его охлаждения и хранения. Поэтому разработка энергосберегающих технологий и установок для охлаждения молока является одной из актуальнейших проблем в молочном животноводстве [3, 4].

Одним из эффективных путей снижения затрат энергии и повышения экологической чистоты технологического процесса производства молока на фермах является использование природного холода и экологически чистых хладоносителей с низкой температурой заморозания [5, 6].

Цель исследования – разработка и внедрение комплекта энергосберегающего оборудования к системе охлаждения молока, работающего с использованием природного холода и экологически чистых хладоносителей с низкой температурой заморозания.

Материалы и методы исследования. Экспериментальный образец системы с комплектом энергосберегающего оборудования для охлаждения молока представлен на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальный образец системы с комплектом энергосберегающего оборудования для охлаждения молока

Система работает следующим образом (рис. 2). В теплое время года, хладагент от холодильной машины 12 попадает в теплоизолированный аккумулирующий резервуар (льдоаккумулятор) 19, где начинается процесс намораживания льда на трубах испарителя 13. Толщина льда контролируется датчиком толщины льда 8. При достижении необходимой толщины льда управляющий блок 24 останавливает холодильную машину 12. Молоко, проходя через бесконтактный счетчик 3 с помощью насоса 5 попадает в первую секцию 27 теплообменника для охлаждения молока 6, где предварительно охлаждается артезианской водой, которая поступает с помощью насоса 4 в первый контур теплообменника 6. На выходе из первой секции 27 теплообменника 6 получают воду 14–16 °С, которая попадает в рекуператор тепла 11. Во вторую секцию 28 теплообменника 6 попадает ледяная вода (0–2 °С) из теплоизолированного аккумулирующего резервуара 19 через выходной патрубок 20 с помощью водяного насоса 7.

В холодное время года включается насос 9 хладоносителя с низкой температурой замерзания с вентилятором 16 приёмника природного холода 23 и происходит охлаждение воды в теплоизолированном аккумулирующем резервуаре 19 за счёт протекания холодного экосола по гофрированным эластичным трубам 10, расположенным в резервуаре 19. Для повышения эффективности охлаждения воды и наморозки льда на поверхности гофрированных труб 10 установлен датчик толщины наморозки льда 14, обеспечивающий включение и выключение насоса хладоносителя 9, что создаёт условия для отделения слоя льда от поверхности гофрированных труб 10 и накапливание его в теплоизолированном резервуаре 19. Из теплоизолированного аккумулирующего резервуара 19 ледяная вода (0–2 °С) с помощью водяного насоса 7 через выходной патрубок 20 попадает во вторую секцию 28 теплообменника 6, где охлаждается молоко, после чего, через входной патрубок 21 возвращается в резервуар 19.

Для определения эффективности использования природного холода и экологически чистых хладоносителей с низкой температурой замерзания произведен расчет потребления электроэнергии технологическим оборудованием на первичную обработку молока по месяцам по выражению:

$$G = \sum_{i=1}^n (P_{\text{комп}} \cdot \chi_H \cdot K_{\text{вк}} + (P_{\text{пх}} \cdot K_{\text{впх}} + P_{\text{хл}} \cdot K_{\text{вхл}} + P_M \cdot K_{\text{вм}}) \cdot K_D) \cdot D_n$$

где n – количество месяцев;

$P_{\text{комп}}$ – потребляемая мощность компрессора источника искусственного холода, кВт;

χ_H – число часов «наморозки льда» для суточной дойки, ч;

$K_{\text{вк}}$ – коэффициент включения компрессора;

$P_{\text{пх}}$ – общая потребляемая мощность источника природного холода, кВт;

$K_{\text{впх}}$ – коэффициент включения оборудования источника природного холода;

$P_{\text{хл}}$ – потребляемая мощность насоса хладоносителя, кВт;

$K_{\text{вхл}}$ – коэффициент включения насоса хладоносителя;

P_M – потребляемая мощность насоса молока, кВт;
 $K_{ВМ}$ – коэффициент включения насоса молока;
 K_d – количество доек в сутки;
 D_n – количество дней в месяце.

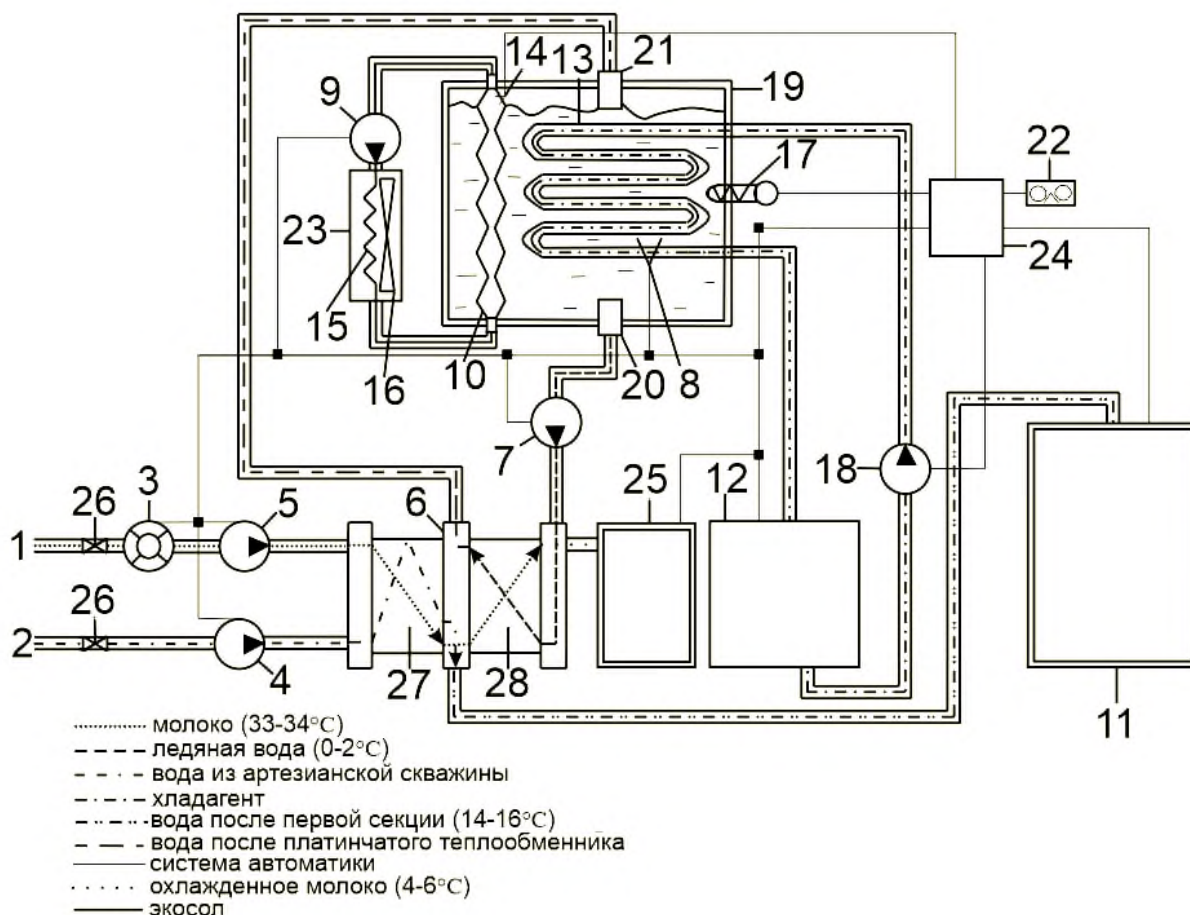


Рис. 2. Система с комплектом энергосберегающего оборудования для охлаждения молока:

1 – молокопровод; 2 – трубопровод для артезианской воды; 3 – бесконтактный счетчик молока; 4, 7 – насосы для холодной воды; 5 – насос для молока; 6 – теплообменник для охлаждения молока; 8, 14 – датчики толщины льда; 9 – насос для хладоносителя с низкой температурой замерзания (экосола); 10 – гофрированные трубы; 11 – рекуператор тепла; 12 – холодильная машина; 13 – испаритель; 15 – теплообменник для хладоносителя с низкой температурой замерзания; 16 – вентилятор; 17 – датчик температуры ледяной воды; 18 – насос для хладагента; 19 – теплоизолированный аккумулирующий резервуар; 20 – выходной патрубок; 21 – входной патрубок; 22 – датчик температуры наружного воздуха; 23 – приемник природного холода; 24 – управляющий блок; 25 – резервуар-термос для охлаждённого молока; 26 – вентили; 27, 28 – секции теплообменника.

Результаты исследований и их обсуждение. С учетом графика моделирования процесса охлаждения молока с использованием природного холода и хладоносителей с низкой температурой замерзания и среднемесячной температуры наружного воздуха для центрального

региона (СНиП 23-01-99) построены графики изменения затрат на электроэнергию в зависимости от среднегодовой температуры наружного воздуха (рис. 3), затрат на электроэнергию по месяцам для базового и нового варианта системы охлаждения молока (рис. 4).

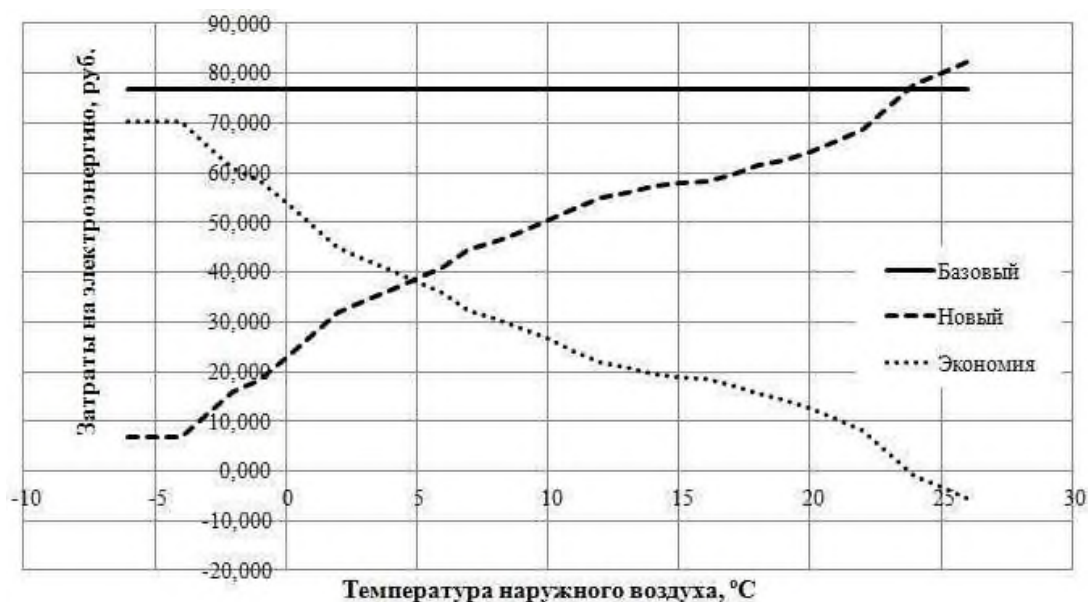


Рис. 3. График изменения затрат на электроэнергию в зависимости от среднегодовой температуры наружного воздуха

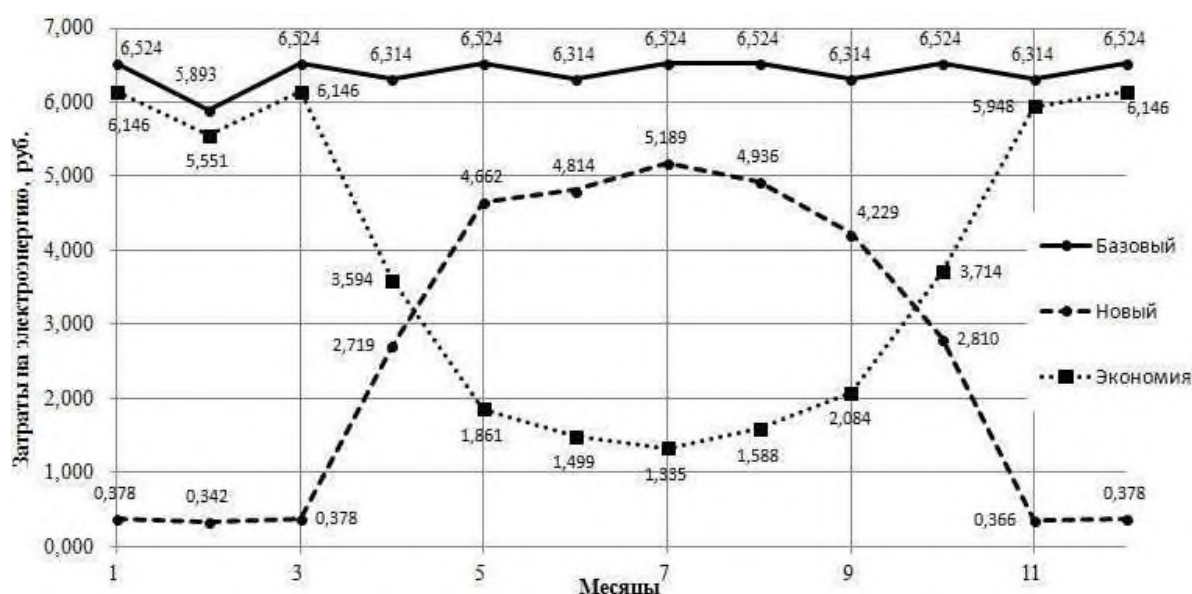


Рис. 4. График затрат на электроэнергию по месяцам

Выводы и перспективы. Применение системы с комплектом энергосберегающего оборудования для охлаждения молока с использованием природного холода и экологически чистых хладоносителей с низкой температурой заморозки позволяет повысить надежность, сохранить высокое качество молока и уменьшить эксплуатационные затраты. При этом расходы на электроэнергию уменьшаются в 1,5...3 раза в зависимости от региона, где устанавливается комплект.

Список литературы

1. Мишуров Н. П. Совершенствование инженерно-технического обеспечения молочных ферм на основе комплексной энергетической оценки / Мишуров Н. П. – М. : Росинформагротех, 2011. – 120 с.
2. Иванов Ю. А. Качество молока и эффективность его производства / Ю. А. Иванов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2012. – № 2. – С. 22–24.
3. Цой Ю. А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм / Ю. А. Цой – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 424 с.
4. Козловцев А. П. Обоснование и разработка энергосберегающей технологии охлаждения молока в замкнутом цикле системы "атмосфера – инженерное сооружение – водная среда" // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Оренбург, 2017.
5. Патент РФ № 2613454. Энергосберегающая установка для охлаждения молока с использованием искусственного и естественного холода и экологически безопасного хладоносителя с низкой температурой замерзания / Коршунов Б. П., Марьяхин Ф. Г., Учеваткин А. И., Коршунов А. Б. и др. ; Б.И. 2017, № 8.
6. Применение природного холода в АПК / [Коршунов Б. П., Марьяхин Ф. Г., Учеваткин А. И., Коршунов А. Б.]. – М. : ФГБНУ ВИЭСХ, 2015. – 168 с.

References

1. Mishurov, N. P. (2011). Sovershenstvovanie inzhenerno-tekhnicheskogo obespecheniya molochnyh ferm na osnove kompleksnoj energeticheskoy otsenki [Improvement of engineering and technical support of dairy farms on the basis of integrated energy assessment]. Moscow: Rosinformagrotekh, 120.
2. Ivanov, Yu. A. (2012). Kachestvo moloka i effektivnost' ego proizvodstva [The quality of milk and efficiency of its production]. Moscow: Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii, № 2, 22–24.
3. Coj, Yu. A. (2010). Protsessy i oborudovanie doil'no-molochnyh otdelenij zhivotnovodcheskih ferm [Processes and equipment of the milking of the dairy livestock farms offices]. Moscow: VIESH, 424.
4. Kozlovcev, A. P. (2017). Obosnovanie i razrabotka energosberegayushchej tekhnologii ohlazhdeniya moloka v zamknutom cikle sistemy "atmosfera – inzhenernoe sooruzhenie – vodnaya sreda". [Justification and development of energy-saving technology of milk cooling in the closed cycle of the system " atmosphere-engineering structure-water environment"]. Abstract of the thesis... Doctors of Engineering. Orenburg, 2017.
5. Patent N2613454 RF. (2017). Energosberegayushchaya ustanovka dlya ohlazhdeniya moloka s ispol'zovaniem iskusstvennogo i estestvennogo holoda i ekologicheski bezopasnogo hladonositelya s nizkoj temperaturoj zamerzaniya [Energy saving setting for cooling milk with the use of artificial and natural cold and environmentally safe coolant with a low freezing point]. Korshunov B. P., Mar'jakhin F. G., Uchevatkin A. I., Korshunov A. B. and others. Byull. N 8.
6. Korshunov, B. P., Maryahin, F. G., Uchevatkin, A. I., Korshunov, A. B. (2015). Primenenie prirodnogo holoda [The use of natural cold in the agro-industrial complex]. Moscow: VIESH, 168.

КОМПЛЕКТ ЭНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ОБЛАДНАННЯ ДО СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА НА ФЕРМАХ

**О. Б. Коршунов,
Б. П. Коршунов,
А. В. Иванов**

Анотація. Розробка енергозберігаючих технологій для охолодження молока – одна з найактуальніших проблем у молочному тваринництві. Одним із ефективних шляхів зниження витрат енергії та підвищення екологічної чистоти технологічного процесу виробництва молока на фермах є використання природного холоду та екологічно чистих холодоносіїв з низькою температурою замерзання. У зв'язку з цим, в ФНАЦ ВІМ проводять дослідження з розробки та впровадження комплексу енергозберігаючого обладнання до системи охолодження молока, що працює з використанням природного холоду та екологічно чистих холодоносіїв із низькою температурою замерзання.

Запропоновано технологічну схему й розраховано споживання електроенергії на первинну обробку молока по місяцях. Побудовано графіки зміни витрат на електроенергію залежно від середньорічної температури зовнішнього повітря. Застосування системи з комплектом енергозберігаючого обладнання для охолодження молока дає змогу підвищити надійність, зберегти високу якість молока і зменшити експлуатаційні витрати. При цьому витрати на електроенергію зменшуються в 1,5...3 рази залежно від регіону, де встановлюється комплект.

Ключові слова: охолодження, молоко, енергозбереження, природний холод, екологічно чистий, холодоносіїв з низькою температурою замерзання

SET ENERGY-SAVING EQUIPMENT TO THE SYSTEM COOLING MILK ON THE FARM

A. Korshunov,
B. Korshunov,
A. Ivanov

Abstract. Development of energy-saving technologies for milk cooling is one of the most urgent problems in dairy farming. One of the effective ways to reduce energy costs and improve the environmental purity of the technological process of milk production on farms is the use of natural cold and environmentally friendly coolants with low freezing point. In this regard, research is carried out in the FNAC VIM to develop and implement set energy-saving equipment to the milk cooling system, working with the use of natural cold and environmentally friendly coolants with low freezing point.

The technological scheme is offered and calculation of consumption of the electric power on primary processing of milk on months is made. Schedules of change of expenses for the electric power depending on average annual temperature of outside air are constructed. The use of a system with an energy-saving milk cooling module improves reliability, maintains high milk quality and reduces operating costs. The cost of electricity is reduced by 1.5...3 times depending on the region where the set is installed.

Keywords: cooling, milk, energy saving, natural cold, environmentally friendly, coolants with low freezing point

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ УБОРКИ УРОЖАЯ ЗЕМЛЯНИКИ САДОВОЙ

Р. А. ФИЛИППОВ, кандидат сельскохозяйственных наук

Д. О. ХОРТ, кандидат сельскохозяйственных наук

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Россия

E-mail: vim_sad@mail.ru

В. А. ШЕВКУН, кандидат сельскохозяйственных наук

ФГБНУ ВСТИСП, г. Москва, Россия

E-mail: vladimirshevkun@yandex.ru

Аннотация. *Земляника садовая является в России самой распространённой ягодной культурой. Однако затраты труда при её возделывании достигают 2000 чел·ч/га, среди которых на уборку ягод приходится до 60%. Перед инженерной садоводческой наукой стоят важнейшие задачи по созданию новых технических средств, применение которых в промышленных многолетних насаждениях приведёт к существенному снижению затрат труда, повысит производительность и привлекательность труда в садоводстве.*

В результате проведённых исследований получены данные об эффективности использования различных технических средств на операции сбора урожая ягод земляники.

Ключевые слова: *платформа, уборка урожая, земляника, сборщик*

Актуальность. Наиболее важными сферами научного поиска остаются совершенствование уже существующих технологий в промышленном садоводстве, где доминируют многолетние насаждения. Наиболее остро это касается уборочных процессов, уровень механизации которых остаётся по-прежнему крайне низким [1, 2].

Известно что, при любой технологии возделывания плодовых и ягодных культур наибольшая трудоёмкость приходится на операцию уборки урожая – до 60% от всех суммарных трудозатрат. Поэтому во многих крупных и средних садоводческих хозяйствах используют различные технические средства и платформы, призванные снизить степень утомления при сборе ягод и усовершенствовать операцию сбора ягод.

Еще одним достоинством данных технических средств является их невысокая стоимость и простота изготовления, что положительно влияет на ценообразование конечного продукта.

Анализ последних исследований и публикаций. Средства, облегчающие труд рабочих при сборе урожая земляники и других низкорастущих культур, применяются в ряде стран довольно давно. Ещё с начала 60-х годов прошлого века ведутся работы по рационализации

ручного труда, для чего были созданы различные приспособления – от самых простых до сложных самоходных платформ.

В каждый период времени, создаваемые технические средства решали актуальные для своего времени задачи, так как применялись как технические новинки. Этим подтверждается целесообразность разработок, проводимых в данном направлении. На современном этапе развития техники и технологий, возможно сконструировать и изготовить любую машину, включая самую сложную. Однако возникает вопрос о целесообразности и экономической обоснованности этой работы, которая должна оцениваться комплексным критерием «стоимость – эффективность» [3, 4].

Цель исследования – повысить производительность ручного сбора ягод земляники садовой, путём выявления оптимальной технологии процесса уборки урожая с применением технических средств.

Материалы и методы исследования. В работе использованы общепринятые методы математической обработки опытных данных. Для изучения эффективности трудового процесса сбора ягод и других параметров человеческой деятельности в процессе уборки ягод использовали метод наблюдения, хронометражные исследования, а также метод анкетирования.

Метод наблюдения заключается в регистрации внешних проявлений трудовой деятельности человека во время сбора ягод земляники при использовании технических средств. Наблюдение дополняется рядом объективных методов регистрации: фото-видеосъёмка рабочих движений, показаний приборов.

Обработка основных результатов экспериментов проводилась при помощи стандартных компьютерных программ.

При проведении экспериментов, определялась средняя урожайность растений земляники путем пересчёта ягод и их взвешивания на электронных торговых весах с точностью ± 1 г., учитывалось количество ягод на 1 погонном метре в различные периоды сбора. Производились замеры физиологического состояния сборщика – частоты сердцебиений (недопустимо превышение фактического значения в спокойном состоянии более чем на 28 ударов в 1 мин). Пульс измерялся автоматическим пульсометром Sigma PC-3.

Методы наблюдения и хронометража дополнялись беседами с операторами и анкетированием.

Хронометраж проводился для изучения процесса сбора с применением технических средств и без них, оценки тяжести трудового процесса путем подсчёта количества движений за определённый промежуток времени.

Естественный эксперимент проводится для анализа и регистрации параметров реальной деятельности оператора-сборщика при взаимодействии с различными техническими средствами, а также влияние на процесс сбора различных факторов.

Результаты исследования и их обсуждение. Ручной способ уборки урожая низкорастущих ягодников (например, земляники садовой)

закljučается в отделении от растения ягод, достигших стадии товарной спелости. Такой способ может быть эффективным при условии, что сбор ведут опытные, специально подготовленные сборщики. Они собирают спелые ягоды, выбраковывают гнилые и повреждённые ягоды.

Производительность ручного сбора напрямую зависит от такого фактора, как размер ягод и их масса. Из данных таблицы видно, что в начальный период (1–2 сборы) ягоды наиболее крупные и их количество меньше, но масса ягоды является доминирующим фактором и поэтому производительность рабочего возрастает.

Некоторые параметры сортов в период сбора

№	ПАРАМЕТР	СОРТ	
		Дукат	Зенга-Зенгана
1	средняя масса ягоды в начальный период сбора, г.	19,1	14,9
2	средняя масса ягод в середине сбора, г.	13,4	11,6
3	средняя масса ягод в конечный период сбора, г.	6,3	4,9
4	среднее количество ягод в начальный период, шт/ пог. м.	12,3	14,1
5	-- в середине сбора, шт/ пог. м.	34,6	41,2
6	-- в конечный период, шт/ пог. м.	28,4	35,6

Для повышения производительности ручного труда, уменьшения потерь времени на перенос порожней и наполняемой ягодами тары, а также снижения утомляемости, мы предлагаем использовать на сборе ягод земляники различные технические средства (рис.1), рационализирующие ручной труд [5, 6, 7].



а.

б.

Рис. 1. Сбор ягод земляники с использованием платформ:

а) одноместная платформа; б) двухместная платформа.

Во время испытаний технических средств для ручного сбора ягод земляники на промышленных плантациях был произведён учёт

собранного урожая. Это позволило определить зависимость производительности труда от различной урожайности в момент сбора.

На графике (рис. 2) видно изменение производительности от урожайности в зависимости от технического средства, на котором работал сборщик.

Анализируя данный график можно утверждать: самым производительным на сборе ягод является применение одностойной платформы, из-за того, что сборщик работает в привычном для него темпе и не подстраивается под других сборщиков.

Использование подставки для тары достаточно эффективно, так как исключается перенос тары по полю. Однако при урожайности более 30 ц/га производительность сбора, учитываемая по площади, снижается из-за того, что при большой урожайности уменьшается зона перемещения сборщика по полю.

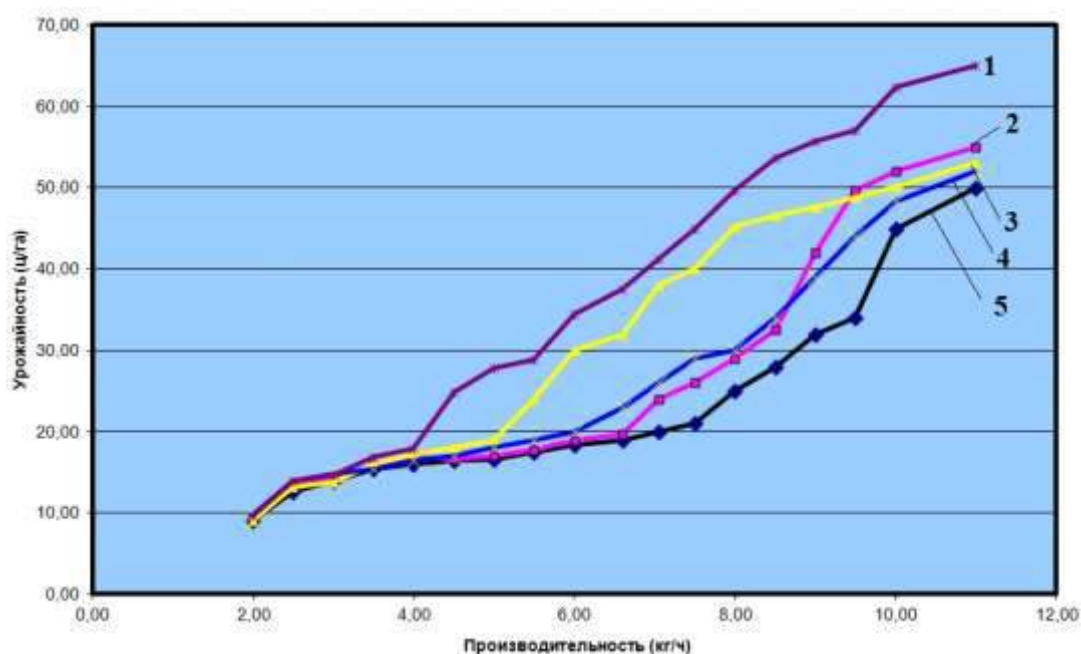


Рис. 2. Зависимость производительности уборки ягод от урожайности земляники при использовании разных технических средств:

1 – без использования технических средств; 2 – с использованием индивидуальной подставки; 3 – с использованием трёхместной платформы; 4 – с использованием двухместной платформы; 5 – с использованием одностойной платформы

Применение трёхместной платформы оправдывает себя при большой урожайности, так как сбор ведётся с шести рядков одновременно, и нет необходимости частого перемещения.

В результате хронометража трудового процесса уборки ягод на плантации, установлено, что производительность сборщиков в течение дня зависит от применяемого ими технического средства (рис. 3).

Согласно графику, при традиционном ручном сборе утром, достигаются хорошие показатели производительности. Однако к концу

смены они снижаются из-за тяжелых условий труда. Напротив, работа на одноместной платформе в течение дня показывает стабильный результат из-за того, что сборщик в положении сидя меньше утомляется, меньше тратит сил на передвижение, не перемещает тару, а основную часть времени занимается сбором.

При работе на платформе происходит снижение усталости по сравнению с ручным сбором по нескольким причинам.

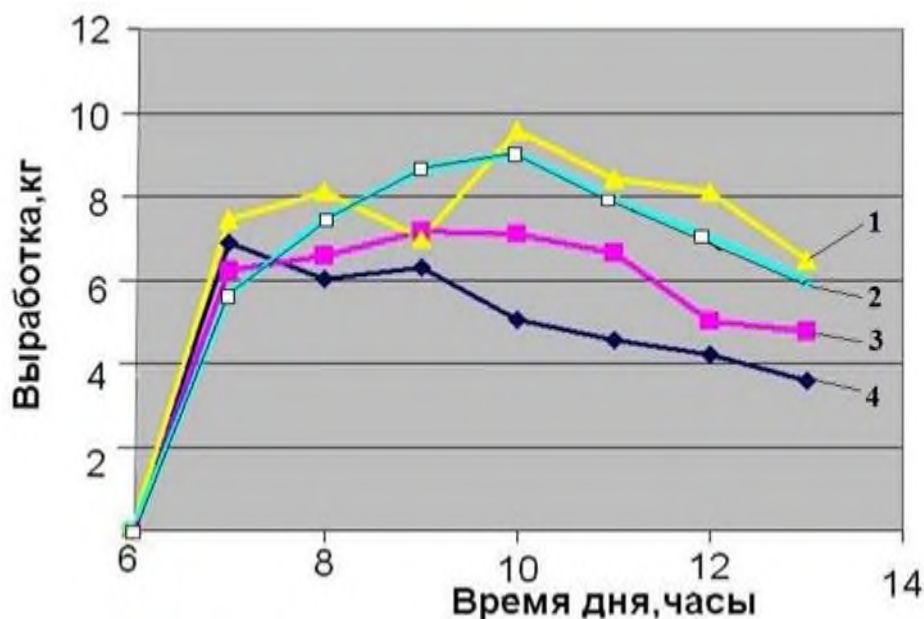


Рис. 3. Производительность сборщиков в течение дня:

- 1 – производительность при использовании одноместной платформы;
- 2 – производительность при использовании двухместной платформы;
- 3 – производительность при использовании подставки для тары;
- 4 – производительность без использования дополнительных средств

Сбор производится сидя поочерёдно с двух рядов, что вызывает необходимость совершать небольшие наклоны влево и вправо в пределах 10°, что по нормам охраны труда не оказывает негативного влияния на человека, более того, это способствует поочерёдному нагружению и разгрузке различных групп мышц. Не приходится носить заполненную ягодами тару и переносить каждую наполненную емкость на межквартальную полосу.

Выводы и перспективы. Качество выполнения технологического процесса уборки ягод за весь период испытаний было на уровне ручного сбора. Полнота сбора колебалась от 95,8% в сильно загущенных рядах с большим количеством сорняков, до 99,5% на участках с хорошей агротехникой содержания насаждений.

В результате применения технических средств, производительность сбора ягод земляники выросла в среднем на 29,2 %.

Анализ результатов выполненных нами исследований подтверждает актуальность дальнейшего совершенствования

конструкций мобильных технических средств путём оснащения их компактными и энергоэффективными электроприводами.

Список литературы

1. Филиппов Р. А. Технические средства в технологии ручной уборки ягод земляники : дис. ... канд. с-х. наук / Филиппов Р. А. – М., 2012. – 156 с.
2. Филиппов Р. А. Технические средства для совершенствования ручного сбора ягод земляники на промышленной плантации / Р. А. Филиппов, Ю. А. Утков // Садоводство и виноградарство. – 2010. – № 2. – С. 37–40.
3. Утков Ю. А. Современные тенденции создания технических средств, улучшающих условия труда в промышленном садоводстве России / Ю. А. Утков, Р. А. Филиппов // Вестник мичуринского государственного аграрного университета. – 2012. – № 3. – С. 31–37.
4. Смирнов И. Г. Нормативно-техническая база данных машин для современных технологий промышленного садоводства / И. Г. Смирнов, Д. О. Хорт, Р. А. Филиппов // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России : сб. докл. Междунар. науч.- техн. конф. Ч.1. – М. : ВИМ, 2013. – С. 202–205.
5. Филиппов Р. А. Развитие технических средств для сбора ягод земляники / Р. А. Филиппов, Д. О. Хорт // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 111, ч. 1. – С. 58– 61.
6. Пат. 2523500 РФ. Платформа для ручной уборки ягод земляники и других низкорастущих культур / Филиппов Р. А., Утков Ю. А., Хорт Д. О., Смирнов И. Г. ; Бюл. № 20. – 2014.
7. Пат. 2415550 РФ. Платформа для ручной уборки урожая, посадки и ухода за низкорастущими культурами / Чухляев И. И., Утков Ю. А., Цымбал А. А., Бычков В. В., Филиппов Р. А. ; Бюл. №10. – 2011.

References

1. Filippov, R. A. (2012). Tekhnicheskie sredstva v tekhnologii ruchnoj uborki yagod zemlyaniki. [Technical means in technology of hand-picking strawberries]. Dis... k. s-h. nauk. – Moskow, 156.
2. Filippov, P. A., Utkov, Yu. A. (2010). Tekhnicheskie sredstva dlya sovershenstvovaniya ruchnogo sbora yagod zemlyaniki na promyshlennoj plantacii [Technical means to improve the hand-picking of strawberries on industrial plantations]. Sadovodstvo i vinogradarstvo, 2, 37–40.
3. Utkov, Yu. A., Filippov, R. A. (2012). Sovremennye tendencii sozdaniya tekhnicheskikh sredstv, uluchshayushchih usloviya truda v promyshlennom sadovodstve Rossii [Modern tendencies of creation of technical means to improve working conditions in the industrial horticulture of Russia]. Vestnik michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 3, 31–37.
4. Smirnov, I. G., Hort, D. O., Filippov, R. A. (2013). Normativno-tekhnicheskaya baza dannyh mashin dlya sovremennyh tekhnologij promyshlennogo sadovodstva [Normative and technical database of machines for modern technologies of industrial gardening] // Sistema tekhnologij i mashin dlya innovacionnogo razvitiya APK Rossii: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.- tekhn. konf. CH.1. Moskow: VIM, 202–205.
5. Filippov R. A., Hort D. O. (2013). Razvitie tekhnicheskikh sredstv dlya sbora yagod zemlyaniki [Development of technical means for hand-picking strawberries] Trudy GOSNITI, 111 (1), 58–61.

6. Pat. 2523500 RF. Platforma dlya ruchnoj uborki yagod zemlyaniki i drugih nizkorastushchih kul'tur [Platform for hand-harvesting of strawberries and other low-growing crops] R. A. Filippov, Yu. A. Utkov, D. O. Hort, I. G. Smimov. Byul. № 20. – 2014.

7. Pat. 2415550 RF. Platforma dlya ruchnoj uborki urozhaya, posadki i uhoda za nizkorastushchimi kul'turami [Platform for hand-harvest, planting and caring for low-growing crops] Chuhlyayev I. I., Utkov Yu. A., Cymbal A. A., Bychkov V. V., Filippov R. A. Byul. № 10. – 2011.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗБИРАННЯ ВРОЖАЮ СУНИЦІ САДОВОЇ

**Р. О. Філіппов,
Д. О. Хорт,
В. А. Шевкун**

Анотація. Суниця садова є в Росії найпоширенішою ягідною культурою. Однак затрати праці при її вирощуванні досягають 2000 люд·год/га, серед яких на збирання ягід припадає до 60 %. Перед інженерною садівничою наукою стоять найважливіші завдання зі створення нових технічних засобів, застосування яких у промислових багаторічних насадженнях призведе до істотного зниження затрат праці, підвищить продуктивність і привабливість праці в садівництві.

У результаті проведених досліджень отримано дані про ефективність використання різних технічних засобів на операції збору врожаю ягід суниці.

Ключові слова: платформа, збирання врожаю, суниця, складальник

APPLICATION OF TECHNICAL MEANS FOR HARVESTING STRAWBERRIES

**R. Filippov,
D. Khort,
V. Shevkun**

Abstract. Strawberries are the most common berry crop in Russia. However, the cost of labor in its cultivation 2,000 people-hour/ha, including cleaning the berries have up to 60%. Engineering horticultural science faces the most important tasks of creating new technical means, the use of which in industrial perennial plants will lead to a significant reduction in labor costs, increase productivity and attractiveness of labor in horticulture.

The result of the research obtained data about the effectiveness of different technical means for the operations of harvest of strawberries.

Keywords: platform, harvesting, strawberries, harvester

СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТА ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ КАБЕЛЬНИХ І ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 6-35 кВ

М. В. ГРЕБЧЕНКО, доктор технічних наук, професор
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

E-mail: grebchenko@nubip.edu.ua

О. В. КОЖУХАР, керівник департаменту з оперативного керування
ПАТ «ДТЕК Дніпрообленерго»

E-mail: KozhukharAV@dtek.com

Анотація. *Розвиток розподіленої генерації, у тому числі вітроенергетики, вимагає підвищення надійності роботи кабельних ліній напругою до 35 кВ, які використовуються для концентрації електричної енергії від окремих генераторів. У місцях впровадження вітростанцій продовжується експлуатація сільських повітряних ліній того самого класу напруги. Своєчасне визначення виникнення дефектів ізоляції ліній електропередачі дасть змогу усунути причини виникнення коротких замикань та аварійних відключень.*

Мета дослідження – розробка мікропроцесорного приладу діагностики стану ізоляції та захисту від замикань на землю ліній електропередачі. Принцип роботи приладу засновується на контролюванні значень струмів нульової послідовності за допомогою кабельних трансформаторів струму нульової послідовності. Для забезпечення високої чутливості до малих значень струмів, які виникають у разі появи дефектів ізоляції, запропоновано у трансформаторах струму використовувати додаткову магніторушійну силу з частотою, яка відрізняється від промислової. Завдяки цьому, робоча точка переходить на ділянку характеристики з більшим кутом.

Запропоновано схему приладу, основу якого становить промисловий мікропроцесорний захист. Прилад пройшов лабораторні та промислові випробування й рекомендований до впровадження.

Ключові слова: *лінія електропередачі, дефекти ізоляції, діагностування*

Актуальність. Одним із перспективних напрямів розвитку генерації електричної енергії, завдяки своїм перевагам, є вітроенергетика. Але на цьому шляху є низка задач, які необхідно розв'язати. Концентрація електричної енергії від окремих генераторів виконується за рахунок кабельних ліній напругою 35 кВ. Сучасні кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену мають значний позитивний досвід експлуатації, але через використання кабельних муфт та впливу перенапруг на цих лініях можливі однофазні замикання на землю. У багатьох випадках замиканню можна

запобігти за рахунок своєчасного визначення погіршення стану ізоляції на підставі неперервного діагностування. Відомі методи контролю ізоляції, що засновані на вимірюванні напруги нульової послідовності, не виявляють на ранній стадії дефекти ізоляції та не забезпечують селективність дії [1].

Сільські електричні мережі відрізняються від мереж промислових районів більшою довжиною ліній та меншим електричним навантаженням. У багатьох випадках напруга цих ліній не перевищує 110 кВ, а самі лінії виконуються повітряними. До 30% від загальної кількості пошкоджень сільських ліній пов'язані з погіршенням стану ізоляції. На сьогодні методи контролю стану ізоляції цих ліній у робочому режимі не є досконалими й не доведені до широкого використання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для визначення замикань на землю найдосконалішими є методи контролю струмів нульової послідовності на кожному приєднанні [1]. Підвищенню чутливості таких захистів сприяє використання сучасних кабельних трансформаторів струму нульової послідовності (ТСНП) у яких осердя виконано з нанокристалічного стопу, наприклад, типу ТЗЛУ-70 [2].

Основу розподіленої генерації сільських районів найближчим часом можуть становити вітрогенератори потужністю 3 МВт та більше. Нині потужність одного вітрогенератора, що найбільш використовуваний в Україні, становить 3 МВт. Передачу енергії від генераторів потрібно виконувати за допомогою кабельних ліній, що необхідно для забезпечення раціонального використання сільськогосподарських земель. Розвиток вітростанцій приводить до збільшення сумарної довжини кабельних ліній, а тому й до потреби у створенні системи своєчасного визначення можливих дефектів ізоляції на початковій стадії їх розвитку.

Більш висока технічна досконалість мікропроцесорних захистів та використання в них значень параметрів режиму у цифровому вигляді, як і використання сучасних ТСНП, сприяють підвищенню чутливості захистів від замикання на землю. Але досягнутий на сьогодні рівень чутливості не дає змоги виконувати неперервну оцінку стану ізоляції ліній електропередач.

Мета дослідження – розробка на основі мікропроцесорних захистів приладу діагностики стану ізоляції та захисту від замикань на землю ліній електропередачі.

Матеріали і методи дослідження. У разі симетричного навантаження лінії електропередачі та симетричній системі векторів фаз напруги живлення, струм нульової послідовності лінії $3\dot{I}_0$ з дефектом ізоляції дорівнює сумі векторів струмів, що проходять крізь ізоляцію фаз [3]:

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_{Ai} + \dot{I}_{Bi} + \dot{I}_{Ci} \quad (1)$$

Якщо у разі виникнення дефекту ізоляції з активним опором R_D в (1) не враховувати активну провідність ізоляції фаз, а ємнісні провідності фаз прийняти такими, що дорівнюють одна одній $\omega C_A = \omega C_B = \omega C_C = \omega C$, то струм приєднання з дефектом R_D [4]:

$$3\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_A}{R_D} + j3\omega C\dot{U}_0 \quad (2)$$

де $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{U}_0$ з урахуванням вищеприйнятих припущень про симетричність напруги живлення та навантаження лінії, тобто сума векторів напруг фаз відносно землі дорівнює напрузі нульової послідовності.

Аналіз свідчить, що у формулі (2) припустимо прийняти $U_A = U_\phi$, якщо $R_D \geq 20$ кОм та сумарна ємність фази всієї мережі $C_\Sigma \geq 1$ мкФ. Якщо значення R_D и C_Σ менше, ніж зазначено, похибка розрахунку за формулою (2) стає помітною і, залежно від конкретних параметрів, може перевищувати 5%.

З (2) амплітуда вектора струму нульової послідовності лінії з дефектом ізоляції:

$$3I_0 = \sqrt{\left(\frac{U_\phi}{R_D}\right)^2 + \omega^2 C^2 U_0^2} \quad (3)$$

З урахуванням прийнятих обмежень сумарної ємності та опору дефекту, а також подібно до того, як відповідно до методу двох вузлів в [5] отримано напругу нульової послідовності [4]:

$$\dot{U}_0 = -U_\phi \frac{1}{1 + j3\omega C_\Sigma R_D} \quad (4)$$

де C_Σ – сумарна ємність фази всієї електрично зв'язаної мережі.

Якщо підставити (4) в (3), отримаємо

$$3I_0 = \frac{U_\phi}{R_D} \sqrt{1 + \left(\frac{C}{C_\Sigma}\right)^2} \quad (5)$$

Формула (5) дає можливість визначити залежність значення струму нульової послідовності від значення опору дефекту ізоляції R_D . На рис. 1 наведено результати визначення струму нульової послідовності у разі виникнення дефекту ізоляції на лінії напругою 35 кВ (крива 1), якщо її довжина у 10 разів менша від загальної довжини ліній мережі, крива 2 – теж для лінії 10 кВ. Це характерні залежності, оскільки зміна співвідношення ємностей у реальних межах в (4) незначно впливає на струм нульової послідовності.

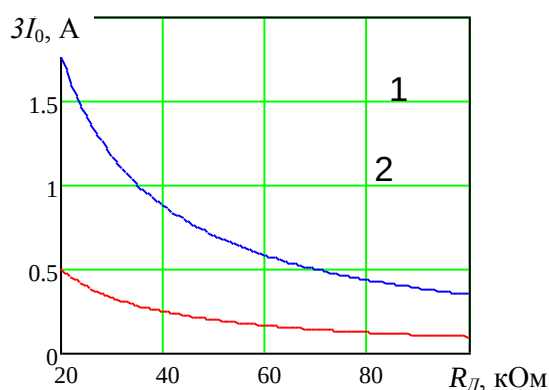


Рис. 1. Залежність значення струму нульової послідовності від значення опору дефекту ізоляції R_D

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз результатів (рис.1) свідчить, що дефекти ізоляції з великим опором супроводжуються виникненням відносно невеликих струмів нульової послідовності.

Для захисту лінії (кабельної або повітряної) використовується мікропроцесорний комплект АК (рис. 2), наприклад, із серії МРЗС, до складу якого входить ступеневий струмовий захист від міжфазних коротких замикань і максимальний струмовий захист (МСЗ) нульової послідовності від замикань на землю (на повітряній лінії встановлюється кабельна вставка).

Для забезпечення необхідної чутливості до малих струмів, що виникають у разі дефектів ізоляції, запропоновано в осерді кабельного трансформатора струму нульової послідовності створювати додаткову магніторушійну силу (м.р.с.), частота якої відрізняється від промислової частоти [6].

Для цього використовується генератор струму G (рис. 2), вихід якого підключається до додаткової обмотки ТСНП. За відсутності такої обмотки, наприклад, у разі використання ТСНП типу ТЗР, ТЗЛ, ТЗЛМ додаткова обмотка намотується на ТСНП. Додаткова м.р.с. переміщує робочу точку ТСНП на більш круту ділянку характеристики намагнічування. Це приводить до збільшення вторинного струму по відношенню до зростання вторинного струму у разі відсутності додаткової м.р.с. [7]. У зв'язку з тим, що додаткова м.р.с. також індукує електрорушійну силу у вторинну обмотку, це враховується у визначенні необхідної уставки. Алгоритм роботи системи наведено на рис. 3.

Система ВЗД на основі мікропроцесорного комплексу АК (рис. 2) постійно знаходиться в режимі діагностування, тобто за рахунок того, що частота додаткової м.р.с. менша за промислову, м.р.с. обертається по відношенню до векторів м.р.с., які створені струмами крізь ізоляцію фаз.

У разі виникнення дефекту ізоляції, що призводить до перевищення струмом допустимого значення $I_{\text{доп1}}$, спрацьовує максимальний струмовий захист (МСЗ) й подається сигнал «Дефект ізоляції», а також контактом $KL1.2$ вмикається додатковий струм $I_{\text{дод}}$ (рис. 2, рис. 3). Якщо виникло замикання на землю, то після відключення $I_{\text{дод}}$ захист МСЗ залишається у спрацьованому стані, а тому спрацьовує $KL2$.

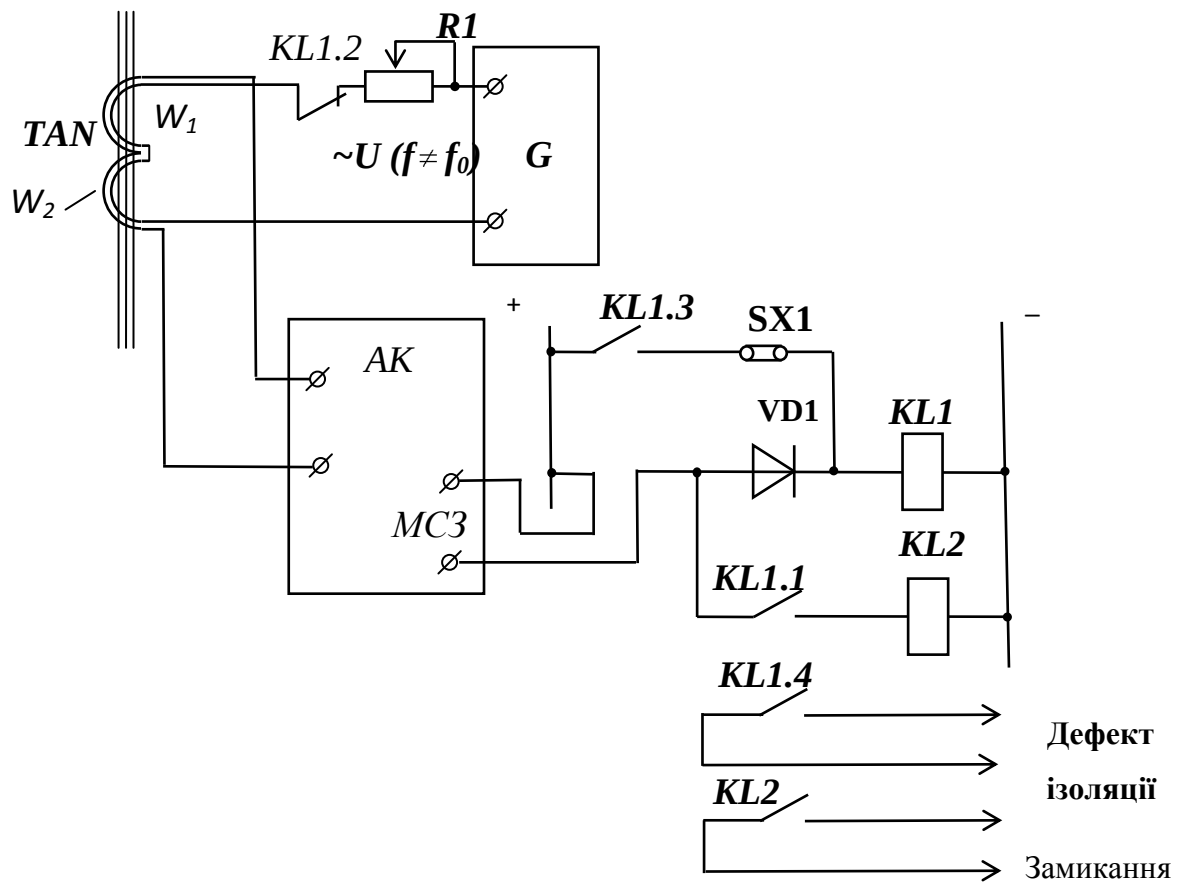


Рис. 2. Схема мікропроцесорної системи визначення замикань на землю та діагностування ліній електропередач (ВЗД)

Система з використанням статичного реле струму РТЗ-51 пройшла лабораторні та промислові випробування, які підтвердили її ефективну роботу [7].

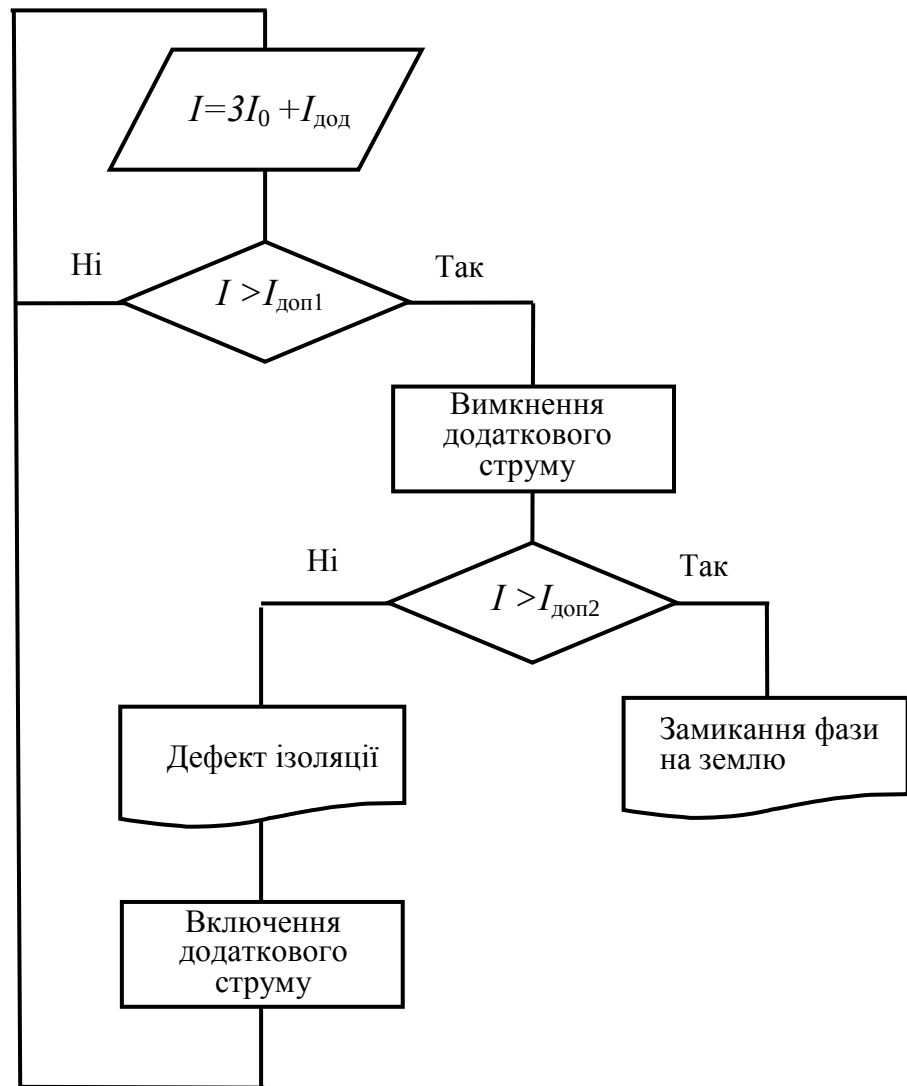


Рис. 3. Алгоритм роботи системи від замикань та діагностування ВЗД

Висновки і перспективи. Запропоновано мікропроцесорну систему визначення замикань фази на землю й дефектів ізоляції у робочих режимах кабельних та повітряних (з кабельною вставкою для трансформатора нульової послідовності) ліній електропередач, принцип дії якої заснований на контролі струмів нульової послідовності.

У запропонованій системі підвищення чутливості по відношенню до відомих захистів забезпечується завдяки використанню у кабельному трансформаторі струму нульової послідовності додаткової магніторушійної сили, частота якої відрізняється від промислової частоти.

Список літератури

1. Чернобровов Н. В. Релейная защита / Н. В. Чернобровов. – М. : Энергия, 1974. – 624 с.
2. БИОНТОП [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://beontop.com.ua/produksiya/item/49-transformator-toka-tzlu-70.html>

3. Гребченко М. В. Теоретичні основи побудови захисно-діагностуючої автоматики вузлів електричних систем з двигунами. Частина 2. Функції оперативного діагностування ізоляції електрообладнання / М. В. Гребченко // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк : ДонНТУ, 2002. – Вип. 50. – С. 53–61.

4. Гребченко Н. В. Определение места возникновения локальных дефектов изоляции в рабочих режимах узла сети с изолированной нейтралью / А. А. Сидоренко // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. – 2006. – С. 17–19.

5. Электрическая часть станций и подстанций / [А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшкова, М. Н. Околович] ; под ред. А. А. Васильева. – М. : Энергия, 1980. – 608 с.

6. Пристрій автоматичного контролю ізоляції електричної мережі змінного струму. Патент України Україна. МПК G01N 27/00, G01R31/00. / Гребченко М. В. – № 34689 ; заявл. 16.02.1999 ; опубл. 17.02.2003, Бюл. № 2.

7. Гребченко Н. В. Чувствительная диагностирующая защита от замыканий на землю / Н. В. Гребченко, В. А. Деметьев, В. П. Ерофеев, К. Н. Вознюк // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. Донецьк : ДонНТУ. – 2004. – Вип. 79. – С. 55–62.

References

1. Chernobrovov, N. V. (1974). Releynaya zashchita [Relay protection]. Moscow: Energiya, 624.

2. BIONTOP. Available at: <http://beontop.com.ua/produksiya/item/49-transformator-toka-tzlu-70.html>.

3. Grebchenko, N. V. (2002). Teoretychni osnovy pobudovy zahysno-dagnostychnoi avtomatyky vuzliv elektrychnykh system z dvygunamy. Chastyna 2. Funktsii operatyvnogo diagnostuvannia izoliatsii elektroobladnannia. [Theoretical basis for the construction of protective and diagnostic automation of nodes of electric systems with engines. Part 2. Functions of operational diagnostics of isolation of electrical equipment]. Zbirnyk naukovykh prats' Donets'kogo natsional'nogo tehniknogo universitetu. // Elektrotehnika i energetyka. Donetsk: DonNTU, 50, 53–61.

4. Grebchenko, N. V., Sidorenko, A. A. (2006). Opredeleniie mesta vznikhoveniia lokal'nykh defektov izoliatsii v rabochikh rezhimakh uzla seti s izolirovannoy neytral'yu [Determination of the location of local insulation faults in operating conditions of a network node with an isolated neutral] Technichna elektrodinamika. Tem. Vipusk. Kyiv, 17–19.

5. Vasil'ev, A. A., Kryuchkov, I. P., Nayashkova, E. F., Okolovich, M. N. (1980). [Electrical part of stations and substations]. Moscow, Russia: Energiya, 608.

6. Grebchenko, N. V. (2003). Device for automatic control of insulation of the electric network of alternating current. G01N 27/00, G01R31/00. № 34689 UA; declared 16.02.1999; published 17.02.2003, № 2.

7. Grebchenko, N. V., Dement'ev, V. A., Erofeev, V. P., Voznyuk, K. N. (2004). Chuvstvitel'naya diagnostiruyushchaya zashchita ot zamykaniy na zemlyu [Sensitive ground fault protection]. Zbirnyk naukovykh prats' Donets'kogo natsional'nogo tehniknogo universitetu. Elektrotehnika i energetyka. Donetsk: DonNTU, 79, 55–62.

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ КАБЕЛЬНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 6-35 КВ

**Н. В. Гребченко,
А. В. Кожухарь**

Аннотация. Развитие распределенной генерации, в том числе ветроэнергетики, требует повышения надежности работы кабельных линий напряжением до 35 кВ, которые используются для концентрации электрической энергии от отдельных генераторов. В местах строительства ветростанций продолжается эксплуатация сельских воздушных линий того же класса напряжения. Своевременное выявление возникновения дефектов изоляции линий электропередачи позволит устранить причины возникновения коротких замыканий и аварийных отключений.

Цель исследования – разработка микропроцессорного устройства диагностики состояния изоляции и защиты от однофазных замыканий на землю линий электропередачи. Принцип работы устройства основывается на контроле значений токов нулевой последовательности с помощью кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности. Для обеспечения высокой чувствительности к малым значениям токов, возникающим при появлении дефектов изоляции, предложено в трансформаторах тока использовать дополнительную магнитодвижущую силу с частотой, которая отличается от промышленной. Благодаря этому, рабочая точка переходит на более крутой участок характеристики.

Предложена схема устройства, основой которого является промышленная микропроцессорная защита. Устройство прошло лабораторные и промышленные испытания и рекомендовано к внедрению.

Ключевые слова: линия электропередачи, дефекты изоляции, диагностика

SYSTEM FOR DIAGNOSTICS AND PROTECTION AGAINST EARTH FAULTS OF CABLE AND OVERHEAD LINES 6-35 KV

**N. Grebchenko,
A. Kozhukhar**

Abstract. The development of distributed generation, including wind power, requires an increase in the reliability of the operation of cable lines with a voltage of up to 35 kV, which are used to concentrate electrical energy from individual generators. In the construction of wind farms continues to operate rural air lines of the same voltage class. Timely detection of the occurrence of defects in the insulation of power lines will eliminate the causes of short circuits and emergency shutdowns.

The aim of the work is the development of a microprocessor device for diagnosing the state of insulation and protection against single-phase earth faults of transmission lines. The principle of operation of the device is based on monitoring the values of the zero sequence currents with the help of cable zero-sequence current transformers. To provide high sensitivity to low values of currents that arise when insulation defects appear, it is proposed to use additional magnetomotive force in current transformers with a frequency that differs from the industrial one. Due to this, the operating point passes to the steeper section of the characteristic.

The scheme of the device based on industrial microprocessor protection is proposed. The device passed laboratory and industrial tests and is recommended for implementation.

Keywords: *power line, insulation defects, diagnostics*

УДК 536.24

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ОРЕБРЕННЯ В УМОВАХ ПРИРОДНОЇ КОНВЕКЦІЇ

В. Г. ГОРОБЕЦЬ, доктор технічних наук, доцент
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: gorobetsv@ukr.net

Анотація. Метою дослідження було проведення порівняльного аналізу тепловіддачі вертикальних поверхонь з оребрением різного типу за умов вільної конвекції.

Проведено порівняльний аналіз теплообміну неперервного вертикального, дискретного вертикального і похилого оребрения за умов вільної конвекції. Показано, що використання дискретного оребрения суттєво інтенсифікує процеси теплообміну на вертикальних поверхнях.

Порівняння дискретного вертикального і похилого оребрения свідчить про перевагу першого типу оребрения для поверхонь з малими вертикальними розмірами і погіршення умов тепловіддачі порівняно з другим типом оребрения для поверхонь великої протяжності.

Ключові слова: *вертикальна поверхня з оребрением, вільна конвекція, теплообмін, тепловий потік, ефективність ребра*

Актуальність. Вертикальні поверхні з різними типами оребрения в умовах природної конвекції набули широкого застосування в різних областях при розробці теплообмінного обладнання. Такі поверхні використовують для охолодження електронного та комп'ютерного обладнання, в опалювальних приладах, в теплообмінниках для охолодження трансформаторів тощо. При цьому важливими факторами є розміри та маса таких пристроїв, яка значною

мірою залежить від типу та геометрії ребрення, що в ньому використовується.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найбільш поширеним і дослідженим є плоскопаралельне неперервне ребрення [15]. Разом з тим, такий тип ребрення має погіршені характеристики тепловіддачі для поверхонь з великими вертикальними розмірами внаслідок прогріву охолоджуючого теплоносія у верхній частині ребрення. З метою підвищення теплової ефективності теплообмінних поверхонь було запропоновано дискретне ребрення, геометрія якого передбачає використання ребер невеликих розмірів, розташованих в шаховому порядку [6–7].

Мета дослідження – провести порівняльний аналіз тепловіддачі вертикальних поверхонь з ребренням різного типу за умов вільної конвекції.

Матеріали і методи дослідження. Розглянемо вертикальну поверхню з ребренням трьох типів, теплообмін яких відбувається при вільній конвекції. А саме, на рис. 1 представлена геометрія вертикального плоскопаралельного ребрення з ребрами великої довжини (рис. 1а), дискретного ребрення малої довжини із шаховим розташуванням ребер (рис. 1б) та вертикальна поверхня з ребрами малої довжини, які мають нахил під певним кутом і геометрія розташування у вигляді «ялинки» (рис. 1в).

У праці [7] було проведено чисельне моделювання та експериментальне дослідження таких поверхонь, де було вивчено умови гідродинамічної течії зовнішнього теплоносія для кожного з видів ребрення.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати проведених досліджень свідчать, що для плоскопаралельного ребрення на нижніх ділянках на поверхні ребер формується пограничний шар (ПШ) (область I на рис. 2а). З ростом товщини ПШ відбувається їх змикання для сусідніх ребер і в міжреберному просторі формується перехідний тип течії (область II на рис. 2а). Після перехідної області течії у верхній частині ребреної поверхні розподіл швидкостей в міжреберному просторі має параболічний характер (область III на рис. 2а). Аналіз процесів теплопереносу в цих областях свідчить, що найбільші значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі мають місце в області I і суттєво зменшуються в області III. Суттєвим фактором, який погіршує тепловіддачу в області III є нагрівання холодного теплоносія, що зменшує температурний напір між стінкою ребра і теплоносієм і знижує тепловіддачу ребреної поверхні.

Використання дискретних ребер, що мають малу довжину і дає змогу формувати ПШ на кожному окремому ребрі з подальшим його зривом та створенням після нього супутної течії, що натікає на сусіднє ребро, яке розташоване вище по вертикалі (див. рис. 2б). Така геометрія побудови дискретних ребер зі шаховим розташуванням дає можливість формувати на кожному окремо взятому ребрі ПШ малої протяжності, що підвищує як локальні коефіцієнти тепловіддачі на ребрах, так і сумарний коефіцієнт тепловіддачі на всій поверхні. Чисельне моделювання та експериментальне дослідження процесів теплопереносу для неперервного і дискретного ребрення підтверджують результати цього аналізу. На рис. 3 показано порівняння усереднених по поверхні чисел Нусельта $Nu_s = \alpha s / \lambda$ (α – коефіцієнт

тепловіддачі, s – міждреберна відстань, λ – коефіцієнт теплопровідності зовнішнього теплоносія) за різних значень параметра $Ra_s s/L$ ($Ra_s = g\beta\Delta T/\nu^2$ число Релея, g – гравітаційна постійна, β – коефіцієнт об'ємного розширення теплоносія, ΔT – температурний напір між ребром і теплоносієм, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості) для неперервного плоскопаралельного і дискретного шахового оребрення. Як впливає з рис. 3, максимальна інтенсифікація теплообміну, яка досягається за рахунок дискретизації оребрення, становить 30-250%.

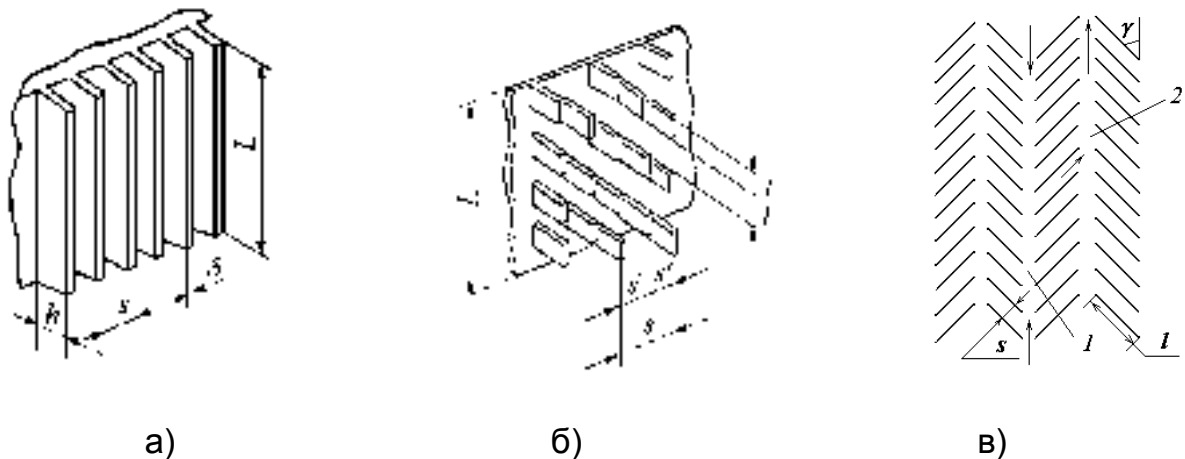


Рис. 1. Вертикальні поверхні з різними типами оребрення:

а) плоскопаралельне оребрення; б) дискретне оребрення зі шаховим розташуванням; в) похиле оребрення з розташуванням типу «ялинка»

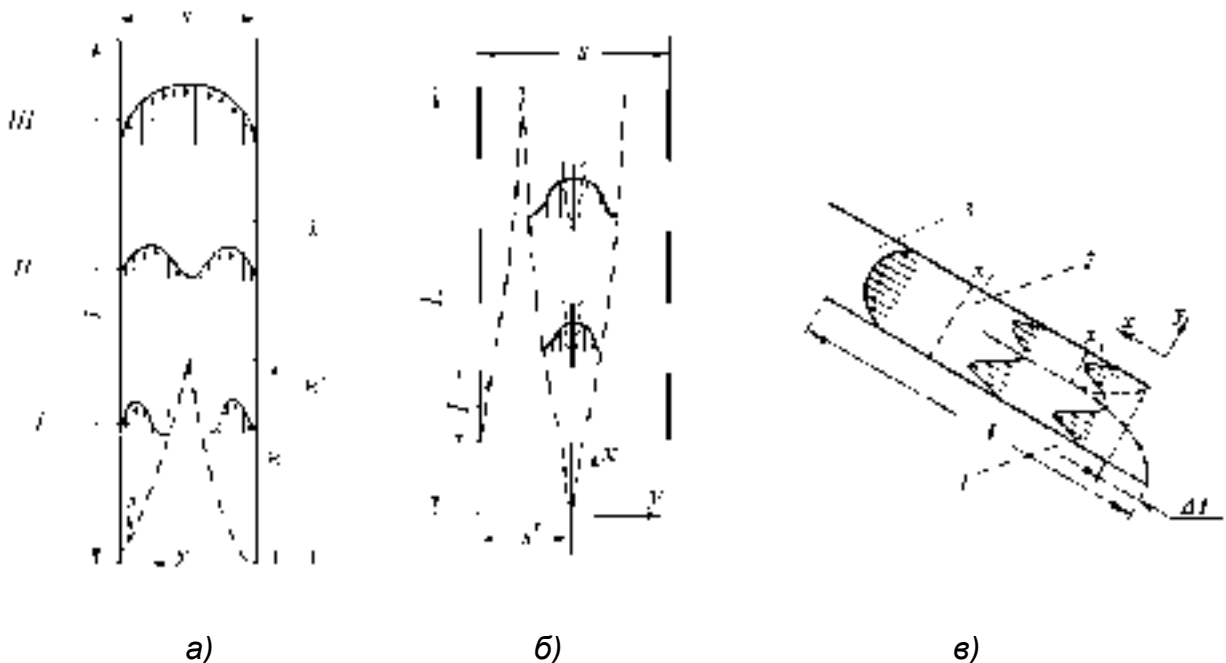


Рис. 2. Умови формування гідродинамічної течії для різних типів оребрення:

а) плоскопаралельне оребрення; б) дискретне оребрення зі шаховим розташуванням; в) похиле оребрення з розташуванням типу «ялинка»

Аналіз локальних розподілів коефіцієнта тепловіддачі по поверхні з дискретним шаховим оребренням свідчить, що максимальні значення коефіцієнтів тепловіддачі спостерігаються в нижній частині оребреної поверхні і суттєво падають у верхній її частині у міру зростання вертикальних розмірів частини поверхні, що знижує температурний напір між оребреною поверхнею і теплоносієм та призводить до зменшення коефіцієнтів тепловіддачі в цих областях.

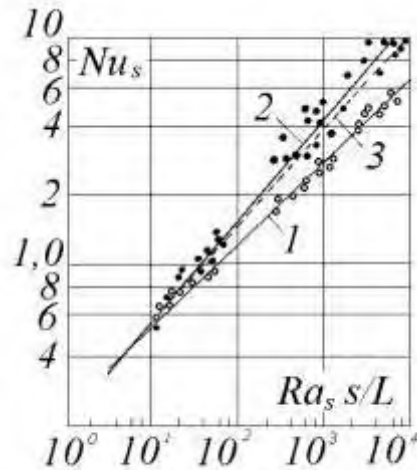


Рис. 3. Залежність чисел Нуссельта для плоскопаралельного неперервного і дискретного шахового оребрення:

1 – експериментальні дані для плоскопаралельного оребрення [5];
2 – експериментальні дані для дискретного оребрення [7]; 3 – результати чисельного моделювання для дискретного оребрення [8]

З метою усунення зазначеного недоліку в праці [8] запропоновано геометрію оребрення, яку подано на рис. 1в. Аналіз гідродинамічної картини течії для поверхні з дискретним оребренням, що має кут нахилу γ і має геометрію типу «ялинки» свідчить, що в області між сусідніми ребрами формується ПШ, який може змикатися у міру зростання його товщини (див. рис. 2в). При цьому відбувається підтікання холодного теплоносія з областей 1, що знаходяться між сусідніми вертикальними рядами ребер і витікання нагрітого теплоносія по каналах 2. Таким чином, ребра у верхній і нижній частині оребреної поверхні знаходяться в однакових умовах за максимальної величини температурного напору між оребреною поверхнею і зовнішнім теплоносієм.

На рис. 4 наведено порівняння величини сумарного теплового потоку Q_i , відведеного від поверхонь з дискретним шаховим і дискретним нахиленим оребренням за різних значень параметра s/L , який характеризує геометричні розміри оребреної поверхні. Графічні залежності представлені в безрозмірному вигляді Q_i/Q_1 , де Q_1 сумарний тепловий потік відведений від поверхні з неперервним плоскопаралельним оребренням. Аналіз отриманих залежностей свідчить, що використання дискретного оребрення зі шаховим розташуванням підвищує теплову ефективність поверхні в 1,3–2,6 раза

порівняно з неперервним оребренням, однак для поверхонь з великими вертикальними розмірами L їх ефективність падає. Водночас, поверхні з дискретним похилим оребренням більш ефективні для поверхонь, що мають великі значення L , для яких тепловіддача підвищується в 1,6–1,8 раза.

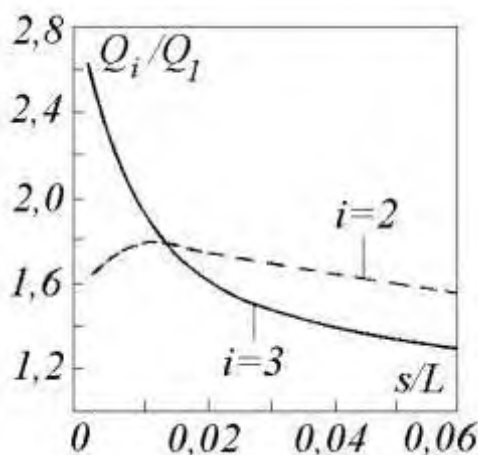


Рис. 4. Порівняння сумарних теплових потоків, які відводяться поверхнями з неперервним і дискретним оребренням різної конфігурації: $i=2$ – дискретне нахилене оребрення типу «ялинка»; $i=3$ – дискретне оребрення зі шахматним розташуванням ребер.

Висновки і перспективи. 1. Проведений порівняльний аналіз теплової ефективності поверхонь з різними типами оребрення – неперервного плоскопаралельного оребрення, дискретного оребрення зі шаховим розташуванням, похилого дискретного оребрення типу «ялинка».

2. Показано, що дискретизація оребрення за його шахового розташування дає змогу підвищити теплову ефективність поверхні в 1,3–2,5 раза.

3. Дискретне оребрення типу «ялинка» має переваги порівняно зі шаховим дискретним оребренням для поверхонь з великими вертикальними розмірами. Величина відведеного теплового потоку для таких поверхонь в 1,6–1,8 раза зростає порівняно з плоскопаралельним оребренням.

Список літератури

1. Elenbaas W. Heat dissipation of parallel plates by free convection / W. Elenbaas // *Physica*. – 1942. – V. 9. – N 1. – P.1–28.
2. Бодойя О. Развитие естественной конвекции между нагретыми вертикальными пластинами / Бодойя Остерл // *Теплопередача*. – 1962. – № 1. – С. 52–58.
3. Старнер М. Опытное исследование естественной конвекции на поверхности с прямоугольными ребрами / Старнер Макманус // *Теплопередача*. – 1963. – № 3. – С. 103–109.
4. Chaddock J. B. Free convection heat transfer from vertical rectangular fin arrays / J. B. Chaddock // *ASHRAS Journal*. – 1970. – V. 7. – N 8. – P. 40–47.

5. Трепутнев В. В. Экспериментальное исследование теплоотдачи вертикальных поверхностей с непрерывным оребрением при естественной конвекции / В. В. Трепутнев, В. Г. Горобец // Пром. теплотехника. – 1998. – № 6. – С. 19–24.

6. Спэрроу П. Интенсификация теплоотдачи свободной конвекцией от вертикальных дискретных пластин / Спэрроу Пракаш // Теплопередача. – 1980. – № 2. – С. 34–41.

7. Горобец В. Г. Теплообмен при обтекании неізотермических развитых поверхностей теплообмена / В. Г. Горобец. – К. : Компринт, 2011. – 353 с.

8. Gorobets V. G. Heat transfer in a non-isothermal extended surface / V. G. Gorobets. – К. : Компринт, 2014. – 377 с.

References

1. Elenbaas, W. (1942). Heat dissipation of parallel plates by free convection. Phisica, 9 (1), 1–28.

2. Bodoja, O. (1962). Razvitie estestvennoy konveksii mezhdu nagretimi vertikalnimi plastinami. [Development of natural convection between heated vertical plates]. Teploperedacha, 1, 52–58.

3. Starner, M. (1963). Opitnoe isslodovanie estestvennoy konveksii na poverhnosti s pryamougolnimi rebrami [Experimental study of natural convection on a surface with rectangular fins]. Teploperedatcha, 3, 103–109.

4. Chaddock, J. B. (1970). Free convection heat transfer from vertical rectangular fin arrays. ASHRAS Journal, 7 (8), 40–47.

5. Treputnev, V. V., Gorobets, V. G. (1998). Eksperimentalnoye issledovaniye teplootdachi vertikalnih poverhnostei s nepreryvnyy orebreniem pri estestvennoy konveksii [Experimental study of heat transfer of vertical surfaces with continuous fineness under natural convection]. Teploperedatcha, 6, 19–24.

6. Sperrow, P. (1980). Intensifikatsiya teplootdachi svobodnoi konveksiei ot vertikalnih diskretnih plastin [Intensification of heat transfer by free convection from vertical discrete plates], 2, 34–41.

7. Gorobets, V. G. (2011). Teploobmen pri obtekanii neizotermicheskikh razvitykh poverhnostei teploobmena [Heat exchange during flow of nonisothermal developed heat transfer surfaces]. Kyiv: Komprint, 353.

8. Gorobets, V. G. (2014). Heat transfer in a non-isothermal extended surface. Kyiv. Komprint, 377.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ОРЕБРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

В. Г. Горобец

Аннотация. Проведен сравнительный анализ теплообмена непрерывного вертикального, дискретного вертикального и наклонного оребрения в условиях свободной конвекции. Показано, что использование дискретного оребрения существенно интенсифицирует процессы теплообмена на вертикальных поверхностях. Сравнение дискретного вертикального и наклонного оребрения указывает на преимущество первого типа оребрения для поверхностей с малыми вертикальными

размерами и ухудшение условий теплоотдачи по сравнению со вторым типом оребрения для поверхностей большой протяженности.

Ключевые слова: вертикальная поверхность с оребрением, свободная конвекция, теплообмен, тепловой поток, эффективность ребра

COMPARATIVE ANALYSIS OF VERTICAL SURFACES WITH VARIOUS TYPES OF WATER IN CONDITIONS OF NATURAL CONVECTION

V. Gorobets

Abstract. A comparative analysis of the heat transfer of continuous vertical, discrete vertical and sloping fins under free convection conditions is carried out. It is shown that the use of discrete sharpening significantly intensifies the processes of heat transfer on vertical surfaces. The comparison of discrete vertical and sloping fins indicates the advantage of the first type of sharpening for surfaces with small vertical dimensions and deterioration of heat transfer conditions compared to the second type of sharpening for surfaces of a large length.

Keywords: vertical finned surface, free convection, heat transfer, heat flux, efficiency of fin

УДК 621.313

METHOD OF DESIGNING A RESOURCE-EFFECTIVE CONTROL SYSTEM FOR VEGETABLE GROWING MODES IN GREENHOUSES

A. DUDNYK, PhD

National university of life and environmental sciences of Ukraine

E-mail: dudnikalla@nubip.edu.ua

Abstract. Greenhouse complexes are characterized by the presence of significant energy streams used to provide technology for cultivation. High energy prices create conditions for the development of special systems that are able to reduce, but better to minimize energy costs. Worthy of note are resource-efficient algorithms for energy flows control throughout the growing season. The results of previous studies have allowed us to conclude that additional information on the predicted values of ambient temperature, solar radiation, information of biological filling states allows us to create a knowledge base and use it for the formation of control impacts on biotechnical objects in order to minimize energy consumption while ensuring production with the required quality and volumes.

The solution of these problems is possible through the use of modern intelligent algorithms for processing information coming from the control object, and the use of results for the formation of appropriate control strategies in order to maximize the production profits .

The proposed system with the use of intelligent information technologies and software based on the predicted values of external natural disturbances and the current parameters of the technological process will provide the decision making support, monitoring the biotechnical object parameters.

Therefore, it is important to use resource-efficient algorithms for: forecasting of natural perturbations and formation of high reliability of optimum regimes of growing of vegetable products taking into account the states of the biological component of the control and pricing policy in the market of commodity products.

Keywords: *greenhouse complex, resource efficiency, methods of designing systems*

Topicality. An analysis of existing developments in the field of energy conservation and the study of control systems in the production of vegetable products [5, 6] showed promising measures to reduce energy consumption. The most expedient and effective scientists consider improvement of thermophysical characteristics of fencing constructions, the use of energy-saving screens and the reorganization of traditional microclimate control systems at the expense of new methods and means of automated control in accordance with technological requirements. However, these paths do not take into account the peculiarities of the biological component, the external natural disturbances, resources price changes, and do not allow finding the best control decisions by developing new resource-efficient methods and algorithms for growing vegetables.

It is also important to record the cost of energy resources using real-time monitoring subsystems and databases to store and further analyze the information provided in the paper [7]. However, such measures require the additional attraction of technical means, the availability of additional computer and network support, which requires additional capital investment. In addition, the information support of such systems is valuable and requires constant availability of a specialist.

Thus, the development of methods and algorithms for determining the optimal resource-efficient modes of vegetable products production in greenhouse complexes, taking into account the predicted characteristics of external natural perturbations, states of biological content, and application of the coordination approach is perspective and relevant.

The purpose of research is to increase the resource efficiency of the process of production of vegetable products in greenhouse complexes by developing the method of designing a resource-effective control system, which minimizes resource and energy costs while complying with the requirements for ensuring high quality of products.

Materials and methods of research. The evolution of control systems of electrotechnical complex for technological objects (Fig. 1) started with systems that form the stabilization algorithms (phase I). But even now, despite

sophisticated technological equipment available both in poultry and for greenhouse continue to use simple control algorithms of electrotechnical complexes - stabilizing algorithms. At the same time international and national experience has shown that their application can be justified only to some extent, under conditions of low energy prices. In this case, by technological standards and controls stabilized without taking into account the character of natural disturbances and states of biological objects, which allows in certain seasons to maximize their productivity. But even in these cases often actuators capacity is not enough for the viability of biological filling in optimal in terms of its performance conditions.

In the 90's of the previous century, when energy costs began to rise, offered as a separate development, the use of algorithms that minimize energy use for individual processes (Stage II) [1]. Later, given the properties of objects change their dynamic parameters were tested adaptive systems (Stage III) capable of in service take into account these circumstances, realizing optimum process control algorithms [4]. But systematically tailored to suit biological content, the analysis of natural disturbances, state of the market value on energy production and quality to ensure maximum profit production can only intelligent control system (Stage IV) [5]. As shown in the figure, their advantage is obvious and provided a significant decrease in the energy component in the production costs structure.

According to preliminary research reducing of energy consumption through the development and implementation of intelligent control systems using the latest methods and means of automation, able to predefine control action based on disturbances forecasting, technological requirements and biological object characteristics.

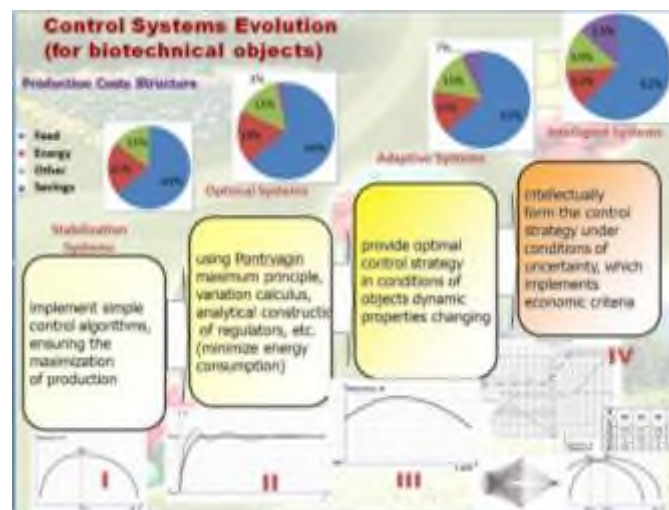


Fig. 1. Control Systems Evolution

Neural network forecasting of external disturbances can increase system performance up to 20 % and can increase technological efficiency up to 13 %. Also, additional energy savings can provide phytomonitoring of

plants. Phytomonitoring can be implemented using modern robotic technical systems to ensure reliability and efficiency of a given measurement.

Review of the functioning of the process facilities along with the peculiarities of the dynamics of natural disturbance and living organisms states and the rational use of energy resources will increase profits from production. Experimental studies depending on the main quality parameters of biological objects from change of microclimate and establish the most productive growing conditions have provided the mathematical model of states of plants that were later used in the formation of management strategies.

The approach proposed to be used is based on the constructing a conceptual model of the control object with the allocation of technological, material and energy flows, which will allow to describe the process of functioning of the electrotechnical equipment of greenhouse complexes by object-oriented programming methods; construction of an adequate neural network mathematical model of the production process of vegetable products in conditions of uncertainty of the environment factors influence. The development of a model for assessing the resource efficiency of the functioning of greenhouse complexes will be carried out by creating a mathematical apparatus describing the processes taking place during the production of vegetable products, along with the use of a coordinating approach to forecasting external parameters and features of the biological component, taking into account the efficiency of cultivation.

Research results. The most important for the process of growth and development of plants is a temperature-humidity regime, whose maintenance is largely influenced by external natural perturbations. In addition, it is the heating and ventilation process, according to conducted analytical studies, have the largest energy capacity. In order to obtain the operating modes of the equipment, a mathematical model of temperature and humidity variation of the internal air was synthesized in the form of differential equations. It is also known that these technological parameters are interdependent, so we have a system of two differential equations:

$$\frac{dT_{\text{intern}}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho C_n V_z} [Q_n(t) + S_p(t) - \lambda Q_t(t)] - \left(\frac{v_v(t)}{V_t} + \frac{k_{\text{t.og.}}}{\rho C_p V_t} \right) [T_{\text{intern}}(t) - T_{\text{extern}}(t)],$$

$$\frac{d\varphi_{\text{intern}}(t)}{dt} = \frac{1}{V_z} Q_t(t) + \frac{1}{V_z} [E(S_n(t), \varphi_{\text{intern}}(t)) - \frac{v_v(t)}{V_z} [\varphi_{\text{intern}}(t) - \varphi_{\text{extern}}(t)]],$$

$$E[S_n(t), \varphi_{\text{intern}}(t)] = \alpha \frac{S_n(t)}{\lambda} - \beta \varphi_{\text{intern}}(t),$$

where $T_{\text{intern}}, T_{\text{extern}}$ – air temperature inside and outside greenhouses respectively, ($^{\circ}\text{C}$); $\varphi_{\text{intern}}, \varphi_{\text{extern}}$ – relative humidity inside and outside greenhouses respectively, (%); $k_{\text{t.og.}}$ – coefficient of heat transfer of the

greenhouse enclosure, (Wt/K); V – geometric volume of greenhouse, (m^3); V_t, V_z – the volume of air heated and humidified accordingly, (m); ρ – air density, ($1,2 \text{ kg}/m^3$); C_p – heat capacity of air, ($1,005 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), Q_n – the power of the heating system of the greenhouse, (Wt); Q_t – fogging system performance, (g/sec); S_p – solar radiation absorbed by the greenhouse, (Wt); λ – heat of vapor formation, (2256 kJ/kg); v_v – air exchange provided by the ventilation system, (m^3/sec). $E[S_H(t), \phi_{\text{HYTP}}(t)]$ – eutotransplantation of plants in the function of absorbed solar radiation and humidity in the greenhouse, (g water/sec), α, β – scale factors.

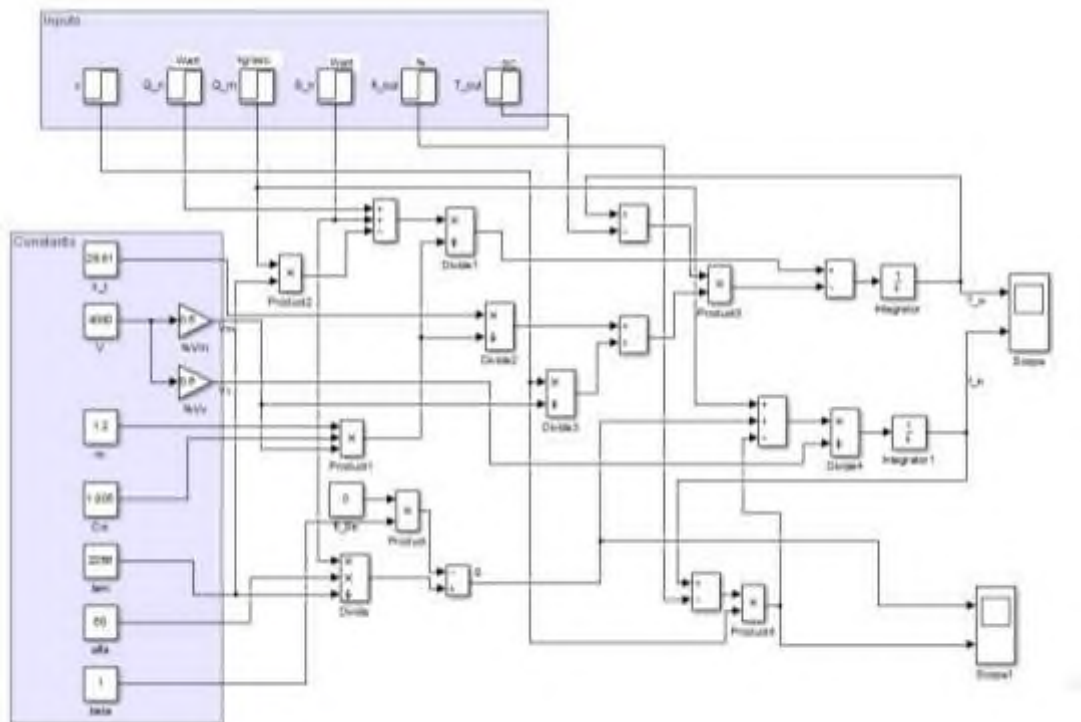


Fig. 2. Structure of the mathematical model

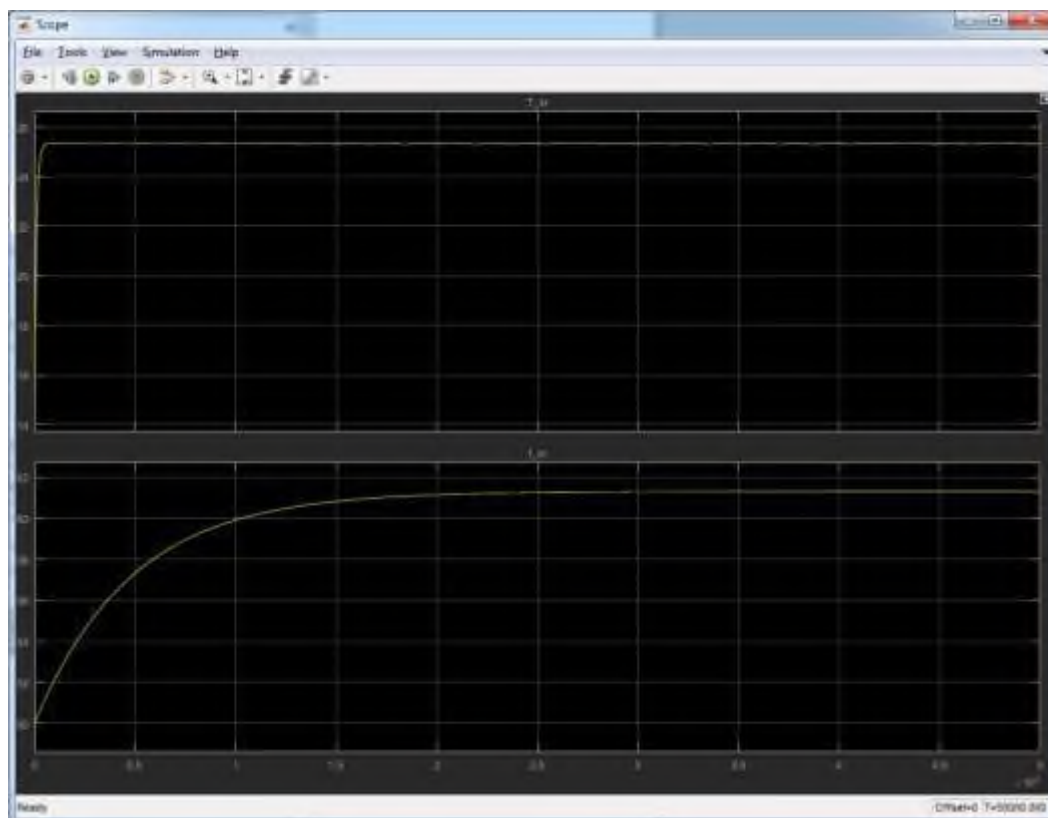


Fig. 3. Air temperature and humidity changes

Conclusions. As a result of the analysis of curves, the following conclusions were drawn:

1. The process of maintaining a given humidity of the air is more inertial, that is, the efficiency of the ventilation system is less, which requires additional research to be taken into account.
2. The process of heating the greenhouse complex largely depends on external natural perturbations, which can be taken into account after application of the method of neural network prediction.

References

1. Lysenko, V., Golovinskiy, B., Reshetiuk, V., Shtepa, V., Rudenskiy, A., Golub, B., Shcherbatiuk, V. (2010). "Technical means of computer-integrated control system of energy resources in poultry farm". *Life and Environmental Sciences*, 2, 111–118.
2. Lysenko, V., Dudnyk, A. (2011). "Optimal control: status and prospects in the Greenhouse industry". *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 166, 104–113.
3. Lysenko, V., Shtepa, V., Zayets, N., Dudnyk, A. (2011). "Neural network forecasting of outside temperature time series", *Biological Resources and Nature Management*, 3–4, 102–108.
4. Lysenko, V., Golub, B., Shcherbatiuk, V. (2009). "The total energy saving architecture computer integrated automatic control system living conditions of laying hens" *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 139, 27–31.

5. Chang Yang (2014). Development of an automation system for greenhouse seedling production management using radio-frequency-identification and local remote sensing techniques / Chang Yang, Kuang-Wen Hsieh Chao-Yin Tsai, Yu-I. Huang, Yu-Liang Chen, Suming Chen // Engineering in Agriculture, Environment and Food, 7, 1, 52–58.

6. Uday, A. Greenhouse Automation System / Uday A. Waykole, Dhiraj G. Agrawal // 1st International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, Mar-2012. – Special Issue of International Journal of electronics, Communication & Soft Computing Science & Engineering, ISSN: 2277–9477.

7. Jenny Aitken-Christi (2013). Automation and environmental control in plant tissue culture / Jenny Aitken-Christie, T. Kozai, M.A.L Smith // Springer Science & Business Media, 574.

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ВИРОЩУВАННЯ ОВОЧІВ У ТЕПЛИЦЯХ

А. О. Дудник

Анотація. Тепличні комплекси характеризуються наявністю значних енергетичних потоків, що використовуються для забезпечення відповідної технології. Високі ціни на енергоносії (природний газ, електрична енергія) створюють умови для розроблення спеціальних систем, здатних зменшити, а краще мінімізувати, енергетичні витрати.

Заслужують на увагу ресурсоефективні алгоритми керування енергетичними потоками на таких об'єктах. Результати попередніх досліджень дали змогу зробити висновок, що додаткова інформація щодо прогнозних значень температури навколишнього середовища, сонячної радіації, інформація про стани біологічного наповнення дозволяє створити базу знань та використати її для формування керуючих впливів на біотехнічні об'єкти з метою мінімізації енергоспоживання, забезпечуючи при цьому виробництво продукції потрібної якості та обсягів.

Вирішення зазначених проблем можливе за допомогою використання сучасних інтелектуальних алгоритмів опрацювання інформації, що надходить від об'єкта керування, та застосування результатів для формування відповідних стратегій керування з метою максимізації прибутку за результатами виробництва.

Запропонована система із застосуванням інтелектуальних інформаційних технологій та програмного забезпечення на основі прогнозованих значень зовнішніх природних збурень та поточних параметрів технологічного процесу забезпечить підтримку прийняття рішень, контроль та моніторинг параметрів біотехнічного об'єкта.

Тому актуальним є використання ресурсоефективних алгоритмів для: прогнозування природних збурень та формування з високою надійністю оптимальних режимів вирощування овочевої продукції з урахуванням станів біологічної складової об'єкта керування та цінової політики на ринку товарної продукції.

Ключові слова: тепличний комплекс, ресурсоефективність, методи проектування систем.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ВЫРАЩИВАНИЯ ОВОЩЕЙ В ТЕПЛИЦАХ

А. А. Дудник

Аннотация. Тепличные комплексы характеризуются наличием значительных энергетических потоков, используемых для обеспечения соответствующей технологии. Высокие цены на энергоносители (природный газ, электрическая энергия) создают условия для разработки специальных систем, способных уменьшить, а лучше минимизировать, энергетические затраты.

Заслуживают внимания ресурсоэффективные алгоритмы управления энергетическими потоками в таких объектах. Результаты предыдущих исследований позволили сделать вывод, что дополнительная информация о прогнозных значениях температуры окружающей среды, солнечной радиации, информация о состоянии биологического наполнения позволяет создать базу знаний и использовать ее для формирования управляющих воздействий на биотехнические объекты с целью минимизации энергопотребления, обеспечивая при этом производство продукции нужного качества и объемов.

Решение указанных проблем возможно путем использования современных интеллектуальных алгоритмов обработки информации, поступающей от объекта управления, и применение результатов для формирования соответствующих стратегий управления с целью максимизации прибыли по результатам производства.

Предложенная система с применением интеллектуальных информационных технологий и программного обеспечения на основе прогнозируемых значений внешних природных возмущений и текущих параметров технологического процесса обеспечит поддержку принятия решений, контроль и мониторинг параметров биотехнического объекта.

Поэтому актуальным является использование ресурсоэффективных алгоритмов для: прогнозирования природных возмущений и формирования с высокой надежностью оптимальных режимов выращивания овощной продукции с учетом состояний биологической составляющей объекта управления и ценовой политики на рынке товарной продукции.

Ключевые слова: тепличный комплекс, ресурсо-эффективность, методы проектирования систем

ОПТИМАЛЬНЕ ЗА ШВИДКОДІЄЮ ФАЗОВЕ АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ СИНТЕЗАТОРА МІТОК ТОЧНОГО ЧАСУ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ SMART-ТЕХНОЛОГІЙ

В. В. КОВАЛЬ, доктор технічних наук, професор

Д. О. КАЛЬЯН, аспірант*

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Ю. А. МАКСИМЕНКО, кандидат технічних наук, старший викладач

Військова академія м. Одеса

О. В. САМКОВ, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут електродинаміки НАН України

E-mail: v.koval@nubip.edu.ua, mytrophan@gmail.com, max75-08@ukr.net

Анотація. Актуальним в умовах сьогодення є забезпечення бажаної енергоефективності систем електропостачання за рахунок підвищення якості та надійності передавання і формування міток точного часу для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу. Мета дослідження – розробка сучасних рішень для передавання синхроінформації з використанням IP-технологій та оптимізації за швидкодією процесу фазового автопідстроювання частоти синтезатора, що забезпечить підвищення якості формування міток точного часу.

Для лінеаризованої моделі системи фазового автопідстроювання частоти синтезатора міток точного часу проведено, на основі принципу максимуму академіка Л. С. Понтрягіна, оптимізацію за швидкодією режимів перехідних процесів. Отримано оптимальний закон керування та запропоновано його реалізацію за допомогою адаптивного цифрового фазового дискримінатора.

Використання адаптивного цифрового фазового дискримінатора (ФД), який захищено патентом України на винахід, у синтезаторі міток точного часу, забезпечує оптимальне керування формою характеристики ФД, мінімальну тривалість перехідного процесу, що покращує якісні показники сформованих міток точного часу.

Обґрунтовано можливість ефективного передавання синхроінформації діючими IP-мережами на основі сучасного протоколу RTP, що дасть змогу підвищити надійність забезпечення інтегрованих систем електропостачання мітками часу з класом точності T5 відповідно до вимог МЕК 61850-90-5.

Ключові слова: системи електропостачання, SMART Grid, мітки часу, синхронізація, протокол RTP, автопідстроювання, оптимізація, швидкодія, адаптивний цифровий фазовий дискримінатор

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. В. Коваль

© В. В. Коваль, Д. О. Кальян, Ю. А. Максименко, О. В. Самков, 2018

Актуальність. Побудову розподільної мережі неможливо уявити без технологій автоматизованого керування роботою мережі і дистанційного моніторингу стану енергетичного обладнання, які дають змогу ефективно та безпечно застосовувати альтернативні джерела енергії, у тому числі сонячну енергію, енергію вітру та інші рішення, і, відповідно до попиту, постачати цю енергію споживачам [1].

Активне впровадження в техніку автоматизованого керування мікропроцесорів і цифрових електронних обчислювальних машин (комп'ютерів) останнього покоління дозволило розробити технологію SMART – Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology (від англ. технологія самодіагностики, аналізу та звіту), що дає змогу створювати системи керування та контролю всього технологічного циклу: збору, опрацювання, передачі інформації, а також керування підстанціями в режимі реального часу [2, 3, 4].

Варто зазначити, що розроблена концепція інтелектуальної енергомережі (SMART Grid) має складову частину, яка пов'язана з необхідністю безперервного моніторингу параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу за допомогою міток точного часу.

Зважаючи на це, актуальним в умовах сьогодення є забезпечення підвищення енергоефективності систем електропостачання за рахунок підвищення якості та надійності формування міток точного часу для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На об'єктах електропостачання синхронізація пристроїв у часі здійснюється вже достатньо давно. Зокрема, вона використовується для забезпечення можливості співвіднесення подій, що реєструються різними пристроями. З початком впровадження інтегрованих систем електропостачання SMART-технологій, де використовуються шини процесу, постає необхідність у забезпеченні більш високої точності синхронізації пристроїв за часом – у межах 1 мкс. Це створює необхідні умови для реалізації принципово нових рішень в задачі вибору заходів реагування, у тому числі превентивного, у разі нестандартних або несподіваних ситуацій, наприклад, виникнення каскадних аварійних відключень електроенергії [3].

У системах електропостачання вимірювання та опрацювання даних повинні забезпечуватися з точністю фіксації часу ± 1 мс, наприклад, дані систем SCADA (Supervisory Control & Data Acquisition), реєстраторів подій, терміналів захистів. Така точність досягається порівняно легко і, відповідно до вимог МЕК 61850 [4, 5], відноситься до Т1 класу точності часу для вимірювання подій і синхронізації. Наступний клас точності часу Т2 повинен забезпечуватися з точністю ± 100 мкс. У сучасних пристроях інтегрованих систем електропостачання SMART-технологій потрібна вища точність. Для синхронізації даних від вимірювальних трансформаторів визначені ще три наступних класи точності часу: Т3 з точністю ± 25 мкс; Т4 з точністю ± 4 мкс і Т5 з точністю ± 1 мкс.

Мета дослідження – розробка сучасних рішень для передавання синхроінформації з використанням IP-технологій та оптимізація за швидкодією процесу фазового автопідстроювання частоти синтезатора, що забезпечить підвищення якості та надійності передавання і формування міток часу класу точності T5 для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу відповідно до вимог МЕК 61850.

Матеріали і методи дослідження. Розглянемо методи часової синхронізації, протоколи передачі, способи автопідстроювання частоти синтезатора для формування міток точного часу інтегрованих систем електропостачання SMART-технологій.

Розрізняють два підходи до виконання часової синхронізації. Перший, в якому використовують незалежну систему, що включає в себе виділені канали передачі інформації та другий, де використовують IP-мережу (Ethernet), по якій, водночас, здійснюється обмін даними між пристроями автоматики і SCADA-системою, а також між окремими пристроями систем електропостачання та ін. На сьогодні мережі Ethernet, дедалі ширше використовуються у межах систем автоматизації підстанцій, тому їх можна також ефективно застосовувати для передачі сигналів часової синхронізації.

Найбільше розповсюджені два протоколи синхронізації часу: Network Time Protocol (NTP) і Precision Time Protocol (PTP). Обидва протоколи, під час передавання й формування міток часу на підстанціях, здійснюють обмін повідомленнями по мережі Ethernet. При застосуванні протоколу NTP зі встановленими відповідними серверами часу і пристроями клієнтів, що мають підтримку даного комунікаційного протоколу, може бути досягнута точність синхронізації часу в діапазоні від 1 до 4 мс.

Стандарт IEEE Std 1588-2008 визначає другу версію протоколу PTP, відому як PTPv2 або 1588v2 [4]. Даний протокол забезпечує високу точність синхронізації часу (класу T5), яка досягається шляхом фіксації міток часу повідомлень синхронізації PTP на інтерфейсах Ethernet на апаратному рівні. Профіль PTP для електроенергетики (Power Profile IEEE Std C37.238-2011) додатково закріплює ряд параметрів для забезпечення точності синхронізації часу в межах 1 мкс. Так, похибки, що вносяться окремим прозорим синхронізатором, не перевищують 50 нс. Зазначене потрібно для забезпечення точності синхронізації не більше, ніж 1 мкс при організації топології локальної мережі, що включає в себе 16 комутаторів Ethernet.

Аналіз зазначених вимог до точності передавання й формування міток часу зумовлює необхідність підвищення якості роботи синтезатора міток точного часу (СМТЧ). Виконаємо оптимізацію за швидкодією процесу фазового автопідстроювання частоти СМТЧ, що забезпечить підвищення якості формування міток часу для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу.

Основою СМТЧ є системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Структурну схему лінеаризованої моделі системи ФАПЧ наведено на рис. 1. У СМТЧ синхронізуючий сигнал, який переданий по

мережі Ethernet і сигнал, що формується генератором, синхронізуються за рахунок керування частотою тактового генератора. Керуюча дія формується на основі різниці фаз (похибка ФАПЧ, що визначається фазовим дискримінатором ФД) між сигналом провідного (ПТГ) і веденого (ВТГ) тактового генератора.

Однією з вимог до робочих характеристик СМТЧ є оптимальне за швидкодією входження в синхронізм, що можливо забезпечити мінімальною тривалістю режимів перехідних процесів [6].

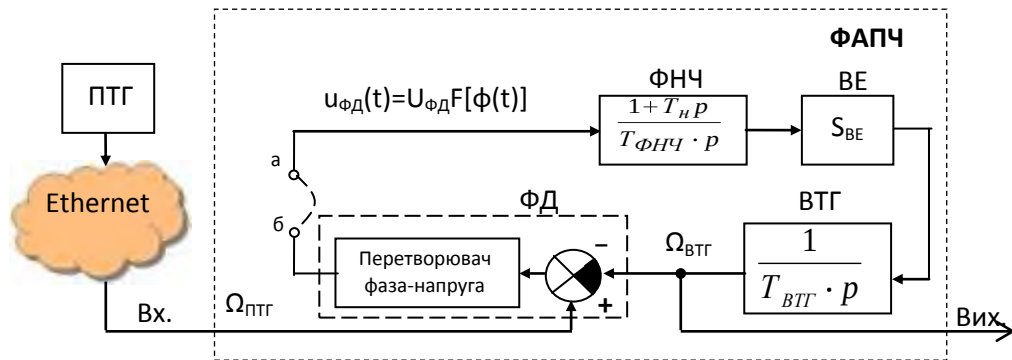


Рис. 1. Структурна схема системи ФАПЧ СМТЧ

Математична модель ФАПЧ СМТЧ може бути записана у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \frac{1}{K(p)} = \Omega_{\Pi} \pm S_{\text{В}} u_{\text{ФД}}(t), \\ u_{\text{ФД}}(\varphi(t)) = U_{\text{ФД}} F(\varphi(t)); u_{\text{ФД}}(0) = u_{\text{ФД}}(T) \\ u_{\text{ФД}}(\varphi) = u_{\text{ФД}}(\varphi + T_{\varphi}), T_{\varphi} = \text{const}; \\ u_{\text{ФДст}}(t) = u_{\text{ФД}}(\varphi), u_{\text{ФДдин}}(t) = F_{\text{дин}} u_{\text{ФД}}(t), u_{\text{ФД}}(\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

де $\varphi(t) = \varphi_{\text{ПТГ}}(t) - \varphi_{\text{ВТГ}}(t)$ – фазова похибка ФАПЧ СМТЧ;

$\varphi_{\text{ПТГ}}(t)$ і $\varphi_{\text{ВТГ}}(t)$ – відповідно, фаза ПТГ та ВТГ;

$K(p)$ – коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот (ФНЧ);

Ω_{Π} – початкове розлаштування ВТГ відносно ПТГ;

$S_{\text{В}}$ – крутизна характеристики виконавчого елементу;

$u_{\text{ФД}}(t)$ – періодична керуюча дія;

$F(\varphi(t))$ – нормована характеристика ФД;

t – незалежна змінна (час);

d – оператор диференціювання;

$U_{\text{ФД}}, T_{\varphi}$ – відповідно, амплітуда та період керуючої дії;

$u_{\text{ФДст}}(t)$ і $u_{\text{ФДдин}}(t)$ – відповідно, статичне і динамічне значення керуючої дії.

Рівняння (1) для синтезатора мітки точного часу з використанням в кільці системи ФАПЧ аперіодичного ФНЧ, що має передатну функцію типу

$$K(p) = \frac{1}{Tp+1}, \quad (2)$$

де T – постійна часу ФНЧ;

p – оператор Лапласа, буде мати вигляд:

$$\begin{cases} T \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \frac{d\varphi(t)}{dt} = \Omega_{\Pi} \pm S_{BE} U_{\Phi D}(t); \\ u_{\Phi D}(\varphi(t)) = U_{\Phi D} F(\varphi(t)); \\ u_{\Phi D}(0) = u_{\Phi D}(T_{\varphi}(t)); u_{\Phi D}(\varphi) = u_{\Phi D}(\varphi + T_{\varphi}), T_{\varphi} = \text{const}; \\ u_{\Phi D_{CT}}(t) = u_{\Phi D}(\varphi); u_{\Phi D_{днн}}(t) = F_{днн} u_{\Phi D}(t), u_{\Phi D}(\varphi) = \end{cases} \quad (3)$$

Будемо враховувати обмеження зміни величини керуючого впливу вигляду

$$U_{\min} \leq u_{\Phi D}(t) \leq U_{\max}. \quad (4)$$

Після заміни змінних, диференціювання рівняння (3), введення допоміжних змінних, виконаємо оптимізацію за швидкодією з використанням принципу максимуму академіка Л. С. Понтрягіна [6]. Максимізуючи функцію Гамільтона по керуючій дії з урахуванням обмежень (4) і двох останніх рівнянь системи (3), отримуємо оптимальний алгоритм керування при $\Omega_{\Pi} = \text{const}$, $S_{BE} = \text{const}$, $T = \text{const}$:

$$u(t) = \max u_{\Phi D}(t) = U_{\Phi D} \text{sign} F(\varphi(t)) + U_{\text{екстр}} \text{sign} e^{-\lambda_2 t} + \Psi_{20}, \quad (5)$$

де $U_{\text{екстр}}$ дорівнює граничним значенням $U_{\max}$ або $U_{\min}$ нерівності (4);

λ_1, λ_2 – корні характеристичного полінома;

Ψ_{20} – початкові умови допоміжної змінної Ψ_2 .

Результати досліджень та їх обговорення. У результаті виконаних досліджень отримано аналітичні вирази для розрахунку показників якості оптимальних режимів перехідних процесів та побудови кривої керування. Для цього знайдено рішення рівнянь системи:

$$\begin{cases} \frac{dz_1(t)}{dt} = u_1 \Omega_{\Pi}, u_{\Phi D}(t); \\ \frac{dz_2(t)}{dt} = \lambda_2 y_2(t) + u_2 \Omega_{\Pi}, u_{\Phi D}(t); \end{cases} \quad (6)$$

де

$$y_1 = c_{11}\varphi + c_{12}\omega;$$

$$y_2 = c_{21}\varphi + c_{22}\omega;$$

$$u_1 = \Omega_{\Pi} \pm S_{BE} u_{\Phi D}(t) \pm \frac{c_{12}}{T}; u_2 = \Omega_{\Pi} \pm S_{BE} u_{\Phi D}(t) \pm \frac{c_{22}}{T}; c_{11} = -\lambda_2; c_{12} = c_{22} = 1; c_{21} = -$$

λ_1 ; $\omega = d\varphi/dt$, яке при довільних початкових умовах з урахуванням виразу (5) буде мати вигляд:

$$\begin{cases} z_1(t) = Y_{10} + U_{\text{ФД}} \text{sign} F \varphi(t) \mp U_{\text{екстр}} \text{sign} e^{-\lambda_2 t} + \Psi_{20} \cdot t; \\ z_2(t) = Y_{20} e^{\lambda_2 t} - \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{\lambda_2 t}) U_{\text{ФД}} \text{sign} F \varphi(t) \mp U_{\text{екстр}} \text{sign} e^{-\lambda_2 t} + \Psi_{20} \cdot t. \end{cases} \quad (7)$$

Конкретний приклад побудови кривої оптимального керування, згідно з виконаними аналітичними дослідженнями, подано на рис. 2. Проаналізуємо отриманий оптимальний алгоритм керування (5) з урахуванням максимізації функції Гамільтона (14) і сформулюємо вимоги, що пред'являються до форми характеристики ФД.

Перший доданок оптимального алгоритму керування (5) характеризує його залежність від миттєвої різниці фаз ПТГ і ВТГ; другий – від часу. Наявність залежності від складової керування, що визначається другим доданком при оптимальному керуванні наближує досліджувану систему до оптимальних за швидкодією аналогових і релейних систем, в яких ця складова є єдиним керуванням.

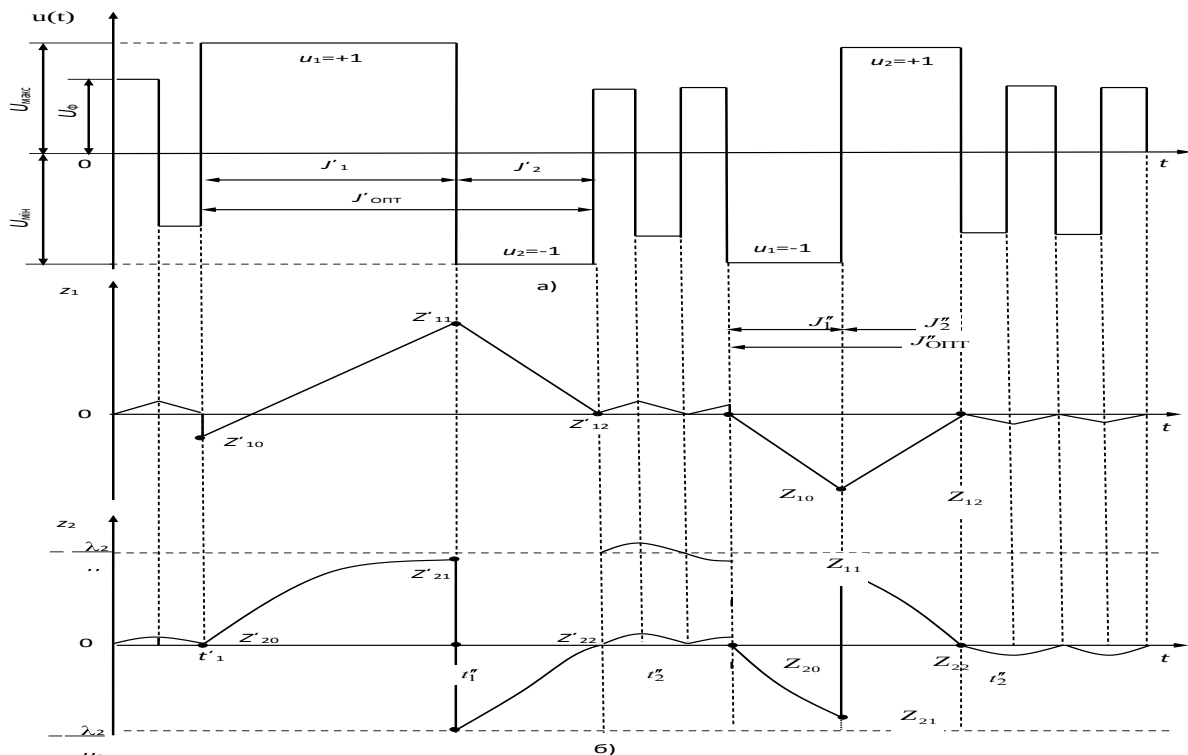


Рис. 2. Керована характеристика ФД (а) та характер оптимальних режимів перехідних процесів у системі ФАПЧ СМТЧ (б)

Зазначена вище обставина зумовлює цілий ряд істотних відмінностей у дослідженні оптимальних систем з періодичними управляючими діями, головними з яких є періодичність фазового простору, неможливість точного аналітичного розрахунку параметрів динаміки та ін.

Для реалізації оптимального алгоритму керування система ФАПЧ повинна мати керований ФД, що забезпечить формування заданого виду

характеристики i , відповідно, оптимальної керуючої дії. Формування характеристики ФД повинно здійснюватися каналом керування (третім входом). На вхід каналу надходить сигнал оптимального переключення, що забезпечує керування формою характеристики ФД на тривалість перехідного процесу залежно від величини і знаку фазової (частотної) похибки системи ФАПЧ оптимальної за швидкодією. Канал керування ФД забезпечує найшвидше і точне попадання відображуючої точки системи в положення стійкої рівноваги. Практична реалізація керованого ФД може бути ефективно виконана з використанням цифрових технологій за допомогою запропонованого адаптивного цифрового фазового дискримінатора АЦФД [7].

Висновки і перспективи. Для лінеаризованої моделі системи фазового автопідстроювання частоти синтезатора міток точного часу виконано оптимізацію за швидкодією режимів перехідних процесів на основі принципу максимуму академіка Л. С. Понтрягіна. Отримано в аналітичному вигляді оптимальний закон керування та запропоновано його реалізацію з використанням цифрових технологій за допомогою запропонованого адаптивного цифрового фазового дискримінатора (ФД).

Використання адаптивного цифрового ФД, який захищено патентом України на винахід, у синтезаторі міток точного часу, забезпечує оптимальне керування формою характеристики фазового дискримінатора, мінімальну тривалість перехідного процесу. Така система одночасно забезпечує також високу точність і стабільність частоти сигналу СМТЧ.

Обґрунтовано можливість ефективного передавання синхроінформації діючими IP-мережами на основі сучасного протоколу РТР, що дасть змогу надійно забезпечити інтегровані системи електропостачання мітками часу з класом точності Т5 відповідно до вимог МЕК 61850-90-5.

Список літератури

1. Velychko O. M., Kalian D. O., Koval V. V., Samkov O. V. "Terminal devices for synchro-information systems with adaptive properties for IoT" / 2st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT-2017), Lviv, Ukraine, 4–7 July 2017. – Львів : Львівська політехніка. – 2017. – С. 22–25.
2. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням IP-мереж : монографія / В. В. Коваль, Д. О. Кальян, О. В. Самков. – К. : НУБіП України, 2016. – 182 с.
3. Velichko O. N. Metrological activity in Ukraine // Measurement Techniques. – Vol. 42. – December, 1999. – Number 12. – P. 1109–1115.
4. Ingram D.M., et al., Performance Analysis of PTP Components for IEC 61850 Process Bus Applications, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.62, No 4, April 2013, pp.710–719.
5. IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substations; <http://domino.iec.ch/webstore/webstore.nsf/searchview/?SearchView=&SearchOrder=4&SearchWV=TRUE&SearchMax=1000&Query=61850&submit=OK>
6. Коваль В. В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою : монографія / В. В. Коваль, Д. О. Кальян. – К. : НУБіП України, 2016. – 412 с.

7. Пат. на винахід, №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор / Коваль В. В., Кальян Д. О., Коваль В. В. (Україна) – № а 2015 11981 ; заявл. 03.12.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9. Опубл. Бюл. № 2, 25.01.2017.

References

1. Velychko, O. M., Kalian, D. O., Koval, V. V., Samkov, O. V. (2017). Terminal devices for synchro-information systems with adaptive properties for IoT. 2st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT-2017), Lviv, Ukraine, 4–7 july 2017, 22–25.
2. Koval, V. V., Kalian, D. O., Samkov, O. V. (2016). Avtomatyzovana systema peredachi synkhrosyhnaliv z vykorystanniam IR-merezh: monohrafiia. [Automated system of transmission of synchronous signals using IP-networks] Kiyv: NUBiP Ukrainy, 182.
3. Velichko, O. N. (1999). Metrological activity in Ukraine. Measurement Techniques. 42 (12), 1109–1115.
4. Ingram D.M., et al. (2014). Perfomance Analysis of PTP Components for IEC 61850 Process Bus Applications”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, I.62 (4), 710–719.
5. IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substations; Avalaible at: <http://domino.iec.ch/webstore/webstore.nsf/searchview/?SearchView=&SearchOrder=4&SearchWV=TRUE&SearchMax=1000&Query=61850&submit=OK>
6. Koval, V. V., Kalian, D. O. (2016). Prystroi synkhronizatsii infokomunikatsiinykh merezh z periodychnoiu avtopidstroikoju: monohrafiia [Devices of synchronization of infocommunication networks with periodic auto-tuning]. Kiyv: NUBiP Ukrainy, 412.
7. Patent na vynakhid №113473 Ukraina, MPK (2016.01) N 03 D 13/00, N 03 D 3/04 (2006.1). Adaptivnyi tsyfrovyi fazovyi dyskryminator [Adaptive Digital Phase Discriminator]. Koval, V. V., Kalian, D. O., Koval, V. V. (Ukraine) – № а 2015 11981, Zaiavl. 03.12.2015, Opubl. 10.05.2016, Biul. № 9. Opubl. Biul. № 2, 25.01.2017.

ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ФАЗОВАЯ АВТОПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ СИНТЕЗАТОРА МЕТОК ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ SMART-ТЕХНОЛОГИЙ

**В. В. Коваль,
Д. А. Кальян,
Ю. А. Максименко,
А. В. Самков**

Аннотация. В современных условиях актуальным является обеспечение желаемой энергоэффективности систем электроснабжения за счет повышения качества, надежности передачи и формирования меток точного времени для непрерывного мониторинга стабильности параметров электросети с привязкой к реальному времени. Цель исследования – разработка современных

решений для передачи синхронинформации с использованием IP-технологий и оптимизации по быстродействию процесса фазовой автоподстройки частоты синтезатора, которая обеспечит повышение качества формирования меток точного времени.

На основе линеаризованной модели замкнутой системы автоматического регулирования синтезатора меток точного времени и использования метода оптимизации на основе принципа максимума академика Л. С. Понтрягина получено в аналитическом виде оптимальный по быстродействию закон управления и предложена его реализация с помощью адаптивного цифрового фазового дискриминатора (ФД).

Использование адаптивного цифрового ФД, который защищен патентом Украины на изобретение, в синтезаторе меток точного времени обеспечивает оптимальное управление формой характеристики фазового дискриминатора (ФД), минимальную продолжительность переходного процесса и улучшение качественных показателей меток точного времени. Передача синхронинформации действующими IP-сетями на основе современного протокола PTP позволит надежно обеспечить интегрированные системы электроснабжения метками времени с классом точности T5 в соответствии с требованиями МЭК 61850-90-5.

Ключевые слова: электроснабжение, SMART Grid, метки времени, синхронизация, протокол PTP, автоподстройка, оптимизация, быстродействие, адаптивный цифровой фазовый дискриминатор

SPEED OPTIMAL PHASE-LOCKED LOOP FOR PRECISE TIME INSTANTS SYNTHESIZER FOR INTEGRATED POWER SUPPLY SMART GRID SYSTEMS

**V. Koval,
D. Kalian,
U. Maksimenko,
A. Samkov**

Abstract. Nowadays, it is important to achieve the desired energy efficiency of power supply systems by improving the quality, reliability of transmission and generation of accurate precise time instants for continuous monitoring of the stability of power grid parameters with real-time scale. The goal of the work is to investigate modern solutions for the transfer of synchronization information using IP-based technologies and optimize for the speed the phase-locked loop of frequency synthesizer, which will improve the quality of generating the exact time instants.

On the basis of the linearized model of a closed system of automatic regulation of the synthesizer of labels of the exact time and the use of the optimization method on the basis of the maximum principle by academician L.

S. Pontryagin obtained in the analytical form the speed-optimal control law and proposed its implementation using an adaptive digital phase discriminator (PD)

The use of adaptive digital PD, which is protected by the patent of Ukraine for invention, in the synthesizer of precise time marks provides optimal control of the shape of the phase discriminator (PD) characteristics, the minimum duration of the transient process and the improvement of the quality indicators of the generated exact time marks. The transfer of synchronization information by the existing IP networks based on the modern PTP protocol will enable reliable provision of integrated power supply systems with timestamps with accuracy class T5 in accordance with the requirements of IEC 61850-90-5.

Keywords: *power supply, Smart Grid, timestamps, synchronization, PTP protocol, auto-tuning, optimization, performance, adaptive digital phase discriminator*

УДК 621:541:183

ДО ПИТАННЯ ПРО СУШІННЯ ГАЗІВ НА ОСНОВІ КОРОТКОЦИКЛОВОЇ БЕЗНАГРІВНОЇ АДСОРБЦІЇ

Б. Х. ДРАГАНОВ, доктор технічних наук, професор
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Ю. Ф. СНЄШКІН, доктор технічних наук, професор
Інститут технічної теплофізики НАН України
E-mail: epafort1@mail.ru

Анотація. *Мета дослідження – аналіз процесів сушіння газів на основі короткоциклової безнагрівної адсорбції.*

Наведено основні відомості про адсорбцію, теорію молекулярної адсорбції, структури адсорбентів, а також основи сушіння газоподібних тіл на основі адсорбційної техніки.

Встановлено, що основною перевагою короткоциклової адсорбції є вища продуктивність установок за зіставних габаритів та відсутності допоміжних пристроїв для нагрівання регенеруючого повітря.

Ключові слова: *сушіння газів, адсорбція, хемосорбція, адсорбент короткоциклова безнагрівна адсорбція*

Актуальність. *Адсорбцією називають концентрування речовин на поверхні розподілу фаз або в об'ємі пор твердого тіла. У процесі адсорбції беруть участь щонайменше два агенти: тіло, на поверхні або в об'ємі пор якого відбувається концентрування речовини, яка поглинається (її називають адсорбентом), і сама речовина. Остання, якщо вона знаходиться в газовій або рідкій об'ємній фазі, тобто в неадсорбованому*

стані, називається адсорбтивом, а після того, як вона перейшла в адсорбований стан – адсорбатом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Будь-яка тверда речовина має поверхню, а значить, потенційно є адсорбентом. Однак у техніці використовують тверді адсорбенти з сильно розвиненою внутрішньою поверхнею (об'ємом пор). Розвиток внутрішньої поверхні (об'єму пор) у твердому тілі досягається створенням спеціальних умов у процесі його синтезу або в результаті додаткової обробки [1].

Адсорбція є процесом мимовільним і екзотермічним, тобто її протікання супроводжується виділенням тепла.

На відміну від фізичної адсорбції, при хемосорбції не зберігається індивідуальність адсорбтиву і адсорбенту. При зближенні молекул адсорбтиву з поверхнею відбувається перерозподіл електронів взаємодіючих компонентів з утворенням хімічного зв'язку. Якщо фізичну адсорбцію можна порівняти з конденсацією, то хемосорбційний процес повинен розглядатися як хімічна реакція, яка протікає на поверхні розподілу фаз [2].

Фізичну і хімічну адсорбцію можна розрізнити за теплотою адсорбції. Теплота фізичної адсорбції порівняна з теплотою конденсації речовин і не перевищує 120 кДж/моль. Теплота хемосорбції 1 моль речовини досягає декількох сотень кілоджоулів. Хемосорбція, зазвичай, протікає з невеликою швидкістю.

Тверді сорбенти, як правило, відрізняються «ажурною» внутрішньою структурою, яка містить пори різного розміру. Залежно від розмірів пори поділяють на три типи: мікро-, мезо-, і макропори.

Як верхню межу розміру мікропор приймають радіус 1,5 нм. Сумарний об'єм мікропор промислових адсорбентів, як правило, не перевищує 0,5 см³/г.

Мета дослідження – аналіз процесів сушіння газів на основі короткоциклової безнагрівної адсорбції.

Матеріали і методи дослідження. Розглянемо основи сушіння повітря на базі адсорбційної установки. При цьому використовується система з короткоциклової та безнагрівної адсорбції.

Зазвичай, як адсорбент у короткоциклових установках використовують силікагель. Спочатку селікагелеву установку застосовували тільки для осушення природного газу, але в процесі експлуатації було встановлено, що поряд із вологою відбувається виділення вуглеводнів бензинового ряду, і осушувальні установки стали переобладнувати в установки, що поєднують функції осушення та збензинювання.

Селікагель охолоджують сухим або вологим газом. В останньому випадку потрібно звернути увагу на те, щоб напрямки потоків газу на стадіях охолодження збігалися.

Досягнення високого та стабільного ступеня осушення можливе тільки за достатньої тривалості та безперервної експлуатації адсорбційної установки. У період зупинки волога, унаслідок дифузії, накопичується в основній апаратурі й комунікаціях, що значно погіршує сухість газу після повторного пуску. Особливо сильне зволоження апаратури відзначається

після періодичних гідравлічних випробувань, які проводять за допомогою води.

Схеми короткоциклової установки дуже прості. Тривалість стадій адсорбції, десорбції та охолодження становить 30–60 хв і залежить від продуктивності установки за переробленим газом, маси адсорбенту і вмісту в газі видобутих компонентів.

Зроблено численні спроби вдосконалити короткоцикловий процес [3]. У одному з варіантів осушення природних газів методом періодичної адсорбції з трьома стадіями (адсорбція, десорбція, охолодження) досягнуто збільшення ступеня вилучення шкідливих домішок.

Результати досліджень та їх обговорення. Дослідження показують, що можливе проведення регенерації без підведення тепла – тільки шляхом зниження тиску і (або) продувки газу частиною очищеного потоку.

Цей принцип регенерації покладено в основу короткоциклових безнагрівних адсорбційних установок, які отримали широке застосування, у першу чергу, для сушіння газу. Принцип короткоциклової безнагрівної адсорбції на прикладі сушіння повітря пояснює рис.1 [4].

Стиснене повітря, яке надходить в установку, проходить через клапан 1а в адсорбер 2а, де осушується в результаті контакту з відрегенованим адсорбентом. Основна частина осушеного повітря (сухий прямий потік) проходить через зворотний клапан 3а і виводиться з установки споживачеві. Інша частина осушеного повітря (сухий зворотний потік) дроселюється за допомогою вентиля 4 до тиску нижчого, ніж тиск за адсорбції (зазвичай до атмосферного), проходить другий адсорбер, регенеруючи розміщений в ньому адсорбент, і через клапан 5б як вологий зворотний потік скидається в атмосферу.

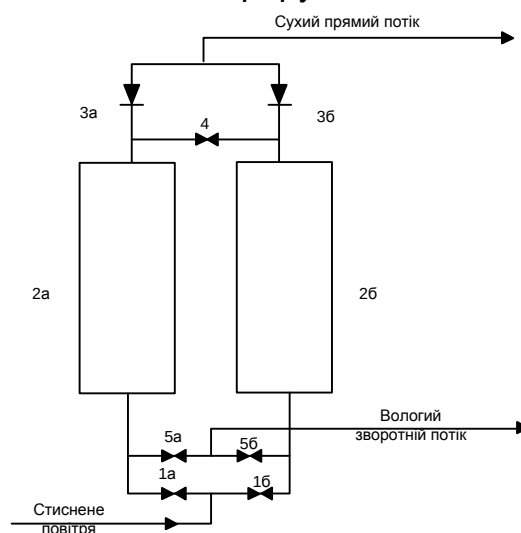


Рис. 1. Схема установки короткоциклового безнагрівного осушення:

1, 5 – автоматичні клапани; 2 – адсорбер; 3 – зворотні клапани; 4 – дроселюючий вентиль

Через незначний проміжок часу, який не перевищує, зазвичай, декількох хвилин, пневмо- і електрокеровані клапани серії «а» перекриваються,

одночасно відкриваються клапани серії «б» і адсорбер. Роботу адсорбера в одній зі стадій (адсорбції або десорбції) називають напівцикл.

Короткоциклові установки безнагрівної адсорбції відрізняються компактністю, унаслідок чого їх легко переміщувати. Якщо осушенню піддавати не повітря, а газ, його втрат можна уникнути, приєднуючи зворотний потік до газу, який спрямовується на сушіння. Відсутність витрат тепла на нагрівання адсорбенту є однією з причин, яка забезпечує високу економічну ефективність установок такого типу. Водночас, необхідно враховувати, що безперервна експлуатація короткоциклової установки можлива тільки за умови надійної та швидкодіючої системи керування потоками.

Установки короткоциклового безнагрівного осушення тільки через значний час після пуску починають давати якісний продукт.

Надалі в схему було внесено ряд цінних удосконалень. Запропоновано, наприклад, для зменшення витрат повітря, що йде на регенерацію, а також для більш плавного підйому тиску в адсорбері за його перемикання зі стадії регенерації на стадію адсорбції, використовувати додаткову ємкість. На рис. 2 показаний один із варіантів підключення цієї ємкості.

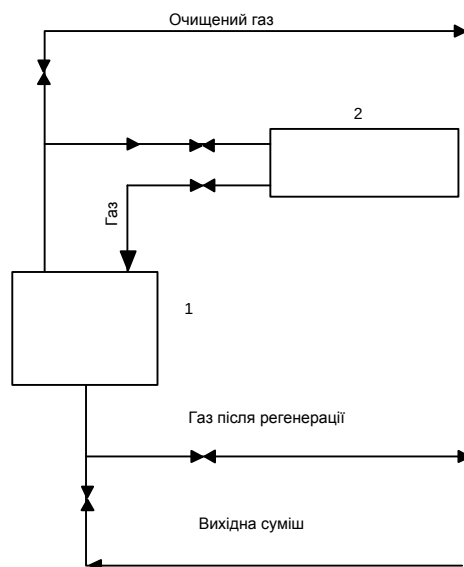


Рис. 2. Схема установки короткоциклового безнагрівного очищення з одним адсорбером (1) і ресивером (2)

Проміжна ємкість у стадії адсорбції має тиск, що дорівнює тиску в адсорбері. Газ, що заповнює її, служить спочатку для регенерації шару, а потім для плавного підйому тиску за переходу від стадії регенерації до стадії адсорбції. Плавний підйом тиску зменшує стирання адсорбенту внаслідок гідравлічних поштовхів і сприяє збільшенню ступеня осушення. Установка, зображена на рис. 2, послужила прототипом одноадсорбних установок безнагрівного осушення [5].

Межі продуктивності короткоциклових установок дуже широкі: від 2 до 3800 м³/год. Газ осушують при тиску 0,4–1,0 МПа. Ступінь сушіння стисненого газу відповідає точці роси від -40 до -90 ° С і збільшується зі зниженням температури вихідного повітря і зростанням тиску.

Короткоциклові безнагрівні установки застосовують не тільки для сушіння і очищення газів, а й для поділу дво- або трикомпонентних газових сумішей. Прикладом поділу двокомпонентних сумішей є отримання збагаченого киснем повітря з використанням як адсорберу цеоліту СаА або NaX. Цеоліт вибірково поглинає азот з повітря. Збагачене киснем повітря (30– 75 % O₂) отримують як первинний потік. Процес проводять за тиску 0,2–0,6 МПа; тривалість напівциклу становить від 40 с до 2,5 хв. Приблизно половина потоку, яка виходить із адсорбера, витрачається на регенерацію адсорбенту. Одночасно зі збагаченням відбувається сушіння газу та очищення його від діоксиду вуглецю.

Висновки і перспективи. Основною перевагою короткоциклової адсорбції є вища продуктивність установок за зіставних габаритів та відсутності допоміжних пристроїв для нагрівання регенеруючого повітря.

Список літератури

1. Серпионова Е. Н. Промышленная адсорбция газов и паров / Е. Н. Серпионова. – М. : Высшая школа, 1969. – 416 с.
2. Киселев А. В. Курс физической химии Т. 1. / А. В. Киселев ; под ред. Я. И. Герасимова. – М. : Химия, 1969. – 509 с.
3. Patent 3477206, USA. Gas treatment by absorption / Russell G. F.; declared 1965 – 10 – 07; published 1969 – 11 – 11.
4. Лишневский М. И. Безнагревные установки осушки сжатого воздуха / М. И. Лишневский. – М. : ЦНИТЭнефтехим, 1969. – 53 с.
5. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1984. – 592 с.

References

1. Serpionova, E. N. (1969). Promyshlennaya adsorbtsiya gazov i parov [Industrial adsorption of gases and steam]. Moskow: Vysshaya shkola, 416.
2. Kiselev, A. V. (1969). Kurs fizicheskoy khimii T. 1. [Course of Physical Chemistry T.1]. Moskow: Khimiya, 509.
3. Patent 3477206, USA. Gas treatment by absorption. Russell G. F.; declared 1965 – 10 – 07; published 1969 – 11 – 11.
4. Lishnevskiy, M. I. (1969). Beznagrevnyye ustanovki osushki szhatogo vozdukha [Free air drying of compressed air]. Moskow: TSNIT·Eneftekhim, 53.
5. Kel'tsev, N. V. (1984). Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki [Basics of adsorption technique]. Moskow: Khimiya, 592.

К ВОПРОСУ О СУШКЕ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ КОРОТКОЦИКЛОВОЙ БЕЗНАГРЕВНОЙ АДСОРБЦИИ

**Б. Х. Драганов,
Ю. Ф. Снешкин**

Аннотация. Целью исследования был анализ процессов сушки газов на основе короткоцикловой безнагревной адсорбции.

Приведены основные сведения об адсорбции, теории молекулярной адсорбции, структуры адсорбентов. Приведены основы сушки газообразных тел на основе адсорбционной техники.

Установлено, что основным преимуществом короткоцикловой адсорбции является высокая производительность установок при сопоставимых габаритах и отсутствии вспомогательных устройств для нагрева регенерирующего воздуха.

Ключевые слова: сушка газов, адсорбция, хемосорбция, адсорбент, короткоцикловая безнагревная адсорбция

TO THE QUESTION OF DRYING GASES ON THE BASIS OF SHORT-CIRCULAR NON-ADDRESSING ADSORPTION

B. Draganov,
Yu. Sneshkin

Abstract. The purpose of the study was to analyze the processes of drying gases on the basis of short-cycle heat-free adsorption.

In the article the basic information about adsorption, the theory of molecular adsorption, structure of adsorbents is given. The bases of drying of gaseous bodies on the basis of adsorption technique are given.

It is established that the main advantage of short-cycle adsorption is the higher productivity of plants at comparable dimensions and the absence of auxiliary devices for heating regenerating air.

Keywords: drying of gases, adsorption, chemisorption, adsorbent, short-cycle non-heating adsorption

УДК 535.372

ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ВЛАСТИВОСТІ ОРТОФОСФАТУ БІСМУТУ ЛЕГОВАНОГО ІОНАМИ ЄВРОПІЮ ТА ПРАЗЕОДИМУ

В. В. БОЙКО, кандидат фізико-математичних наук, доцент

В. П. ЧОРНІЙ, кандидат фізико-математичних наук

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

С. Г. НЕДІЛЬКО, доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

К. В. ТЕРЕБІЛЕНКО, кандидат хімічних наук, доцент

М. С. СЛОБОДЯНИК, доктор хімічних наук, професор
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

E-mail: vchornii@gmail.com

Анотація. Подано результати досліджень люмінесцентних властивостей ортофосфату бісмуту BiPO_4 , легованого іонами Eu^{3+} та

Pr^{3+} . Проаналізовано можливість використання цих речовин як люмінесцентних матеріалів джерел світла для тепличного вирощування рослин.

Встановлено, що, як у випадку легування $BiPO_4$ іонами Eu^{3+} , так і Pr^{3+} , досліджувані зразки виявляють інтенсивну червону фотолюмінесценцію за кімнатної температури. Як спектри фотолюмінесценції, так і її збудження, для кожного з випадків визначаються переходами в іонах рідкісноземельних елементів, а свічення та, відповідно, збудження фосфатної матриці відсутнє. Серед ліній усіх випромінювальних переходів у випадку легування Eu^{3+} зі спектрами поглинання хлорофілу б найкраще корелюють лінії переходу $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$. Для випадку легування іонами Pr^{3+} для ліній переходів $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$ та $^3P_0 \rightarrow ^3F_2$ спостерігається кореляція зі смугами в поглинанні хлорофілу б та хлорофілу а відповідно.

Ключові слова: фотолюмінесценція, фосфат бісмуту, червоний люмінофор, Eu^{3+} , Pr^{3+}

Актуальність. Проблема раціонального використання енергоресурсів є однією з ключових в сучасному світі. На її вирішення спрямовано значні зусилля як у плані пошуків технологічних рішень, так і проведення наукових досліджень. Одним із напрямів таких досліджень є пошук люмінесцентних матеріалів із інтенсивним червоним свіченням для світлодіодів білого світла. На сьогодні матеріал червоної компоненти таких діодів (у промисловості використовують переважно $Y_2O_3:Eu^{3+}$, $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ та $YVO_4:Eu^{3+}$) має низьку ефективність свічення порівняно з матеріалами синьої (InGaN) та зеленої ($Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$) компонент.

Варто зауважити, що у випадку дослідження червоних люмінофорів основну увагу приділяють так званим колірним координатам, тоді як особливості спектра (таких як положення максимумів та форма смуг випромінювання) залишаються поза увагою. У випадку розробки білих світлодіодів для застосування в теплицях бажано, щоб спектри випромінювання корелювали зі спектрами поглинання хлорофілів, адже в такому випадку буде найбільш ефективно відбуватися фотосинтез і розвиток рослини.

У дослідженні аналізуються люмінесцентні властивості полікристалічних зразків $BiPO_4$, легованих іонами Eu^{3+} та Pr^{3+} . Вибір матриці – ортофосфату бісмуту – пов'язаний з простотою легування іонами рідкісноземельних елементів (РЗЕ) та наявністю трьох структурних поліморфів (різне оточення для РЗЕ іонів). Крім того, $BiPO_4$ як представник класу фосфатів характеризується гарними фізико-хімічними властивостями. Щодо вибору домішок, то відомо, що іони європію та празеодиму мають інтенсивну люмінесценцію в оранжево-червоній спектральній ділянці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Задача пошуку люмінесцентних матеріалів є дуже актуальною на сьогодні, що підтверджується значною кількістю публікацій у цій галузі

матеріалознавства останнім часом та нових люмінесцентно-активних матеріалів [1]. Серед оксидних матеріалів ортофосфат бісмуту є одним із найкращих в плані легування іонами РЗЕ [2, 3]. Якщо легуванню цього фосфату іонами Європію присвячений ряд робіт, то відомостей про BiPO_4 , легованого іонами празеодиму, нині відсутні. Однак відомо, що легування оксидних матеріалів празеодимом дає змогу одержати люмінесцентний матеріал з оранжево-червоним свіченням. Варто зауважити, що у випадку легування іонами Eu^{3+} не аналізувалися спектри випромінювання разом із спектрами поглинання хлорофілу, тобто відсутні дані щодо перспектив використання $\text{BiPO}_4:\text{Eu}$ як червоного люмінофора в агротехніці. Водночас, повідомлялося, що, залежно від спектральних характеристик штучного освітлення, можна досягти кращих показників росту рослин [4].

Мета дослідження – встановлення люмінесцентних характеристик порошкоподібних зразків BiPO_4 , легованих іонами Eu^{3+} та Pr^{3+} ; аналіз перспектив застосування цих матеріалів як червоних люмінофорів для білих світлодіодів та для освітлення при тепличному вирощуванні рослин.

Матеріали і методи дослідження. У роботі досліджувалися полікристалічні дрібнодисперсні порошки легованого іонами Європію та празеодиму ортофосфату бісмуту, одержані методом твердофазного синтезу. Структурні особливості зразків досліджувалися методом порошкової рентгенограми з використанням дифрактометра SHIMADZU XRD-6000. Люмінесцентні характеристики було одержано з використанням подвійного монохроматора ДФС-12. Як джерело збудження при записі спектрів фотолюмінесценції використовувався лазер з діодною накачкою ($\lambda_{\text{випр}} = 473 \text{ нм}$). Спектри збудження фотолюмінесценції записано з використанням ксенонової лампи ДКсЭЛ-1000 та призового монохроматора ДМР-4.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 1 подано рентгенограми досліджуваних порошків. Для випадку $\text{BiPO}_4:5\%\text{Eu}$ експериментальні дані добре узгоджуються зі стандартом для високотемпературної фази ортофосфату бісмуту, однак є також деяка незначна кількість низькотемпературної фази (монацит). Для зразків із празеодимом вміст низькотемпературної фази є більшим, ніж для зразків з Європієм, зокрема при 5% Pr^{3+} весь BiPO_4 має структуру монациту. Незважаючи на те, що обидві зазначені фази належать до моноклінної сингонії, оточення бісмуту, а відповідно, і РЗЕ іона, який займає аналогічну позицію, є більш спотвореним у випадку монациту. Відповідно, можна очікувати, що так звані надчутливі переходи в іонах празеодиму та Європію будуть більш інтенсивними саме для монациту.

Спектри фотолюмінесценції для досліджуваних зразків наведено на рис. 2. Як бачимо, для $\text{BiPO}_4:5\%\text{Eu}$ найбільш інтенсивними є піки, що пов'язані з переходом $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ в іоні Eu^{3+} , що свідчить про досить симетричне оточення цього РЗЕ іона. Надчутливий перехід $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ також має суттєву інтенсивність, але ймовірно його інтенсивність можна підвищити перетворивши структуру в монацит. Якщо порівнювати зі спектрами поглинання хлорофілів, то можна зазначити, що саме перехід

$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ непогано потрапляє в смугу поглинання хлорофілу б. Тобто, за умови збільшення інтенсивності поблизу 610 нм, $\text{BiPO}_4:\text{Eu}$ можна використовувати як ефективний червоний люмінофор у пристроях штучного освітлення в теплицях. Цікаво, що перехід $^5D_0 \rightarrow ^7F_3$ потрапляє в область сильного поглинання хлорофілу а, однак інтенсивність цього переходу зазвичай вкрай мала для різних матриць.

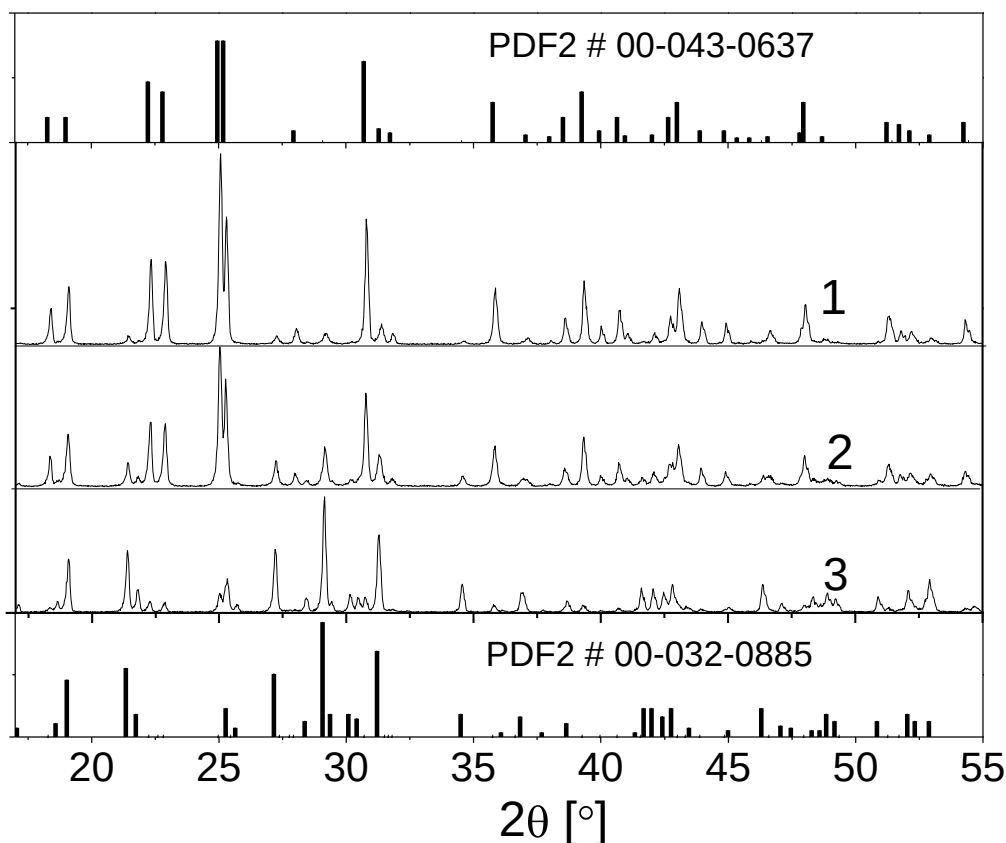


Рис. 1. Рентгенограми $\text{BiPO}_4:5\%\text{Eu}$ (1), $\text{BiPO}_4:0.5\%\text{Pr}$ (2) та $\text{BiPO}_4:5\%\text{Pr}$ (3); стандарти для високотемпературної та низькотемпературної фаз ортофосфату бісмуту наведено зверху та знизу рисунка, відповідно

У випадку зразків легованих празеодимом, найбільш інтенсивною є структурована смуга при 600 нм, яка пов'язана із суперпозицією випромінювальних переходів $^1D_2 \rightarrow ^3H_4$ та $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$ в іоні Pr^{3+} . Саме ця смуга найкраще співпадає зі смугою в спектрі поглинання хлорофілу б. Як видно з рисунка, форма смуги дещо змінюється при зміні концентрації домішки, що, можливо, пов'язано зі зміною структури BiPO_4 . Лінії надчутливого переходу $^3P_0 \rightarrow ^3F_2$ мають малу інтенсивність, але їх положення досить непогано узгоджується з положенням основної смуги поглинання хлорофілу а. На наш погляд, підбором матриці можна досягти зростання інтенсивності ліній цього надчутливого переходу. Решта ліній у спектрах $\text{BiPO}_4:\text{Pr}$ не є привабливими з погляду застосування цієї сполуки як червоного люмінофора.

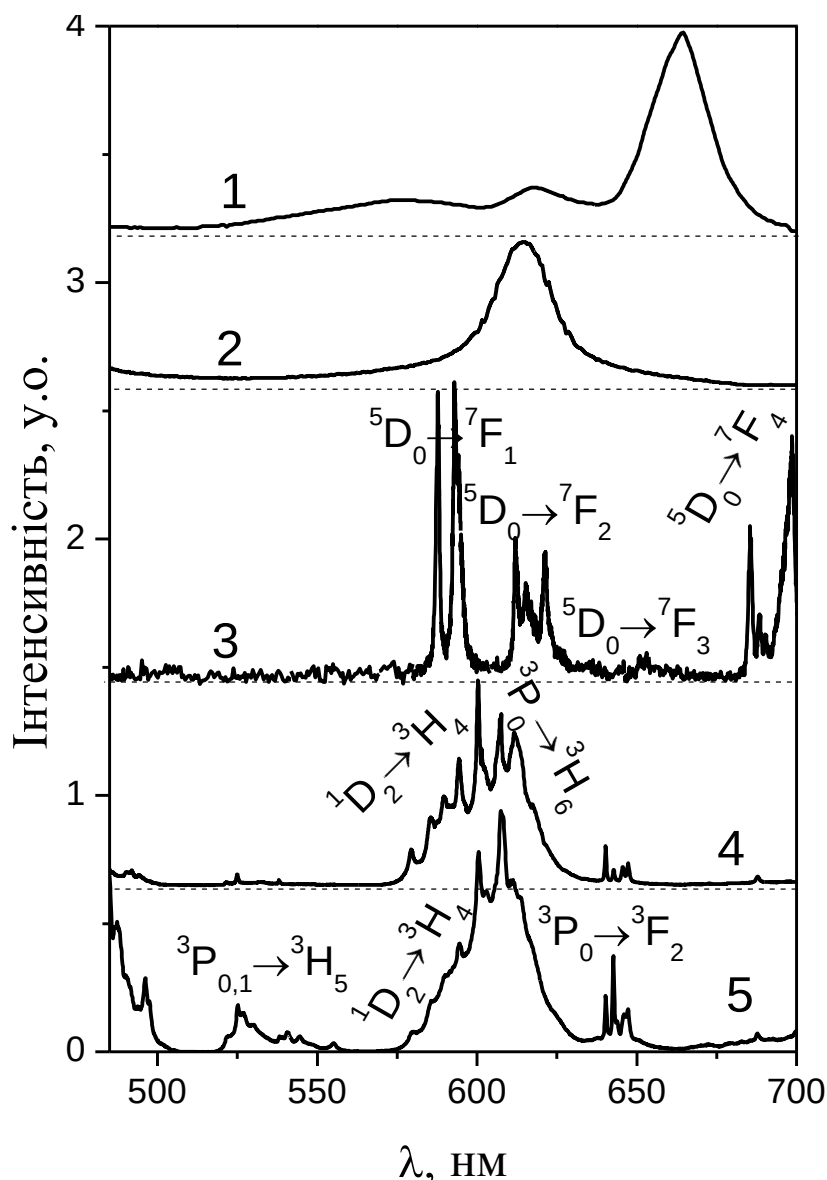


Рис. 2. Спектри поглинання хлорофілу а (1) і хлорофілу б (2) та спектри фотолюмінесценції $\text{BiPO}_4\text{:}5\%\text{Eu}$ (3), $\text{BiPO}_4\text{:}0,5\%\text{Pr}$ (4) та $\text{BiPO}_4\text{:}5\%\text{Pr}$ (5), виміряні при $\lambda_{36} = 473$ нм та $T = 300$ К; сигнал нульової інтенсивності для кожного зі спектрів 1–4 показано штриховими лініями

З сумісного аналізу спектрів випромінювання досліджуваних зразків та спектрів поглинання хлорофілів можна зробити висновок, що іони празеодиму є більш привабливими ніж іони європію для легування матриць – червоних люмінофорів для штучного освітлення при вирощуванні рослин. При цьому недоліком є погане узгодження спектрів фотолюмінесценції досліджуваних зразків зі спектром хлорофілу а, який є основним у питанні фотосинтезу. Тобто потрібно проводити подальший пошук матриць, в яких будуть інтенсивні смуги свічення в околі 650 нм.

Важливо також проаналізувати інформацію щодо спектрів збудження фотолюмінесценції для досліджуваних сполук. Відповідні результати наведено на рис. 3. Зразок $\text{BiPO}_4\text{:}5\%\text{Eu}$ в спектрі збудження фотолюмінесценції в діапазоні 300–500 нм містить лише піки переходів в

іонах європію з основного стану $^7F_0$ на збуджені стани, наведені на кривій 1 рис. 3. Як бачимо, для випадку зразка з європієм, збудження при 473 не дає змоги досягти максимальної інтенсивності фотолюмінесценції. Найкращим було б збудження в області переходу $^7F_0 \rightarrow ^5L_6$, однак це практично не вплинуло б на спектральний розподіл випромінювання, у чому можна переконатися порівнявши з літературними даними [5].

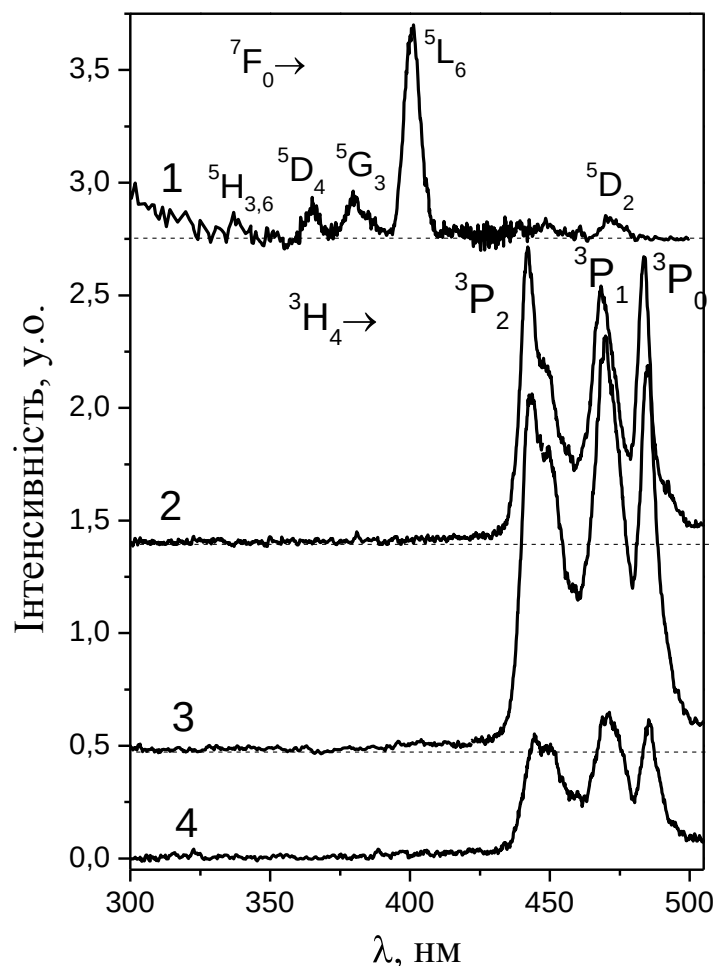


Рис. 3. Спектри збудження фотолюмінесценції $\text{BiPO}_4\text{:}5\%\text{Eu}$ (1), $\text{BiPO}_4\text{:}0,5\%\text{Pr}$ (2) та $\text{BiPO}_4\text{:}5\%\text{Pr}$ (3,4), виміряні для реєстрації на $\lambda = 615$ (1), 611,5 (2,3) та 643 нм (4) при $T = 300$ К; сигнал нульової інтенсивності для кожного зі спектрів 1–3 показано штриховими лініями

Для зразків легованих іонами празеодиму спектри збудження (криві 2–4 на рис. 3) у діапазоні 300–500 нм містять лише піки, які пов'язані з переходами в іоні Pr^{3+} . При цьому зазначені спектри доволі схожі як для реєстрацій в різних переходах в іоні празеодиму, так і для випадку різних концентрацій цього РЗЕ іона. Як бачимо, вибране збудження лежить в максимумі переходу $^3H_4 \rightarrow ^3P_0$, і є практично оптимальним з погляду інтенсивності фотолюмінесценції.

З вигляду спектрів збудження можна зробити висновок що сучасні промислові фіолетові (максимум випромінювання, $\lambda_{\text{макс}}$, близько 400 нм)

та сині ($\lambda_{\text{макс}} \approx 470$ нм) світлодіоди можна використовувати як джерела збудження фотолюмінесценції $\text{BiPO}_4:\text{Eu}$ та $\text{BiPO}_4:\text{Pr}$.

Висновки і перспективи. Досліджувані полікристалічні зразки легованого іонами Eu^{3+} та Pr^{3+} ортофосфату бісмуту BiPO_4 виявляють інтенсивну червону люмінесценцію за кімнатної температури та збудження з $\lambda_{36} = 473$ нм. Усі лінії випромінювання пов'язані з переходами в оболонках РЗЕ іонів, тоді як свічення матриці відсутнє.

Загальний аналіз люмінесцентних властивостей легованого європієм та празеодимом BiPO_4 разом зі спектрами поглинання хлорофілів, дає змогу стверджувати, що досліджувані матеріали є перспективними червоними люмінофорами для агробіологічних застосувань.

Список літератури

1. Li G., Lin J. Phosphors for field emission display: Recent advances in synthesis, improvement, and luminescence properties // *Phosphors, Up Conversion Nano Particles, Quantum Dots and Their Applications*. – Springer, Singapore, 2016. – P. 41–82.
2. Naidu B. S. et al. BiPO_4 : a better host for doping lanthanide ions // *Dalton Transactions*. – 2012. – Vol. 41, № 11. – P. 3194–3203.
3. Zhao M. et al. Is BiPO_4 a better luminescent host? Case study on doping and annealing effects // *Inorganic chemistry*. – 2012. – Vol. 52, №. 2. – P. 807–815.
4. Червінський Л. С. Обґрунтування ефективного світлодіодного освітлення у спорудах закритого ґрунту / Червінський Л. С., Книжка Т. С., Романенко О. І. // *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. – 2018. – №. 268 – С. 111–118.
5. Zhong J. et al. Hydrothermal synthesis and luminescence properties of Eu^{3+} and Sm^{3+} codoped BiPO_4 // *Journal of Rare Earths*. – 2014. – Vol. 32, №. 1. – P. 5–11.

References

1. Li, G., & Lin, J. (2016). Phosphors for Field Emission Display: Recent Advances in Synthesis, Improvement, and Luminescence Properties. In *Phosphors, Up Conversion Nano Particles, Quantum Dots and Their Applications* (pp. 41–82). Springer, Singapore.
2. Naidu, B. S., Vishwanadh, B., Sudarsan, V., & Vatsa, R. K. (2012). BiPO_4 : a better host for doping lanthanide ions. *Dalton Transactions*, 41(11), 3194–3203.
3. Zhao, M., Li, L., Zheng, J., Yang, L., & Li, G. (2012). Is BiPO_4 a better luminescent host? Case study on doping and annealing effects. *Inorganic chemistry*, 52 (2), 807–815.
4. Chervinskyi, L. S., Knyzhka, T. S., Romanenko O. I. (2018). Obgruntuvannia efektyvnogo svitlodiodnoho osvittlennia u sporudakh zakrytoho gruntu [The substantiation of effective led lighting in the construction of closed soil]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy*, 268, 111–118.
5. Zhong, J., Weiren, Z., Licai, L., & Jianqing, W. (2014). Hydrothermal synthesis and luminescence properties of Eu^{3+} and Sm^{3+} codoped BiPO_4 . *Journal of Rare Earths*, 32 (1), 5–11.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ОРТОФОСФАТА БИСМУТА ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ ЕВРОПИЯ И ПРАЗЕОДИМА

В. В. Бойко,
В. П. Чорний,
С. Г. Неделько,
К. В. Теребиленко,
Н. С. Слободяник

Аннотация. Представлены результаты исследования люминесцентных свойств ортофосфата висмута BiPO_4 , легированного ионами Eu^{3+} и Pr^{3+} . Проанализирована возможность применения этих веществ в качестве люминесцентных материалов для источников света при выращивании растений в теплицах.

Установлено, что при легировании BiPO_4 как ионами Eu^{3+} , так и Pr^{3+} , исследуемые образцы проявляют интенсивную красную фотолюминесценцию при комнатной температуре. Как спектры фотолюминесценции, так и ее возбуждения для каждого из случаев определяются переходами в ионах редкоземельных элементов, а свечение и соответственное возбуждение фосфатной матрицы отсутствует. Среди линий всех излучательных переходов в случае легирования ионами Eu^{3+} наилучшей корреляцией со спектрами поглощения хлорофилла б обладают линии перехода $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$. Для случая легирования ионами Pr^{3+} положения линий переходов $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_6$ и $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{F}_2$ коррелируют с полосами поглощения хлорофилла б и хлорофилла а соответственно.

Ключевые слова: фотолюминесценция, фосфат висмута, красный люминофор, Eu^{3+} , Pr^{3+}

LUMINESCENCE PROPERTIES OF BISMUTH ORTHOPHOSPHATE DOPED WITH EUROPIUM AND PRASEODYMIUM IONS

V. Boyko,
V. Chornii,
S. Nedilko,
K. Terebilenko,
M. Slobodyanik

Abstract. The results of luminescent properties investigations of bismuth phosphate BiPO_4 doped with Eu^{3+} and Pr^{3+} ions are carried out. The possibility of application of the compounds studied as light sources for greenhouse cultivation of plants.

It is found that in the cases of BiPO_4 doping with both Eu^{3+} and Pr^{3+} ions studied samples reveal intensive red luminescence at room temperature. Both emission and excitation spectra determined by transitions in rare-earth ions and in the same time no emission and corresponding excitation of phosphate

host was not observed. Among all radiative transitions in case of Eu^{3+} -doping lines of $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ transition better fits to absorption spectra of chlorophyll. There is correlation between bands $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_6$ and $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{F}_2$ in case of Pr^{3+} ions with corresponding bands of chlorophyll a and chlorophyll b.

Keywords: photoluminescence, bismuth phosphate, red luminophore, Eu^{3+} , Pr^{3+}

УДК 631.371

ЗАСОБИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПОЛИВУ В СПОРУДАХ ЗАХИЩЕНОГО ҐРУНТУ

Л. Є. НИКИФОРОВА, доктор технічних наук, професор

М. О. СПОДОБА, студент магістратури

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: profnikiforova@gmail.com

Анотація. Роботу присвячено розгляду методів програмування поливу в спорудах захищеного ґрунту. Розглянуто різні методи програмування поливу й засоби отримання інформації для них. Наведено експериментальні результати щодо визначення величини транспірації для програмування поливу у спорудах захищеного ґрунту. Потреба рослин у воді, що йде переважно на транспірацію, задовольняється всмоктуванням її корінням з ґрунту. Витрати на воду та її підготовку для поливу становлять помітну частину в загальних витратах при вирощуванні продукції в теплицях. Проте економія води, яка не призводить до зниження врожайності, можлива тільки при правильному визначенні водного режиму рослин, тобто, при правильному програмуванні поливу у спорудах захищеного ґрунту.

Метою дослідження є розробка системи автоматизованого поливу рослин, яка дає змогу враховувати потреби рослин у вологості та придатна для використання у виробничих умовах.

У процесі дослідження було встановлено, що величина транспірації може бути визначена за емпіричною формулою. Використання програмованого поливу в спорудах захищеного ґрунту, залежно від параметрів мікроклімату, дає змогу знизити витрати електроенергії та підвищити адаптаційну схильність рослин до збурюючих факторів.

Ключові слова: полив, захищений ґрунт, програмування, транспірація

Актуальність. Рослини як в умовах відкритого, так і захищеного ґрунту, використовують сонячну радіацію, двоокис вуглецю з атмосфери, воду і поживні речовини для виробництва біомаси, інтенсивність якої визначається інтенсивністю фотосинтезу [1, с. 107]. Потреба рослин у

воді, що йде в основному на транспірацію, задовольняється всмоктуванням її корінням з ґрунту. У свою чергу, також постійно відбувається випаровування води з ґрунту. Отже, сумарне випаровування, визначає кількість води, яке в умовах захищеного ґрунту відновлюється тільки поливом. Витрати на воду та її підготовку для поливу становлять помітну частину в загальних витратах при вирощуванні продукції в теплицях, проте економія води, яка не призводить до зниження врожайності, можлива тільки при правильному визначенні водного режиму рослин, тобто, при правильному програмуванні поливу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Програмування поливу, таким чином, є поєднанням технічних процедур, призначених для передбачення та визначення часу й тривалості поливу. Сучасні методи програмування поливу можна, розділити щодо застосування для прийняття рішень інформації на три групи:

1. Засновані на вимірі змісту вологи в ґрунті.
2. Засновані на визначенні водного режиму рослин.
3. Засновані на вимірі параметрів мікроклімату.

Перша група методів полягає в підтримці вологості ґрунту в межах між двома її рівнями. Для виміру поточних значень вологості ґрунту використовуються тензиометри, водовідмітчики, динамічні рефлектметри і системи сканування середовища (рис. 1). Перші два із зазначених вище вимірювальних перетворювачів засновані на вимірі сили натягу рідини, тобто, зусилля, яке повинні докласти коріння рослин для вилучення вологи з ґрунту. Ці вимірювачі набули значного поширення завдяки невисокій вартості й простоті установки, проте застосування непрямого методу виміру істотно знижує їх точність, яка також істотно залежить від типу й температури ґрунту. Динамічні рефлектметри, засновані на принципі виміру часу затримки електромагнітного імпульсу в ґрунті, незважаючи на свою високу точність, ще не набули значного поширення поза межами дослідних центрів через їх високу вартість. Системи сканування середовища являють собою набір датчиків, розташованих на різній глибині й приєднаних до реєстратора даних. Проте впровадження таких систем у виробництво стримується їх високою вартістю.

Таким чином, для більш широкого впровадження методів програмування поливу, заснованих на вимірі вологості ґрунту, необхідно подальше вдосконалення вимірювальних перетворювачів. Проте не слід забувати, що сам водний режим рослин визначається не тільки вологістю ґрунту. Тому в останній час проводяться дослідження для розвитку методів програмування поливу, заснованих на безпосередньому вимірі водного режиму рослин. Ці методи засновані на вимірі діаметра стебла або вегетативних органів (рис. 2) у нічний і денний час із визначенням різниці між цими величинами, яка пропорційна об'єму води, що випаровується рослиною при транспірації. Істотним недоліком таких методів є помітна різниця величини транспірації для різних видів рослин та її залежність від стадії розвитку рослини та її окремих органів.



Рис. 1. Прилади для визначення вологості ґрунту (зліва направо): тензиометр, водовідмітки, динамічний рефлектметр і датчик системи сканування середовища



Рис. 2. Прилади для вимірювання діаметра плодів і стебел томатів

Іншим різновидом датчиків водяного режиму рослин є датчики водного потоку (рис. 3), які дають змогу проводити виміри у режимі реального часу. Основним недоліком таких приладів є їх висока вартість і необхідність під час прийняття рішення про полив, враховувати значення сонячної радіації та величини дефіциту тиску водяних парів.

Загальним недоліком зазначених приладів є також незручність їх застосування у виробничих умовах, труднощі у виборі репрезентативних рослин і кількості встановлюваних датчиків. Усі ці проблеми істотно стримують застосування таких датчиків у реальному виробництві. Такі системи можуть застосовуватися в основному для розробки або уточнення графіків поливів в умовах повторного вирощування одного виду рослин при точному підтриманні параметрів мікроклімату в теплиці.



Рис. 3. Датчик водяного потоку, встановлений на стеблі

Мета дослідження – розробка системи автоматизованого поливу рослин, яка дає змогу враховувати потреби рослин у вологості та придатна для використання у виробничих умовах.

Матеріали і методи дослідження. З огляду на зазначені вище причини, найбільш простим і доступним для застосування у виробничих умовах є програмування поливу на основі параметрів клімату. Ці методи засновані на оцінці значень параметрів мікроклімату і стадії розвитку рослин (перш за все, враховується значення площі листя і листового індексу), які дають змогу визначити потребу у воді. Для визначення потреби у воді для теплиць без ґрунту розроблені моделі оцінки транспірації для різних видів рослин [2, с. 55; 3, с. 70]. При вирощуванні рослин у ґрунті за рекомендацією ФАО [4, с. 20–31] з достатнім ступенем точності можна дізнатися потребу у воді (тобто сумарне випаровування) Твип, прийняти пропорційній величині транспірації Ттр з поправочним коефіцієнтом К, визначеним для конкретної споруди з можливістю уточнюючої поправки на вид рослин та стадії розвитку:

$$T_{вип} = K \cdot T_{тр} \quad (1)$$

Оскільки в спорудах захищеного ґрунту температура підтримується з достатньо високою точністю, головним збурюючим фактором, який в основному і визначає величину транспірації, є величина потоку сонячної радіації. Великі споруди через наявність достатнього об'єму ґрунту мають велику аккумуляючу здатність, тому потреба в поливній воді може визначатися за денною сумою сонячної радіації, що надходить в теплицю, або за багаторічними метеорологічними даними.

Величина поправочного коефіцієнта для споруди в цілому може бути легко визначена наступним чином. Величина транспірації

обчислюється за кількістю рослин, помноженою на виміряну за допомогою датчика водяного потоку величину транспірації для однієї рослини. У свою чергу, величина сумарного випаровування може бути визначена з рівняння водного балансу при вимірюванні величин обсягу поливу R і дренажу L , а також значень вологовмісту ґрунту в теплиці $W_{поч}$ і $W_{кін}$, відповідно, на початку і наприкінці періоду часу (зазвичай за тиждень) за результатами виміру вологості ґрунту:

$$T_{вип} = W_{поч} - W_{кін} + R - L. \quad (2)$$

Для визначення вологості ґрунту використовувався динамічний рефлектометр Trase Model 6005x1 (SoilMoisture Equipment Corp., США). Встановлення таким чином співвідношення між $T_{тр}$, $T_{вип}$ і величиною денного потоку сонячної радіації дає змогу здійснювати програмування поливу по багаторічних метеорологічних даних (переважно для великих теплиць) або за даними виміру денної суми сонячної радіації, проникаючої в теплицю.

Результати досліджень та їх обговорення. Під час наших вимірювань було встановлено, що величина транспірації може бути визначена за емпіричною формулою, виходячи з величини виміряної сумарної радіації в теплиці $R_{внутр}$ і номера дня в році N :

$$T_{тр} = (0,30 + 0,002 \cdot N) \cdot R_{внутр} \text{ (якщо, } N < 210); \quad (3)$$

$$T_{тр} = (1,35 - 0,003 \cdot N) \cdot R_{внутр} \text{ (якщо, } N > 210). \quad (4)$$

З достатнім ступенем точності величина сумарної радіації в теплиці $R_{внутр}$ може бути визначена по величині сумарної сонячної радіації, виміряній на метеостанції $R_{зовн}$, з урахуванням коефіцієнта прозорості теплиці k :

$$R_{внутр} = k \cdot R_{зовн}. \quad (5)$$

На рис. 4 наведено результати виміру $T_{тр}$ в експериментальній теплиці. Сама ж разова доза поливу визначається з бажаної рівномірності вологості ґрунту (більше число поливів і менша разова його величина відповідає меншим коливанням величини вологості ґрунту).

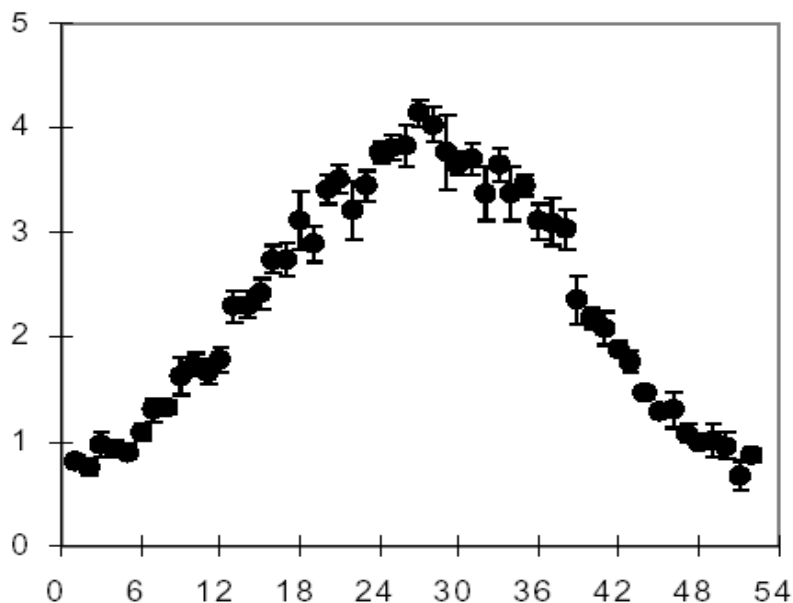


Рис. 4. Виміряне значення транспірації в експериментальній теплиці (у міліметрах за день) по тижнях року

Висновки і перспективи. Використання програмованого поливу в спорудах захищеного ґрунту, залежно від параметрів мікроклімату, дає змогу знизити витрати електроенергії та підвищити адаптаційну схильність рослин до збурюючих факторів.

Список літератури

1. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений / [Н. Н. Третьяков, Е. И. Кошкин, Н. М. Макрушин и др.] ; под ред. Н. Н. Третьякова. – М. : Колос, 1998. – 640 с.
2. Stanghellini C. 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Ph. D. Dissertation. – Wageningen: Agricultural University, 1987. – 150 p.
3. Boulard T., Jemaa R. Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control // Acta Horticulturae. – 1993. – № 335. – P. 381–387.
4. Doorenbos J., Pruitt W. O. Las necesidades de agua de los cultivos // FAO Riego y Drenaje, 1977. – № 24.

References

1. Tret'yakov, N. N., Koshkin, E. I., Makrushin N. M. et al.; pod red. N. N. Tret'yakova (1998). Fiziologiya i biokhimiya sel'skokhozya-ystvennykh rasteniy [Physiology and biochemistry of agricultural plants]. M.: Kolos, 640.
2. Stanghellini, C. (1987). Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Ph. D. Dissertation. Wageningen: Agricultural University, 150.
3. Boulard, T., Jemaa, R. (1993). Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. Acta Horticulturae, 335, 381–387.
4. Doorenbos, J., Pruitt, W. O. (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. FAO Riego y Drenaje, 24.

**СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ
ПОЛИВА В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА**

**Л. Е. Никифорова,
М. О. Сподоба**

Аннотация. Работа посвящена рассмотрению методов программирования полива в сооружениях защищенного грунта. Рассмотрены различные методы программирования полива и средства получения информации для них. Приведены экспериментальные результаты по определению величины транспирации для программирования полива в сооружениях защищенного грунта. Потребность растений в воде, идет в основном на транспирацию, удовлетворяется всасыванием ее корнями из почвы. Расходы на воду и ее подготовку для полива составляют заметную часть в общих затратах при выращивании продукции в теплицах, однако экономия воды, не приводит к снижению урожайности, возможна только при правильном определении водного режима растений, то есть, при правильном программировании полива в сооружениях защищенного грунта.

Целью исследования является разработка системы автоматизированного полива растений, которая позволяет учитывать потребности растений во влажности и пригодна для использования в производственных условиях.

При исследовании было установлено, что величина транспирации может быть определена по эмпирической формуле. Использование программируемого полива в сооружениях защищенного грунта, в зависимости от параметров микроклимата, позволяет снизить расход электроэнергии и повысить адаптационную склонность растений к возмущающим факторам.

Ключевые слова: полив, защищенный грунт, программирование, транспирация

INFORMATION SUPPORT AUTOMATION IRRIGATION IN THE GREENHOUSE

**L. Nikiforova,
M. Spodoba**

Abstract. The work is devoted to the consideration of the methods of programming watering in buildings of protected soil. Different methods of watering programming and means of obtaining information for them are considered. Experimental results are given for determining the value of transpiration for programming of irrigation in protected ground structures. The need for plants in water, which goes mainly to transpiration, is satisfied with absorption of its roots from the soil. The cost of water and its preparation for irrigation make a significant part in the total costs of growing the products in greenhouses, but saving water, which does not lead to lower yields, is possible only with the correct definition of water regime of plants, that is, with proper programming of irrigation in structures of protected soil.

The aim of the study is to develop a system of automatic watering of plants, which allows to take into account the needs of plants in humidity and suitable for use in production conditions.

The study found that the transpiration value can be determined by the empirical formula. The use of programmable irrigation in protected ground structures, depending on the parameters of the microclimate, allows to reduce energy consumption and increase adaptive predisposition of plants to perturbing factors.

Keywords: *irrigation, protected soil, programming, transpiration*

УДК 681.516.75: 631.234

АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН У ТЕПЛИЦІ З УРАХУВАННЯМ ЇХ СТАНУ

В. П. ЛИСЕНКО, доктор технічних наук, професор
Т. І. ЛЕНДЄЛ, кандидат технічних наук, старший викладач
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: taraslendel@rambler.ru

Анотація. *Створено інтелектуальний алгоритм формування стратегій керування процесом виробництва овочевої продукції у теплиці з урахуванням станів рослин. Наведено структури бази даних та бази знань, що використовуються для його реалізації в сучасних високотехнологічних теплицях.*

Запропонований алгоритм функціонує на основі інформації про стани рослин, параметри атмосфери в теплиці, показники фітостану, цінову політику на ринку, про вартість енергоносіїв та виробленої продукції, максимізуючи прибуток підприємства за допомогою формування стратегій керування електротехнічними комплексами, що супроводжують виробництво.

Ключові слова: *підсистема, алгоритм, керування процесом, вирощування, теплиця, рослина*

Актуальність. *Технології закритого ґрунту забезпечують споживачів рослинною продукцією впродовж календарного року, що робить їх привабливими у багатьох країнах світу. При цьому використовують спеціалізоване обладнання, здатне формувати в закритих приміщеннях найсприятливіші для рослин умови, що дає можливість отримувати високі врожаї. Водночас, навіть сучасні системи забезпечення процесу вирощування рослин, як правило, не відстежують*

© В. П. Лисенко, Т. І. Лендєл, 2018

їх стани як реакцію на дії різноманітних збурень та керуючих дій, що суттєво ускладнює накопичення знань про рослину та можливість прогнозувати її врожайність. У зв'язку з вищезазначеним, виникає потреба у розробці складової системи забезпечення виробництва рослинної продукції в спорудах закритого ґрунту, що оцінює особливості рослини для формування відповідних стратегій керування таким об'єктом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У спорудах закритого ґрунту основними факторами, що впливають на процес вирощування рослинної продукції є температура, вологість повітря, концентрація CO₂ в атмосфері теплиці, тривалість світлового дня, склад та інтенсивність світлового випромінювання. Стандартизовані технології формують певні вимоги до зазначених факторів, а їх утримання на визначених рівнях сприяє розвитку рослини та дає змогу отримати максимальну кількість продукції [1]. Реалізують ці задачі спеціалізовані системи автоматизації, проте всі вони на сьогодні функціонують без урахування інформації про стани рослин [2, 3]. Вирішення цієї проблеми пропонується шляхом використання інтелектуальних алгоритмів керування електротехнічними комплексами, що забезпечують відповідні технологічні параметри та режими.

Мета дослідження – розробити інтелектуальний алгоритм формування стратегій керування електротехнічним комплексом у теплиці з урахуванням станів біологічної складової об'єкта керування, параметрів мікроклімату та цінової політики на ринку енергоносіїв та виробленої продукції.

Матеріали і методи дослідження. За результатами досліджень, що проводилися в діючій теплиці та в камері штучного клімату, було побудовано математичну модель залежності якості томатів від дії технологічних параметрів. При цьому вхідними факторами були: температура рослин, температура і вологість повітря, газовий склад повітря, освітленість [5, 7]. Таку модель було використано для формування інтелектуального алгоритму керування електротехнічними комплексами в теплиці на основі застосування штучних нейронних мереж та методу Харрінгтона, що дало можливість максимізувати прибуток підприємства [4–7].

Результати досліджень та їх обговорення. Підтримання в теплиці параметрів вирощування рослинної продукції здійснюється відповідними системами автоматизації. При цьому, як за результатами власних досліджень, так і з літературних джерел встановлено, що основним затратним фактором впливу на розвиток і врожайність томатів є температура повітря в теплиці. Крім того, збільшення маси продукції не завжди призводить до отримання максимально можливого прибутку, оскільки суттєву роль при цьому відіграє якість виробленої продукції.

З огляду на зазначене вище, в інтелектуальному алгоритмі, що пропонується для керування процесом вирощування томатів, коли якість рослинної продукції використовується як зворотний зв'язок, за критерій оптимізації взято максимізацію прибутку виробництва [4, 5]. При цьому передбачено також використання фітотемпературного критерію [6].

Оскільки реалізація інтелектуального алгоритму потребувала наявності та взаємодії бази знань та бази даних, було сформовано вимоги до їх структури, узагальнений вигляд якої подано на рис.1.

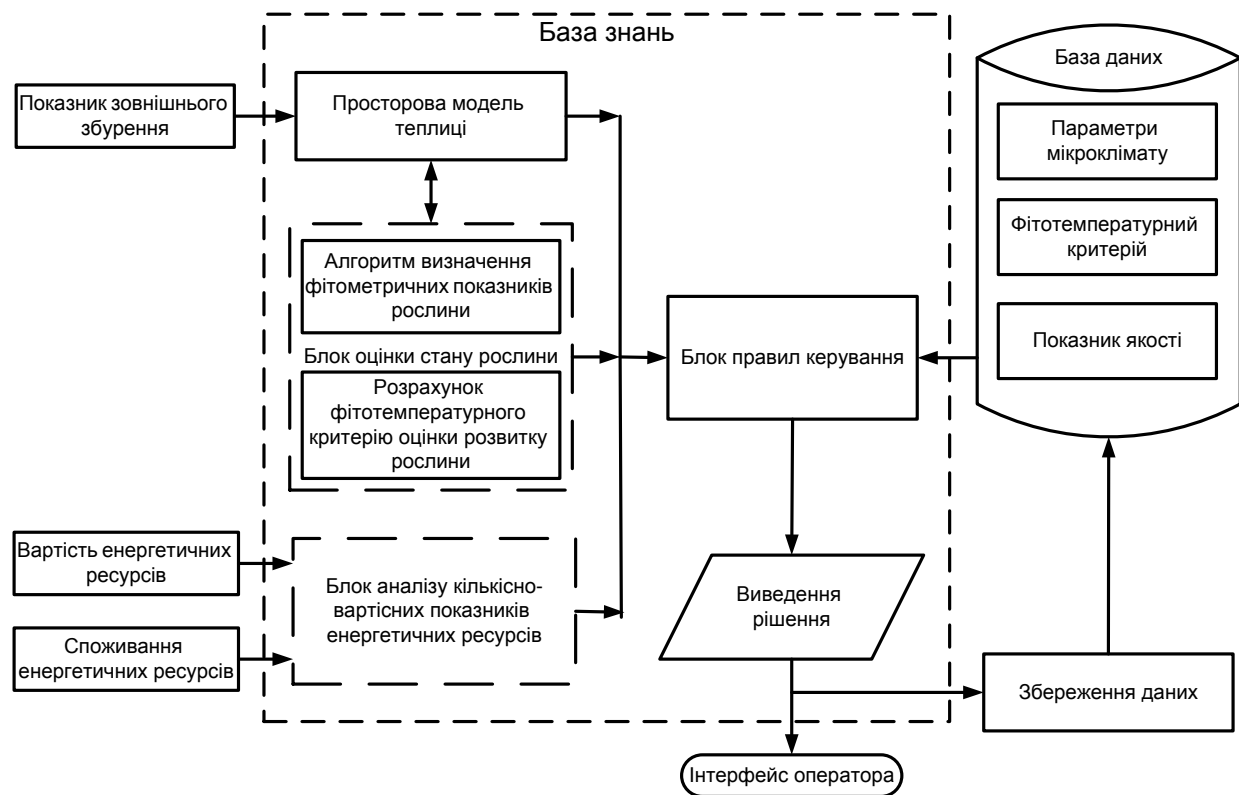


Рис. 1. Структура бази знань і бази даних інтелектуального алгоритму

Деталізацію змісту інтелектуального алгоритму керування електротехнічними комплексами теплиці при вирощуванні томатів подано на рис. 2.

Згідно з блок-схемою алгоритму керування електротехнічним комплексом теплиці, виконуються такі дії:

- вимірюються поточні значення температури рослини ($t_{\text{роsl.}}$), повітря ($t_{\text{пов.}}$), вологості повітря ($\phi_{\text{пов.}}$), зовнішнього повітря ($t_{\text{зовн.}}$), визначаються поточні витрати енергоресурсів (B) при вирощуванні томатів, оцінюються якість плодів (Y) за їх зображеннями, визначається поточний час вимірювань ($t_{\text{пот.}}$) та вводиться час закінчення вегетації ($t_{\text{кінц.}}$) з часом дискретизації (Δt) при вимірюванні;
- розраховуються середньостатистичні значення температур рослини та повітря;
- розраховується, з урахуванням часу вирощування томатів, діапазон допустимих температур повітря;

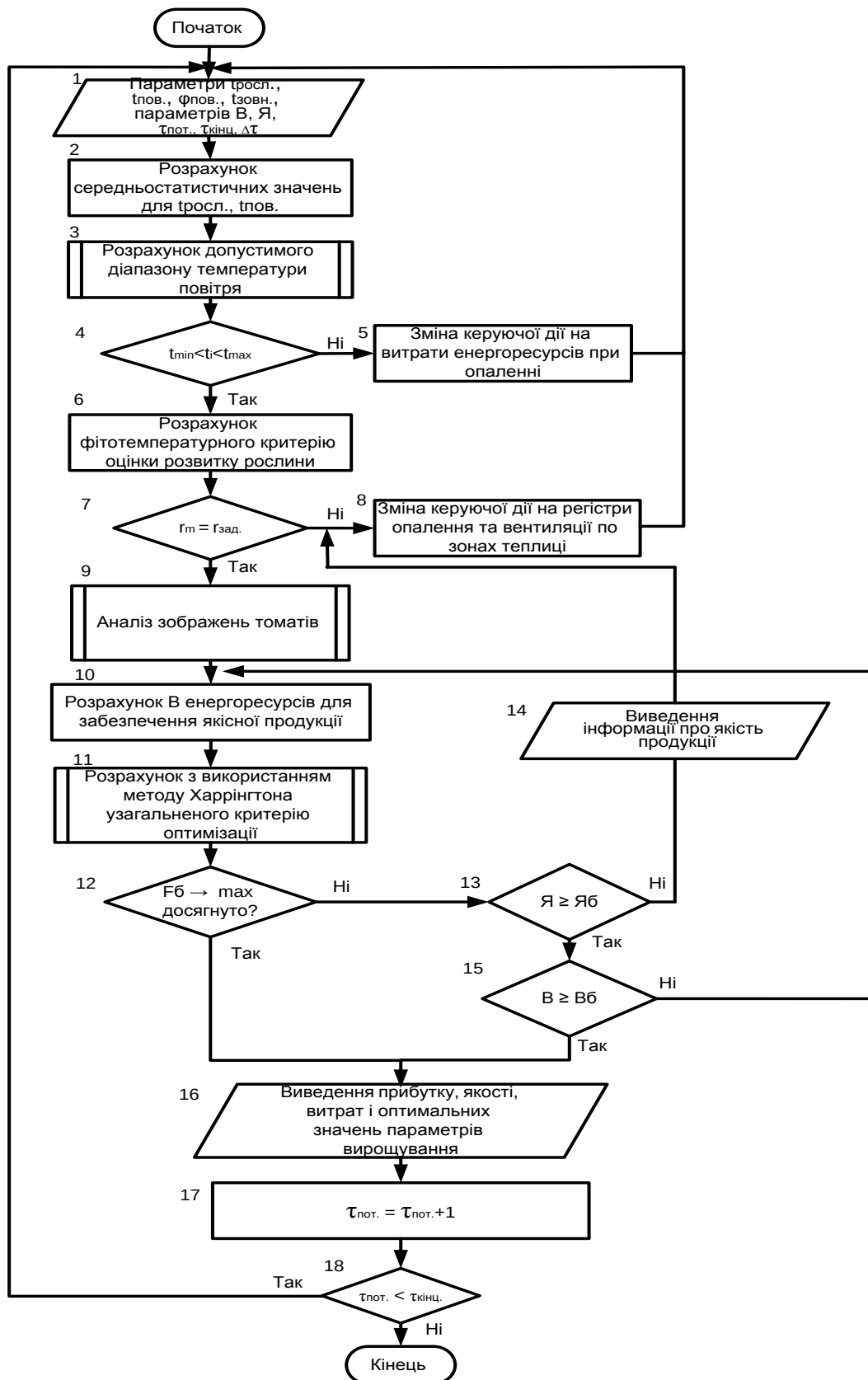


Рис. 2. Узагальнений інтелектуальний алгоритм функціонування системи керування електротехнічним комплексом

- перевіряється умова відповідності температури повітря в теплиці з визначеними межами температури,
- де t_i – поточне значення температури повітря;
- t_{max} , t_{min} – верхня та нижня межа температури повітря;
- корегується керуюча дія на систему теплозабезпечення за умов, якщо не виконуються умови блоку 4;
- розраховується фітотемпературний критерій рослини;
- перевіряється умова відповідності фітотемпературного критерію (r_m) з його заданим значенням ($r_{зад.}$);
- корегуються керуючі дії регістрів системи опалення та вентиляції за умов, що вимога блоку 7 не виконується (для вирівнювання температури за площею теплиці);
- аналізується зображення томатів із використанням вейвлет-перетворень та оцінюється показник їх якості на основі використання нейронних мереж;
- розраховуються витрати енергоресурсів для отримання якісної продукції;
- розраховується з використанням методу Харрінгтона узагальнений критерій оптимізації (F_b) [7];
- реалізується оптимізація, згідно з узагальненим критерієм оптимальності [7];
- перевіряється показник якості рослинної продукції, і якщо він менший від бажаного значення (Y_b), відбувається перехід до блока 8;
- виводиться оператору інформація щодо показника якості для прийняття рішення;
- перевіряється показник видатків, і якщо він не відповідає бажаному значенню (B_b), виконується перехід на блок 10;
- виводиться прибуток, показник якості, оптимальні значення параметрів вирощування овочевої продукції;
- визначення часу для наступних вимірювань;
- порівняння поточного часу вимірювань ($t_{пот.}$) у теплиці з часом закінчення вегетації ($t_{кінц.}$).

Висновки і перспективи. Розроблено інтелектуальний алгоритм керування електротехнічними комплексами, що супроводжують технологію вирощування томатів у сучасних спорудах закритого ґрунту, основу якого становить база даних та база знань із використанням нейронних мереж, де якість рослинної продукції є зворотним зв'язком.

Список літератури

1. Development of an automation system for greenhouse seedling production management using radio-frequency-identification and local remote sensing techniques / I.-Chang Yanga, Kuang-Wen Hsiehb, Chao-Yin Tsaic, Yu-I. Huangb, Yu-Liang Chenc, Suming Chen // Engineering in Agriculture, Environment and Food. – 2014. – Vol. 7, issue 1, February. – P. 52–58.
2. Лозинський А. О. Електромеханічні системи автоматизації технологічних об'єктів з інтелектуальним керуванням : автореф. дис. на здобуття

наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи" / А. О. Лозинський ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів, 2004. – 41 с.

3. Беликов Ю. М. Автоматизация управления микроклиматом в тепличных комбинатах / Ю. М. Беликов // Техника в сельском хозяйстве. – 1984. – № 1. – С. 26–29.

4. Korobiichuk I., Lysenko V., Reshetiuk V., Lendiel T., Kamiński M. (2016, May). Energy-efficient electrotechnical complex of greenhouses with regard to quality of vegetable production. In International Conference on Systems, Control and Information Technologies 2016 (pp. 243–251). Springer, Cham.

5. Лисенко В. П. (2015). Моделі для формування оптимальних стратегій керування у спорудах закритого ґрунту / В. П. Лисенко, Т. І. Лендел // Вісник аграрної науки, (10), 45–48.

6. Лисенко В. П. (2013). Фітотемпературний критерій оцінки розвитку рослини / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, Т. І. Лендел // Енергетика і автоматика, (3), 122–128.

7. Лисенко В. П. (2015). Оптимізація вирощування томатів в теплиці з використанням функції бажаності Харрінгтона / В. П. Лисенко, В. О. Мірошник, Т. І. Лендел // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів, 23 (23).

References

1. Development of an automation system for greenhouse seedling production management using radio-frequency-identification and local remote sensing techniques (2014). / I.-Chang Yanga, Kuang-Wen Hsiehb, Chao-Yin Tsaic, Yu-I. Huangb, Yu-Liang Chenc, Suming Chen // Engineering in Agriculture, Environment and Food, 7, 1, February. – P. 52–58.

2. Lozynskyi, A. O. (2004). Elektromekhanichni systemy avtomatyzatsii tekhnolohichnykh ob'ektiv z intelektualnym keruvanniam : avtoref. dys. na здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи / А. О. Лозинський ; Нats. un-t "Lviv. politehnika". Lviv, 41.

3. Belykov, Yu. M. (1984). Avtomatyzatsiya upravleniya mykroklymatom v teplychnykh kombynatakh / Yu. M. Belykov // Tekhnika v selskom khoziaistve. – 1, 26–29.

4. Korobiichuk, I., Lysenko, V., Reshetiuk, V., Lendiel, T., & Kamiński, M. (2016, May). Energy-efficient electrotechnical complex of greenhouses with regard to quality of vegetable production. In International Conference on Systems, Control and Information Technologies 2016 (pp. 243–251). Springer, Cham.

5. Lysenko, V. P., & Lendiel, T. I. (2015). Modeli dlia formuvannia optymalnykh stratehii keruvannia u sporudakh zakrytoho ґruntu. Visnyk ahrarnoi nauky, (10), 45–48.

6. Lysenko, V. P., Bolbot, I. M., & Lendiel, T. I. (2013). Fitotemperaturnyi kryterii otsinky rozvytku roslyny. Enerhetyka i avtomatyka, (3), 122–128.

7. Lysenko, V. P., Miroshnyk, V. O., & Lendiel, T. I. (2015). Optymizatsiia vyroshchuvannia tomativ v teplytsi z vykorystanniam funktsii bazhanosti Kharrinhtona. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv, 23 (23).

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ В ТЕПЛИЦЕ С УЧЕТОМ ИХ СОСТОЯНИЯ

**В. Ф. Лысенко,
Т. И. Лендел**

Аннотация. Создан интеллектуальный алгоритм формирования стратегий управления процессом производства овощной продукции в теплице с учетом состояния растений. Приведены структуры базы данных и базы знаний, используемых для его реализации в современных высокотехнологичных теплицах.

Предложенный алгоритм функционирует на основе информации о состоянии растений, параметров атмосферы в теплице, показателей фитосостояния, ценовой политики на рынке о стоимости энергоносителей и продукции, максимизируя прибыль предприятия путем формирования стратегий управления электротехническими комплексами, сопровождающими производство.

Ключевые слова: подсистема, алгоритм, управление процессом, выращивание, теплица, растение

ALGORITHM OF FORMATION OF CONTROL STRATEGIES ON THE PROCESS OF GROWTH OF PLANTS IN THE HEAT WITH THEIR CONSIDERATIONS

**V. Lysenko,
T. Lendiel**

Abstract. An intellectual algorithm for forming strategies for managing the process of production of vegetable products in the greenhouse, taking into account the plant condition, was created. The structures of the data base and the knowledge base used for its implementation in modern high-tech greenhouses are presented.

The proposed algorithm functions on the basis of information about the plant condition, the parameters of the atmosphere in the greenhouse, phytosanitary indicators, the price policy on the market for the cost of energy carriers and manufactured products, maximizing the profit of the enterprise through the formation of management strategies of the electrotechnical systems that accompany the production.

Keywords: subsystem, algorithm, process control, growing, greenhouse, plant

ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ ТА ПЕРЕРОБКИ РІЗНИХ ВИДІВ БІОМАСИ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

С. А. ШВОРОВ, доктор технічних наук, професор

В. Є. ЛУКІН, кандидат педагогічних наук

Д. С. КОМАРЧУК, кандидат технічних наук

В. І. ТРОХАНЯК, кандидат технічних наук

В. В. УСТИМЧУК, інженер

**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**

E-mail: lukin2008@ukr.net

Анотація. Як свідчить практика, в існуючих біогазових установках (БГУ) не передбачається застосування різних видів сезонної біомаси, а їх неоптимальне застосування може призвести до значного зменшення виходу біогазу. Перспективним напрямом усунення зазначеного недоліку є розробка спеціальної технології підготовки та переробки різних видів біомаси, за допомогою якої, на основі деструкційної (кавітаційної) обробки сировини та використання спеціальних домішок, створюються необхідні умови для отримання максимально можливого об'єму біогазу. При цьому, для різних видів сировини здійснюється оптимальне завантажування, підігрівання й перемішування субстрату, що забезпечує ефективне використання всього об'єму резервуара БГУ, унеможливорює утворення «мертвих» зон, розшарування осаду, відкладання мінералізованого осаду та утворення кірки, а також сприяє вирівнюванню температурного поля й покращенню газоутворення.

За допомогою REDOX-сенсора забезпечується вимірювання швидкості зниження окисно-відновного потенціалу (ОВП) без розгерметизації культиватора в рідкому середовищі. Створена шкала з барвників (редокс-індикаторів) для вимірювання ОВП під час росту культур мікроорганізмів у діапазоні від -30 до -420 мВ. На основі аналізу характеристик стереометричного розподілення редокс-зон у рідкому або агаризованому середовищах здійснюється оптимальне дозування, деструкційна (кавітаційна) обробка сировини та різних видів спеціальних домішок, що дає змогу значно збільшити вихід біогазу.

Ключові слова: біогазова установка, біогазова технологія, біомаса, енергетичні культури, субстрати, домішки, біогаз, метан, REDOX-сенсор

Актуальність. Останніми роками в Україні дедалі більше уваги приділяється дослідженню процесів біоконверсії, виробництву та енергетичному використанню біогазу [1–2]. Крім того, повне й швидке впровадження біогазових технологій для переробки відходів

рослинництва і тваринництва одночасно радикально поліпшить енергетичний баланс країни та екологічний стан територій.

Для отримання максимально можливих об'ємів біометану планується використання не лише різноманітних сільськогосподарських відходів, а й вирощування, збір та деструкційна обробка спеціальних енергетичних культур (ЕК), які стимулюють процес бродіння. Тому, одним із перспективних напрямів підвищення ефективності функціонування біогазових установок є розробка біогазових технологій, за допомогою яких забезпечується ефективна підготовка та інтенсивна переробка різних видів біомаси (субстратів) у біогазових установках.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині у встановленому технологічному процесі існуючих БГУ не передбачається застосування різних видів сезонної біомаси. При цьому, неоптимальне керування процесом завантаження різних видів субстратів може призвести до значного зменшення виходу біогазу [5, 7]. Перспективним напрямом усунення зазначеного недоліку є розробка біогазової технології, за допомогою якої забезпечується завантаження БГУ різними видами вхідних субстратів і спеціальних домішок та створення необхідних умов (на основі контролю окисно-відновного потенціалу [4]) для отримання максимально можливого об'єму біогазу.

Мета дослідження – розробка біогазової технології щодо підготовки та ефективної переробки вхідних субстратів на основі контролю окисно-відновного потенціалу та оптимального дозування спеціальних домішок для отримання максимальних об'ємів біогазу.

Матеріали і методи досліджень. Процес інтенсифікації зброджування біомаси у БГУ полягає в тому, що потік різних видів сировини спочатку подрібнюється у роторно-пульсаційному апараті до необхідного мікроскопічного рівня та гомогенізується. При цьому рвуться зв'язки довгих волокон (лігнін, целюлоза), дисперсність збільшується так, що їх частинки значно зменшуються у розмірах. Тому штамам бактерій, які беруть участь у процесах утворення біогазу, легше розкласти біогенні матеріали. У результаті вміст метану в біогазі збільшується до 70–75 %.

За допомогою розробленого в [4] кількісного методу колориметричного вимірювання окисно-відновного потенціалу в рідких і агаризованих середовищах з'явилася можливість вимірювати швидкість зниження ОВП без розгерметизації культиватора в рідкому середовищі, а також охарактеризувати стереометричне розподілення редокс-зон у рідкому або агаризованому середовищах, що необхідно для оптимального дозування та перемішування різних видів спеціальних домішок з метою збільшення виходу біогазу. Під домішками в даному випадку розуміється суміш із ензимів, мікроелементів, ЕК і т.п., застосування яких забезпечує значне збільшення виходу біогазу без змін конструкції біогазової установки.

На основі застосування методу колориметричного вимірювання ОВП здійснюється оптимальне дозування та деструкційна (кавітаційна) обробка різних видів сировини, оптимальне підігрівання і перемішування завантажуваного субстрату, що забезпечує ефективне використання

всього об'єму резервуара БГУ, унеможливорює утворення «мертвих» зон, розшарування осаду, відкладання мінералізованого осаду та утворення кірки, а також сприяє вирівнюванню температурного поля та покращенню газоутворення [3, 6].

Результати досліджень та їх обговорення. За допомогою REDOX-сенсора на основі колориметричного методу вимірювання ОВП [4] з'явилася можливість вимірювати стереометричне розподілення редокс-зон у рідкому або агаризованому середовищах, що необхідно для оптимального дозування різних видів ЕК та спеціальних домішок, які в комплексі з кавітаційними деструкторами біомаси дадуть змогу значно збільшити вихід біогазу для отримання різних видів енергії.

Колориметричний метод заснований на використанні барвників – редокс-індикаторів. У таких барвників хромоформні (хромогенні) групи, що визначають колір барвника, відновлюються до безбарвної форми барвника (лейкоформи). У мікробіології для вимірювання ОВП широко застосовуються резазурин, феносафранін, нейтральний червоний, метиленовий синій. Кожен із барвників має певний потенціал утворення лейкоформи [4].

В електрохімії прийнято виражати потенціал утворення лейкоформи барвника при рівності концентрацій (або активностей) його окисленої та відновленої форм (E_0') і $pH=7,0$ [4]. У такому випадку барвник знебарвлений частково. Тому для практичного використання редокс-барвників необхідно емпірично визначити потенціал їх повного знебарвлення.

Як свідчать результати теоретичних та практичних досліджень, найбільший вихід біометану, дають субстрати з високою концентрацією енергії: енергетична кукурудза, свіжа трава, бадилля буряка, зернові рослини [1, 2, 6, 7].

Структурна схема технології підготовки та зброджування біомаси у біогазовому реакторі наведена на рисунку.

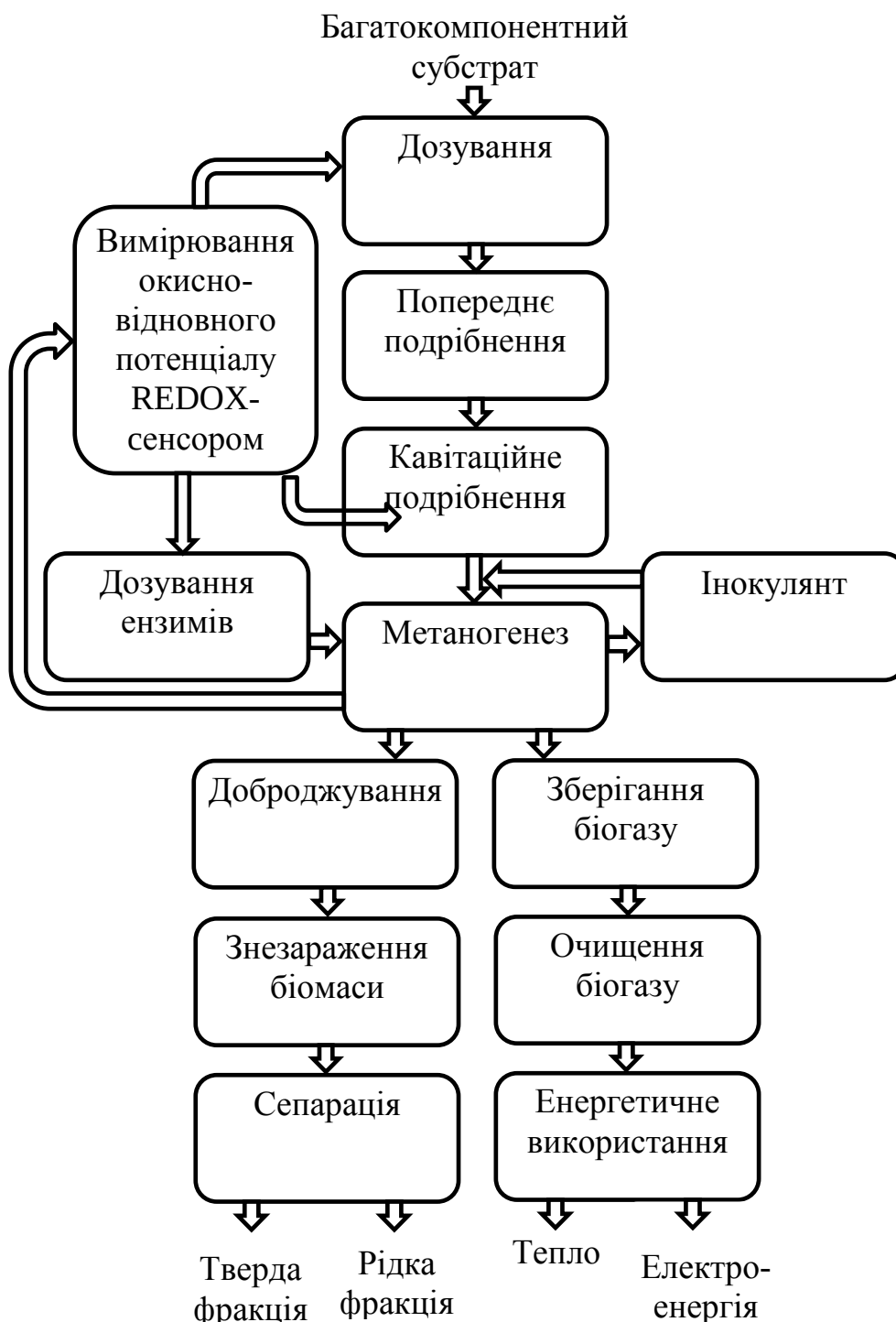
За допомогою запропонованої біогазової технології повинні забезпечуватися такі ключові умови виробництва біогазу.

У процесі бродіння кількість виробленого газу поступово зростає відповідно до збільшення його тривалості, причому спочатку воно відбувається швидше, а в міру зростання тривалості бродіння – повільніше. Гідролізні і кислотоутворюючі бактерії в середовищі з рівнем pH 4,5–6,3 досягають оптимуму своєї активності, тоді як бактерії, що утворюють оцтову кислоту і метан, можуть жити лише при нейтральному або при слаболужному рівні pH 6,8–8. Для всіх бактерій дійсним є правило: якщо рівень pH перевищує оптимальний, вони стають менш активними у своїй життєдіяльності, що затримує утворення біогазу. Стереометрична конфігурація редокс-зон у товщі рідкого середовища визначається тим, що бактерії сорбуються на субстраті й локально знижують ОВП.

Вік культури впливає на швидкість зниження ОВП. Під час росту одностодової культури швидкість зниження ОВП у рідкому середовищі у 2–3 рази вища, ніж у разі використання тридобової. Як свідчать результати досліджень [4] під час росту аеробних і факультативно-

анаеробних бактерій відбувається зниження ОВП на поверхні агаризованих середовищ до $Eh \approx -100$ мВ.

Чим дрібніші частинки субстрату, тим більша поверхня зіткнення їх із бактеріями, у результаті чого, період бродіння буде скорочуватися, а утворення метану прискорюватися.



Структурна схема технології отримання біогазу

Якісне перемішування субстратів важливе не лише для уникнення появи кірки і осаду, а й для того, щоб біогаз виводився на поверхню. Мікроорганізми звикають до певного «раціону». Зміни, якщо вони вносяться, мають бути поступовими. Співвідношення вуглецю до азоту в різних типах гнойових відходів свиней та в рідких відходах ВРХ здебільшого не перевищує значення 15, а для стабільного протікання процесу метанового бродіння оптимальним співвідношенням є діапазон 10–30:1 [7]. Натомість, співвідношення вуглецю до азоту в ЕК здебільшого перевищує значення 30. Очевидно, що змішування гнойових відходів та ЕК дозволить оптимізувати склад суміші за співвідношенням вуглецю до азоту, що свідчить про доцільність їх сумісного зброджування.

Продукти обміну речовин кожної групи бактерій є поживними речовинами для подальшої групи бактерій. Усі вони працюють з різною швидкістю. Бактерії не можна «перегодовувати», оскільки тоді одна з груп не встигне накопичити субстрат для наступної. Тому в кожному конкретному проекті розраховується й програмується періодичність подання субстрату.

Висновки і перспективи. На основі проведеного аналізу ключових умов, що впливають на ефективність виробництва біометану, розроблено структуру біогазової технології щодо підготовки та переробки різних вхідних видів субстратів для отримання максимальних об'ємів біогазу. Ефективна деструкційна переробка вхідних субстратів здійснюється на основі контролю окисно-відновного потенціалу та оптимального дозування спеціальних домішок.

Використання REDOX-сенсора у подальших дослідженнях надасть змогу вимірювати не тільки швидкість зміни ОВП у культуральному середовищі, а й візуально визначати стереометричний (зональний) розподіл потенціалу в об'ємі рідкого середовища і розподіл редокс-зон на поверхні агаризованого середовища.

Список літератури

1. Гелетука Г. Г. Перспективи біогазу в Україні. – Економічна правда, 2013. [Електронний ресурс] / Г. Г. Гелетука. – Режим доступу : <http://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>
2. Гелетука Г. Г. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспектива / Г. Г. Гелетука, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев. – К. : Гюльцов, 2013. – 71 с.
3. Метод оптимального дозування вхідних субстратів та спеціальних домішок для біогазових установок / С. А. Шворов, О. М. Юрченко, Д. С. Комарчук, П. Г. Охріменко // Відновлювальна енергетика. – 2015. – № 2. – С. 80–83.
4. Притула І. Р. Застосування редокс-індикаторів для вимірювання окисно-відновного потенціалу під час росту культур мікроорганізмів / І. Р. Притула, О. Б. Таширев // Біологічні Студії / Studia Biologica. – 2013. – Т. 7, № 3. – С. 133–144.
5. Сидоров Ю. І. Сучасні біогазові технології / Biotechnologia acta, v. 6, no1, 2013 [Електронний ресурс] / Ю. І. Сидоров. – Режим доступу : http://biot_2013_6_1_6.pdf

6. Шворов С. А. Система керування процесом завантаження біомаси та спеціальних домішок в біореактор для отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив / С. А. Шворов, П. Г. Охріменко, Д. В. Чирченко // Енергетика і автоматика. – 2014. – № 3. – С. 155–161.

7. Эдер Б. Биогазовые установки : практич. пособ. [Электронный ресурс] / Б. Эдер, Х. Шульц. – Режим доступа : <http://www.zorg-biogas.com>

References

1. Heletukha, H. Perspektyvy biogazu v Ukraini Perspektivy biohazu v Ukraini [Prospects for the biogas production in Ukraine]. Available at : <http://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>.

2. Heletukha, H., Kucheruk, P., Matveev, Iu. (2013). Razvytye byohazovykh tekhnolohiy v Ukrainy y Hermanyy: normatyvno-pravovoe pole, sostoyaniye y perspektyva [The development of biogas technology in Ukraine and Germany, regulatory and legal field, status and perspectives]. Kyiv: Hyultsov, 71.

3. Shvorov, S., Yurchenko, O., Komarchuk, D., Ochrimenko, P. (2015). Metod optymalnoho dozuvannya vkhidnykh substrativ ta spetsialnykh domishok dlia biohazovykh ustanovok [The method of optimal dosing incoming substrates and special additives for biogas]. Vidnovliuvalna enerhetyka, 2, 80–83.

4. Prytula, I., Tashiriev, O. (2013). Zastosuvannya redoks-indykatoriv dlia vymiriuvannya okysno-vidnovnoho potentsialu pid chas rostu kultur mikroorhanizmv [Application of redox indicators for measuring the oxidation-reduction potential during growth of microorganisms cultures]. Biologichni Studii / Studia Biologica, 7 (3), 133–144.

5. Sidorov, Yu (2013). Suchasni biogazovi texnologiyi [Modern biogas technology]. Available at : http://biot_2013_6_1_6.pdf.

6. Shvorov, S., Okhrimenko, P., Chyrchenko, D. (2014). Systema keruvannya protsesom zavantazhennia biomasy ta spetsialnykh domishok v bioreaktor dlia otrymannia maksymalnykh ob'iemiv biohazu ta orhanichnykh dobryv [The control system booting process biomass and special additives to the bioreactor to maximize the volume of biogas and organic fertilizer]. Енергетика і автоматика, 3, 155–161.

7. Eder, B., Schultz, H. Biogazovyye ustanovki. Prakticheskoye posobiye [Byogas installation. Practical manual]. Available at : <http://www.zorg-biogas.com>.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ РАЗНЫХ ВИДОВ БИОМАССЫ В БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ

**С. А. Шворов,
В. Е. Лукин,
Д. С. Комарчук,
В. И. Троханяк,
В. В. Устимчук**

Аннотация. Как показывает практика, в существующих биогазовых установках (БГУ) не предполагается использование различных видов сезонной биомассы, а их неоптимальное использование может привести к значительному уменьшению выхода биогаза. Перспективным направлением устранения указанного недостатка является разработка специальной технологии подготовки и переработки различных видов

биомассы, с помощью которой на основе деструкционной (кавитационной) обработки сырья и использования специальных добавок создаются необходимые условия для получения максимально возможного объема биогаза. При этом для различных видов сырья осуществляется оптимальное дозирование, подогрев и перемешивание субстрата, что обеспечивает эффективное использование всего объема резервуара БГУ, исключает образование «мертвых» зон, расслоение осадка, откладывание минерализованного осадка и образования корки, а также способствует выравниванию температурного поля и улучшению газообразования.

С помощью REDOX-сенсора обеспечивается измерение скорости снижения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) без разгерметизации культиватора в жидкой среде. Создана шкала из красителей (редокс-индикаторов) для измерения ОВП во время роста культур микроорганизмов в диапазоне от -30 до -420 мВ. На основе анализа характеристик стереометрического распределения редокс-зон в жидкой или агаризованной среде осуществляется оптимальная дозировка, деструкционная (кавитационная) обработка сырья и различных видов специальных добавок, что позволяет значительно увеличить выход биогаза.

Ключевые слова: биогазовая установка, биогазовая технология, биомасса, энергетические культуры, субстраты, добавки, биогаз, метан, REDOX-сенсор

TECHNOLOGY OF PREPARATION AND PROCESSING OF DIFFERENT BIOMASS SPECIES IN BIOGAS INSTALLATIONS

S. Shvorov,
V. Lukin,
D. Komarchuk,
V. Trokhanyak,
V. Ustimchuk

Abstract. In practice, in existing biogas plants (BP) it is not possible to use different types of biomass, because they depend of the year season and their non-optimal use can lead to a significant decrease level of output biogas of BP. A promising avenue for eliminating this drawback is the development of a special technology for the preparation and processing of various types of biomass, with the help of which necessary conditions are created to obtain the maximum possible volume of biogas on the basis of the disruptive (cavitational) treatment of raw materials and the use of special additives. At same time, optimal dosing, heating and mixing of the substrate are carried out for various types of raw materials, which ensures the effective use of the entire volume of the BP tank, excludes formation of "passive" zones, sediment stratification, deposition of mineralized sediments and crust formation, and also helps to equalize the temperature field and improve gas formation.

With the help of the sensor REDOX, it is possible to measure the reduction rate of the oxidation-reduction potential (ORP) without depressurizing the cultivator in a liquid medium. A scale of dyes (redox indicators) was developed to measure ORP during the growth of cultures of microorganisms in the range from -30 to -420 mV. Based on the analysis of the characteristics of the stereometric distribution of redox zones in a liquid or agarized medium, the optimal dosage, destructive (cavitation) treatment of raw materials and various types of special additives is realized, which significantly increases the level of output biogas of BP.

Keywords: *biogas plant, biogas technology, biomass, energy crops, substrates, additives, biogas, methane, REDOX-sensor*

УДК 536.425; 535.372

СТРУКТУРА І ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ ЛІТІЙ-ГЕРМАНАТНОЇ СКЛОКЕРАМІКИ $\text{Li}_2\text{O}-7\text{GeO}_2$, ЛЕГОВАНОЇ ІОНАМИ ХРОМУ

С. Г. НЕДІЛЬКО, доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

В. В. БОЙКО, кандидат фізико-математичних наук, доцент

*Національний університет біоресурсів і природокористування
України*

Я. П. РИБАК, інженер

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

М. П. ТРУБІЦИН, доктор фізико-математичних наук, професор

М. Д. ВОЛНЯНСЬКИЙ, доктор фізико-математичних наук, професор

М. М. КОПТЄВ, інженер

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

E-mail: SGNedilko@gmail.com.ua

Анотація. На основі вихідного аморфного матеріалу: склоскладу $\text{Li}_2\text{O}-7\text{GeO}_2$, виготовлено й досліджено серію зразків у стані склокераміки та полікристалів. Рентгенофазовий аналіз виявив, що у стані склокераміки зразки складаються із нанорозмірних зародків кристалітів тетрагерманату літію $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$ та гептагерманату літію $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$, вмонтованих в аморфну матрицю. При переході у полікристалічний стан зародки тетрагерманату літію зникають, натомість, має місце формування мікрокристалів гептагерманату літію $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$.

Результати люмінесцентних досліджень, легованих іонами хрому матеріалів, в цілому, підтвердили зазначене вище. Так, для склокераміки було виявлено люмінесценцію, яку приписано

випромінювальним переходам в іонах Cr^{3+} , що, в основному, знаходяться в кристалітах тетрагерманату, $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$, тоді як у полікристалічному стані люмінесценцію Cr^{3+} виявлено як у складі гептагерманату, так і у складі тетрагерманату літію.

Мультифазна структура склокерамічних літій-германатних сполук, легованих хромом, дає змогу створювати на їх основі люмінесцентні перетворювачі фіолетового випромінювання у випромінювання широкого спектру: від зеленого до червоного. Такі матеріали можуть бути використані як тонкоплівкові покриття кремнієвих елементів сонячних батарей для підвищення їх ефективності, або ж моноколірних світлодіодів – для створення на їх основі світлодіодів білого випромінювання.

Ключові слова: скло, кераміка, літій-германат, іон хрому, люмінесценція

Актуальність. На сьогодні питання енергозбереження є однією найважливіших проблем як усього господарства України, енергоємних галузей промисловості, аграрного виробництва тощо, так і технологічного та наукового пошуку. Тривають і посилюються, наприклад, пошуки шляхів підвищення ефективності перетворення сонячного світла в електричний струм, або ж синьо-фіолетового випромінювання світлодіодів у жовто-червоне випромінювання задля створення ефективних джерел «білого» світла. Ці задачі розв'язують, зокрема, шляхом нанесення на поверхню сонячних елементів, або ж світлодіодів, люмінесцентного покриття, в якому фіолетове випромінювання поглинається і перетворюється в жовто-червоне. Цим самим досягається підвищення ефективності перетворення «сонячне світло → електричний струм», або ж зворотного перетворення «електричний струм → біле світло».

У комерційних білих світлодіодах таким покриттям, як правило, є полімерний композит, де наповнювачем є оксидна сполука: ітрій-алюмінієвий гранат, легований іонами церію. На жаль, при експлуатації, з часом та внаслідок нагрівання, має місце механічна деградація полімерної матриці, що призводить до погіршення характеристик та виходу пристрою з ладу. Нині, як перспективні для згаданих цілей, розглядаються покриття на основі оксидних матриць, які, на відміну від полімерних, є стійкими, як у часі, так і до теплових навантажень. Така матриця, має бути недорогою у виготовленні, максимально прозорою та однорідною в діапазоні видимого випромінювання, що зменшить втрати на «паразитні» поглинання та розсіювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Описаним вище вимогам може відповідати прозора оксидна кераміка, легована іонами перехідних (ПЕ) або ж рідкісноземельних елементів (РЗЕ), які є активними в люмінесценції компонентами [1]. Недоліком свічення останніх є лінійчатий спектр люмінесценції, унаслідок чого, їх випромінювання, хоча візуально і може сприйматися як «біле», створює сильне шкідливе навантаження на фізіологічну систему людського організму. Тому бажано

мати суцільний спектр випромінювання люмінесцентного покриття, або ж, щонайменше, слід доповнити лінійчатий спектр люмінесцентних іонів суцільним широкосмуговим спектром. У цьому плані, певну перевагу мають іони ПЕ, зокрема, хрому, Cr^{3+} , Cr^{4+} та Cr^{6+} , які, за певних умов, виявляють суцільний, відносно широкий, спектр люмінесценції [2]. Ще одну можливість одержати додаткове широкосмугове випромінювання можна реалізувати шляхом підбору такої керамічної матриці, яка виявляє свою власну широкосмугову люмінесценцію.

Саме таку можливість надають сполуки складних оксидів, як базові компоненти кераміки, одним із елементів яких є молекулярні поліедри типу XO_n ($\text{X} = \text{Zr}, \text{W}, \text{Mo}, \text{V}, \text{Ge}$ тощо, $n = 4, 6, 8$) [3]. Таким чином, перспективними матеріалами для вирішення питань люмінесцентного перетворення світла є оксидна склокераміка, тобто такий вид кераміки, що формується водночас, як аморфною (скло), так і кристалічними складовими. Ми передбачаємо, що кристалічна складова має виявляти лінійчасту люмінесценцію, тоді як скло має формувати широкосмугове випромінювання.

Мета дослідження – з'ясування можливості реалізації цих передбачень шляхом виготовлення і дослідження люмінесцентних властивостей та структурних характеристик оксидної літій-германатної склокераміки. Результати наших попередніх досліджень уже довели можливість використання подібної кераміки як оптичного матеріалу [4].

Матеріали і методи дослідження. Досліджені зразки було виготовлено методом швидкого закалювання розплавів хімічного складу $\text{Li}_2\text{O}-x\text{GeO}_2$ ($x = 7, 11,5, 18$) між холодними металевими пластинами [5]. Досліджувалися спектрально-люмінесцентні властивості LGO – зразків, як «чистих» – без спеціального легування, так і легованих іонами Cr^{3+} при концентрації останніх 0,008 масових % (зразки далі позначено як LGO: Cr^{3+} /0.008). Для кожної із згаданих двох серій, описаними вище способами було виготовлено зразки у трьох фазах: скло, склокераміка та полікристал.

Процес кристалізації та фазовий стан матеріалів досліджували раніше за допомогою диференціального термічного аналізу (ДТА) та рентгенівського дифракційного аналізу (РДА) [5]. Спектри фотолюмінесценції (ФЛ) досліджували за допомогою оптичних монохроматорів МДР-23 та ДФС-12. Як джерела збудження люмінесценції використовували лазери із дожинами хвиль випромінювання $\lambda_{\text{ex}} = 337,1$ та 405 нм. Спектри було записано за кімнатної температури зразків.

Результати досліджень та їх обговорення. Кристалічна складова склокераміки може бути сформована двома способами: нагріванням скла від кімнатної температури та витримкою скла певний час за певної сталої температури. Можливі інтервали необхідних температур легко визначаються із даних ДТА (рис. 1).

Із рис. 1 випливає, що при першому нагріванні виготовленого скла за температури $T_g = 785$ К починається процес девітріфікації (розстеклювання). При подальшому нагріванні на дериватограмі фіксуються дві особливості для скла стехіометричного складу та три – для нестехіометричного скла. (Пік при

$T_1 = 840$ K відповідає утворенню в аморфній фазі впорядкованих областей зі структурами тетрагерманату літію $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$ і гептагерманату літію $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$.) Такий матеріал і є склокерамікою. Пік при $T_2=915$ K відповідає кристалізації фази гептагерманата літію: $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$, і зникненню фази $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$. Таким чином, далі у складі зразків переважають кристалічні складові: полікристалічний стан зразків. Пік $T_3=1090$ K спостерігається тільки для нестехіометричних зразків ($x > 7$) і його пов'язують із кристалізацією надлишків аморфної фази GeO_2 . (Зразки нестехіометричного складу в цій роботі ми не досліджували.)

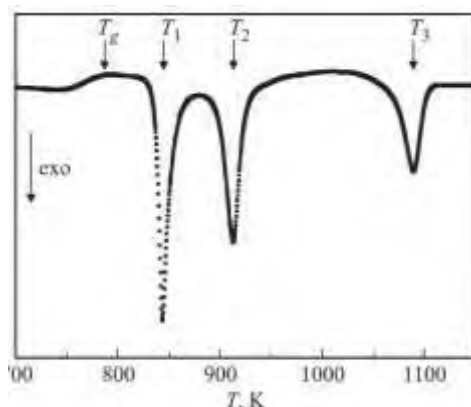


Рис. 1. Дериватограма для літій-германатних стекел $\text{Li}_2\text{O}-x\text{GeO}_2$ [5]

Літій-германатне скло стехіометричного складу, $\text{Li}_2\text{O}-7\text{GeO}_2$, при короткохвильовому збудженні ($\lambda_{\text{ex}} = 337,1$ нм) характеризується широкосмуговою люмінесценцією у видимому діапазоні світла з максимумом спектральної обвідної в околі ~ 575 нм ($\sim 2,14$ eV) (рис. 2, крива 1). «На око», ця люмінесценція має світло-зелений колір. При більш довгохвильовому збудженні ($\lambda_{\text{ex}} = 405$ нм) інтенсивність випромінювання дещо зростає, а спектральна обвідна зміщується у бік довших довжин хвиль: її максимум знаходиться при ~ 620 нм (2 eV) (рис. 2, крива 2). Аналіз наведених спектрів свідчить, що спектр свічення є складним: на нашу думку, тут можна виокремити, щонайменше, три складових із положенням їх максимуму поблизу 500, 630 та 720 нм. (Ці положення на рис. 2 показано стрілками.)

Очевидно, що довгохвильове зміщення обвідної зумовлене зміною співвідношення інтенсивності спектральних складових на користь довгохвильових. Як наслідок, свічення при збудженні $\lambda_{\text{ex}} = 405$ нм, «на око», має жовто-помаранчевий колір. Склокерамічна та полікристалічна фази нелегованих LGO матеріалів при застосованих фотозбудженнях не виявили помітної люмінесценції.

На відміну від нелегованих, LGO–зразки, леговані іонами хрому, виявляють помітну люмінесценцію в усіх трьох фазових станах: скло, склокераміка, полікристал (рис. 3). Тут бачимо, що в спектрах свічення легованих зразків, $\text{LGO: Cr}^{3+}/0.008$, у фазі скла, залишається практично без змін короткохвильовий компонент (500 нм), але ж компонент 630 нм практично зникає ФЛ. Наразі, зростає, компонент 720 нм, який тепер покриває діапазон жовтого, червоного та ближнього інфрачервоного випромінювання: 600–900 нм (рис. 3, крива 1).

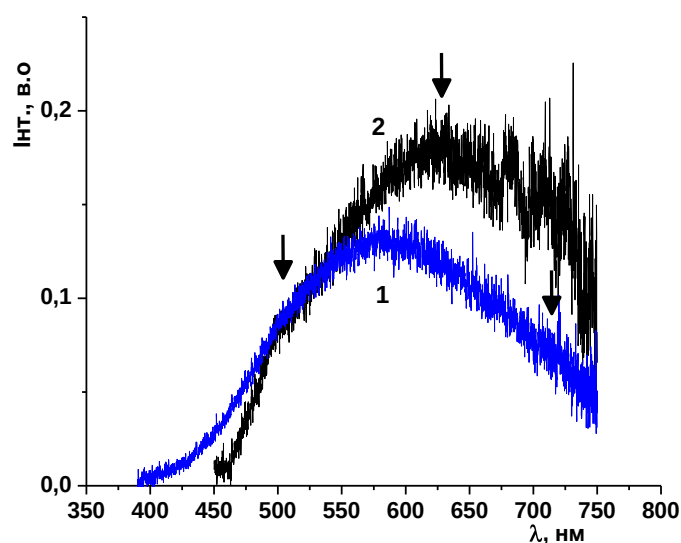


Рис. 2. Спектри люмінесценції скла $\text{Li}_2\text{O}-7\text{GeO}_2$; $\lambda_{\text{ex}} = 337,1$ (1) і 405 нм (2)

Перехід до стану склокераміки залишає без змін смугу короткохвильової ФЛ, тоді як довгохвильова дуже сильно послаблюється.

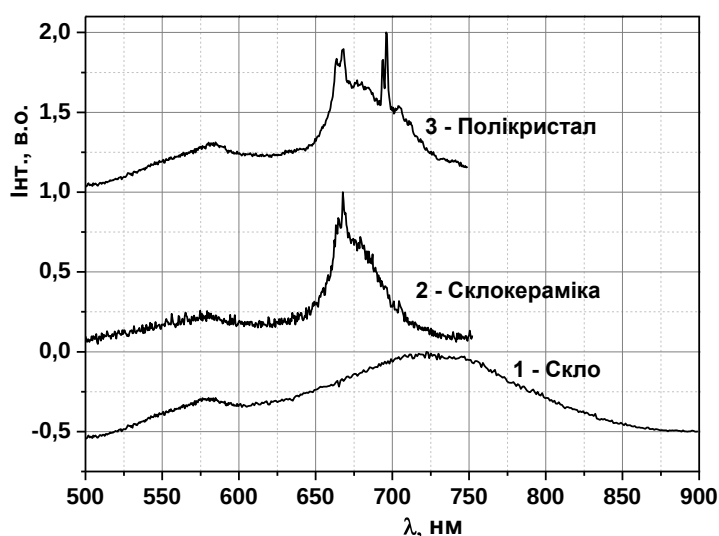


Рис. 3. Спектри люмінесценції зразків $\text{LGO}:\text{Cr}^{3+}/0.008$ у різних фазових станах; $\lambda_{\text{ex}} = 405$ нм

Водночас, у спектрах склокерамічної фази в діапазоні 625–750 нм з'являється доволі інтенсивна смуга червоної ФЛ з напівшириною близько 770 см⁻¹. Поблизу максимуму цієї смуги (675 нм), при 664 і 668 нм, спостерігаються лінії тонкої структури (рис. 3, крива 2).

Спектри полікристалічного зразка є подібними до спектрів легованої склокераміки, однак, на додаток, тут знаходимо ще дві лінії тонкої структури (693,6 та 696,1 нм), що супроводжуються довгохвильовим

крилом із екстремумом при 704 нм (рис. 3). Появу крила підтверджують зростання асиметрії смуги, згаданої вище червоної ФЛ, та її розширення до значення напівширини $\sim 1175 \text{ см}^{-1}$.

Очевидно, що описані люмінесцентні особливості мають узгоджуватися з даними щодо складу та структури досліджених зразків. Дійсно, якщо аналізувати люмінесценцію нелегованих зразків у різних фазових станах, то її слід порівнювати з даними стосовно люмінесценції простих аналогів. Зокрема, так як сітку LGO-скла, в основному, утворено оксидом германію, GeO_2 , то логічним є порівняння отриманих тут результатів із даними щодо люмінесценції аморфних плівок та скла GeO_2 . Для цих матеріалів, при збудженні ближнім УФ та синім світлом спостерігалася ФЛ із широким спектром з максимумом в околі 500–580 нм (2,4 -2,1 eV) [6] та складовими при 410–420 нм (3 eV), 530 нм (2,3 eV) та 650 нм (1,9 eV). Спостережену ФЛ, зазвичай, пов'язують із радіаційними переходами в центрах люмінесценції, утворених дефектами матриці GeO_2 , зокрема, обірваними кисневими зв'язками Ge-O [6]. Без сумніву, в матриці скла LGO подібних дефектів має бути значна кількість, а тому, врахувавши подібність характеристик спостережених нами смуг ФЛ до описаних вище, маємо зробити висновок, що ФЛ LGO у фазі скла зумовлена свіченням його GeO_2 компонента.

Поява у складі LGO-скла домішки іонів хрому, які, як відомо, в оксидах можуть бути у зарядовому стані 3+, 4+, 5+ та 6+, сприяє формуванню додаткових дефектів і зміні співвідношення їх кількості, що й має призводити до деформації спектрів ФЛ порівняно із нелегованим склом. Іони Cr^{3+} можуть заміщувати іони германію, які знаходяться в октаедричному кисневому оточенні. (Октаедри GeO_6 є основними структурними одиницями LGO-скла.) Відомо, що у випадку слабого октаедричного кристалічного поля люмінесценція іонів Cr^{3+} спостерігається як широка смуга в червоно-інфрачервоному діапазоні [2, 7]. Таким чином, зростання такої смуги в спектрах легованої кераміки (рис. 3, крива 1) може бути відображенням саме цієї ситуації.

У склокерамічній фазі, як було зазначено вище, у складі аморфної матриці формуються нанорозмірні кристаліти фаз тетрагерманату $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$ і гептагерманату літію $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ [5]. Відповідно, появу червоної смуги в спектрах ФЛ склокераміки (рис. 3, крива 2) слід пов'язувати з випромінюванням іонів Cr^{3+} , що заміщують іони германію у їх складі. Зазначене підтверджується спостереженням ліній тонкої структури, які, очевидно, є проявом випромінювальних переходів ${}^2\text{E} \rightarrow {}^4\text{A}_2$ в іонах Cr^{3+} , що знаходяться в кисневих октаедрах решіток $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$ та $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ на місці іонів Ge^{4+} . Значна ширина смуги (770 см^{-1}) є наслідком, так званого, неоднорідного оптичного розширення, зумовленого змінами у найближчому оточенні іонів Cr^{3+} від позиції до позиції в кристалічній решітці мікро/нанорозмірних кристалів.

Як було наголошено вище, фази і області зі структурою гептагерманату літію, $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$, є основною складовою полікристалічного стану зразків LGO. Очевидно, їх наявність і зумовлює прояв в люмінесценції цих зразків додаткових ліній тонкої структури (693,6 та

696,1 нм) та крива, що їх супроводжує (рис. 3, крива 3). Цей висновок впливає з порівняння наведених результатів із подібними даними стосовно люмінесценції кристалів $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$, легованих іонами хрому [8].

Висновки і перспективи. Скло-керамічні матеріали на основі літій-германатних сполук є придатними для легування іонами перехідних елементів, зокрема хрому, стан і оптичні властивості яких залежать від фазового стану матеріалу та локальної структури люмінесцентної домішки.

Варіювання вмісту люмінесцентної домішки та співвідношення аморфної і кристалічної фаз є тими чинниками, що дають змогу управляти спектральним складом люмінесценції досліджених матеріалів, а отже, і ефективністю люмінесцентної конверсії фіолетового випромінювання збудження (405 нм) – у широкосмугове випромінювання, що покриває діапазон зелено – жовто – червоного світла: 500–750 нм.

Одержані результати свідчать про перспективність використання сполук сімейства $\text{Li}_2\text{O}-7(\text{GeO}_2)$, як нових оптичних матеріалів, зокрема, як люмінесцентних покриттів для світлодіодів білого випромінювання.

Список літератури

1. Daqin Chen, Weidong Xiang, Xiaojuan Liang, Jiasong Zhong, Hua Yu, Mingye Ding, Hongwei Lu, Zhenguo Ji. Advances in transparent glass–ceramic phosphors for white light-emitting diodes – A review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. – V. 35. – P. 859–869.
2. M. Gaft, G. Boulon, G. Panczer, Y. Guyot, R. Reisfeld, S. Votyakov, G. Bulka. Unexpected luminescence of Cr^{5+} and Cr^{3+} ions in ZrSiO_4 zircon crystals. *J. of Luminescence*. 2000. – V. 87–89. – P. 1118–1121.
3. S. Nedilko, V. Chornii, Yu. Hizhnyi, M. Trubitsyn, I. Volnyanskaya. Luminescence spectroscopy and electronic structure of the PbMoO_4 and Pb_2MoO_5 single crystals. *Optical Materials*. 2014. – V. 36. – P. 1754–1759.
4. Особливості оптичних властивостей літій-германатного скла та склокераміки у видимій області спектра / Л. В. Поперенко, М. П. Трубіцин, С. Г. Неділько [та ін.] // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Фізико-математична серія. – 2015. – № 4. – С. 213–216.
5. Nesterov O. O., Trubitsyn M. P., Volnyanskii D. M. Metastable state of the $\text{Li}_2\text{O}-11.5 \text{ GeO}_2$ glass-ceramics with a high electrical conductivity // *Physics of the Solid State*. – 2015. – V. 57, No. 4. – P. 683–688.
6. Malashkevich, Yu. Bokshits, O. Chukova, V. Koukhar, S. Nedilko, G. Shevchenko. Influence of gold nanoparticles on luminescence of Eu^{3+} ions sensitized by structural defects in germanate films. *J. Phys. Chem. C*. 2016. – V. 120 (28). – P. 15369–15377.
7. Yu. Hizhnyi, A. Oliynik, O. Gomenyuk, S. Nedilko, P. Nagornyi, R. Boiko, V. Boyko. The electronic structure and optical properties of ABP_2O_7 ($A = \text{Na}, \text{Li}$) double phosphates. *Optical Materials*. 2008. – V. 30. – P. 687–689.
8. S. P. Feofilov, A. A. Kaplyanskii, A. B. Kulinkin, R. S. Meltzer, T. N. Vasilevskaya. Fluorescence spectra and homogeneous line widths of Cr^{3+} in glass nucleating ferroelectric $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$. *J. of Luminescence*. 2002. – V. 100. – P. 155–161.

References

1. Daqin Chen, Weidong Xiang, Xiaojuan Liang, Jiasong Zhong, Hua Yu, Mingye Ding, Hongwei Lu, Zhenguo Ji (2015). Advances in transparent glass–

ceramic phosphors for white light-emitting diodes – A review. Journal of the European Ceramic Society, 35, 859–869.

2. M. Gaft, G. Boulon, G. Panczer, Y. Guyot, R. Reisfeld, S. Votyakov, G. Bulka. (2000). Unexpected luminescence of Cr^{5+} and Cr^{3+} ions in ZrSiO_4 zircon crystals. J. of Luminescence, 87–89, 1118–1121.

3. S. Nedilko, V. Chornii, Yu. Hizhnyi, M. Trubitsyn, I. Volnyanskaya. (2014). Luminescence spectroscopy and electronic structure of the PbMoO_4 and Pb_2MoO_5 single crystals. Optical Materials, 36, 1754–759.

4. Osoblyvosti optychnykh vlastyvostei litii-hermanatnoho sklata sklokeramiky u vydymii oblasti spektra / L. V. Poperenko, M. P. Trubitsyn, B. A. Nedilko [et al.] [Features of optical properties of the lithium germanate glasses and glass-ceramics in the visible]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Fyzyko – matematychna seriia, 2015, 4, 213–216.

5. Nesterov O. O., Trubitsyn M. P., Volnyanskii D. M. (2015). Metastable state of the Li_2O -11.5 GeO_2 glass-ceramics with a high electrical conductivity. Physics of the Solid State, 57 (4), 683–688.

6. Malashkevich, Yu. Bokshits, O. Chukova, V. Koukhar, S. Nedilko, G. Shevchenko (2016). Influence of gold nanoparticles on luminescence of Eu^{3+} ions sensitized by structural defects in germanate films. J. Phys. Chem. C., 120 (28), 15369–15377.

7. Yu. Hizhnyi, A. Oliynik, O. Gomenyuk, S. Nedilko, P. Nagorny, R. Boiko, V. Boyko (2008). The electronic structure and optical properties of ABP_2O_7 ($\text{A} = \text{Na}, \text{Li}$) double phosphates. Optical Materials, 30, 687–689.

8. S. P. Feofilov, A. A. Kaplyanskii, A. B. Kulinkin, R. S. Meltzer, T. N. Vasilevskaya (2002). Fluorescence spectra and homogeneous line widths of Cr^{3+} in glass nucleating ferroelectric $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$. J. of Luminescence, 100, 155–161.

СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЛИТИЙ-ГЕРМАНАТНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ, $\text{Li}_2\text{O} \cdot 7\text{GeO}_2$, ЛЕГИРОВАННОЙ ИОНАМИ ХРОМА

**С. Г. Неделько,
В. В. Бойко,
Я. П. Рыбак,
М. П. Трубицын,
М. Д. Волнянский,
М. М. Коптев**

Аннотация. Исследована серия образцов в состоянии стеклокерамики и поликристаллов, изготовленных на базе исходного аморфного материала – стекло состава $\text{Li}_2\text{O} \cdot 7\text{GeO}_2$. Рентгенофазовый анализ показал, что в состоянии стеклокерамики образцы состоят из наноразмерных зародышей кристаллитов тетрагерманата лития, $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$, вмонтированных в аморфную матрицу. При переходе в поликристаллическое состояние зародыши тетрагерманата исчезают, а взамен имеет место формирование микрокристаллов гептагерманата лития $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$.

Результаты люминесцентных исследований, легированных ионами хромоматериалов, в целом, подтвердили указанное выше. Так, для

стеклокерамики была найдена люминесценция, которую приписали излучательным переходам в ионах Cr^{3+} , что, в основном, находятся в кристаллитах тетрагерманата $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$, тогда как для поликристаллического состояния люминесценция Cr^{3+} была выявлена как в составе гептагерманата, так и в составе тетрагерманата лития.

Мультифазная структура стеклокерамических литий-германатных соединений, легированных хромом, позволяет создать на их основе люминесцентные преобразователи фиолетового излучения в излучение широкого спектра: от зеленого до красного. Такие материалы могут быть использованы как тонкопленочные покрытия кремниевых элементов солнечных батарей – для повышения их эффективности, или же как покрытия моноцветных светодиодов – для создания на их основе светодиодов белого излучения.

Ключевые слова: стекло, керамика, литий-германат, ион хрома, люминесценция

STRUCTURE AND LUMINESCENCE OF THE $\text{Li}_2\text{O} \cdot 7\text{GeO}_2$ LITHIUM-GERMANATE GLASS-CERAMICS DOPED WITH CHROMIUM IONS

S. Nedilko,
V. Boyko,
Ya. Rybak,
M. Trubitsyn,
M. Volnyanskii,
M. Koptev

Abstract. The set of the samples in glass ceramics and polycrystalline states were made using amorphous $\text{Li}_2\text{O} \cdot 7\text{GeO}_2$ glass (LGO) as starting material and then they were studied using luminescence spectroscopy procedure. The X-ray diffraction analysis had revealed that the glass-ceramics state samples are built by the grains of the lithium tetragermanate, $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$, micro/ nanocrystals incorporated into amorphous germanium oxide, GeO_2 , matrix. When the transition to polycrystalline state occurs the tetragermanate phase crystals vanishes, while heptagermanate crystals, $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ are formed.

The results of luminescent study of the doped with chromium ions materials had confirmed in the whole mentioned above. In fact, luminescence propertied to radiation transitions in Cr^{3+} ions placed mainly in tetragermanat, $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$, was found for glass-ceramics state, while such luminescence propertied both to heptagermanate and tetragermanat was found for polycrystalline state.

It was shown that just multiphase structure of the chromium doped lithium germanate compounds promotes designing luminescent transformers of violet radiation to the broad band green-red radiation. The studied material scan be used as luminescent thin film covers aimed to menhance effectiveness of the silicon solar cells, or to design white light emitting diodes.

Keywords: glass, ceramics, lithium-germanate, chromium ions, luminescence

ЗНАХОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ РІВНЯНЬ ІЗОТРОПНИХ ЛІНІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІПЕРБОЛІЧНИХ ФУНКЦІЙ ТА УТВОРЕННЯ МІНІМАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

С. Ф. ПИЛИПАКА, доктор технічних наук, професор

М. М. МУКВИЧ, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: mmukvich@ukr.net

Анотація. Здійснено аналітичний опис ізотропних ліній нульової довжини та мінімальних поверхонь за допомогою функцій комплексної змінної. Використано інтегральні залежності утворення уявних ізотропних ліній, знайдено з умови рівності нулю диференціала дуги просторової лінії. Параметричні рівняння ізотропних ліній знайдено за допомогою функцій $u = \text{cth } kt$; $v = i \cdot \text{csch } kt$, де i – уявна одиниця, $k = \text{const}$, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$. Аналітичний опис мінімальних поверхонь та приєднаних мінімальних поверхонь здійснено у комплексному просторі з ізотропними лініями у ролі ліній сітки переносу. Наведено вирази коефіцієнтів першої квадратичної форми утворених мінімальних поверхонь.

Досліджено, що для зазначених функцій $u = u(t)$; $v = v(t)$, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$, можна знайти аналітичний опис двох різних просторових ізотропних ліній нульової довжини за допомогою функцій комплексної змінної. Кожній ізотропній лінії відповідає мінімальна поверхня та приєднана мінімальна поверхня, які мають подібні властивості кривини поверхні. Використання функцій комплексної змінної дає змогу отримати нескладний аналітичний опис мінімальних поверхонь та досліджувати їх конструктивні властивості. Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні диференціальних характеристик утворених мінімальних поверхонь для оптимізації інженерних методів проектування поверхонь технічних форм.

Ключові слова: *ізотропна лінія, мінімальна поверхня, приєднана мінімальна поверхня, гіперболічні функції, квадратична форма поверхні, функція комплексної змінної*

Актуальність. Із розвитком CAD систем при проектуванні поверхонь технічних форм та архітектурних конструкцій застосовують відсіки поверхонь, які задані аналітично та мають потрібні геометричні властивості. Геометричні моделі, описані мінімальними поверхнями, мають переваги практичного змісту. Напруженість у кожній точці

мінімальної поверхні є сталою величиною, тому геометрична форма мінімальної поверхні забезпечує рівномірний розподіл зусиль в оболонці та додаткову жорсткість [1, с. 152]. Умова рівності нулю величини середньої кривини H мінімальної поверхні у всіх її точках є необхідною умовою мінімальності площі відсіку поверхні, обмеженого плоскою або просторовою кривою (контуром) на цій поверхні. Відомими є сучасні дослідження акустичних властивостей твердих матеріалів, які утворюють стільникову структуру [2]. Архітектура зазначених стільникових матеріалів базується на періодичних мінімальних поверхнях, що дає змогу при їх використанні покращити звукоізоляцію та забезпечити зменшення вібрації [2].

Знаходження аналітичного опису мінімальної поверхні, яка проходить через замкнену лінію, зводиться до розв'язування нелінійного диференціального рівняння Ейлера-Лагранжа у частинних похідних, яке у загальному випадку не інтегрується [3, с. 683]. Тому одним із напрямів сучасних досліджень є вдосконалення чисельних методів розв'язування диференціального рівняння Ейлера-Лагранжа [4].

Починаючи з робіт С. Лі (S. Lie), проблема знаходження параметричних рівнянь мінімальних поверхонь, розв'язується за допомогою методів теорії функцій комплексної змінної [3, с. 685]. Для цього аналітичний опис мінімальних поверхонь знаходять у комплексному просторі з ізотропними лініями у ролі ліній сітки переносу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для знаходження аналітичного опису мінімальних поверхонь за допомогою функцій комплексної змінної необхідно визначити параметричні рівняння уявної ізотропної лінії нульової довжини. У дисертаційному дослідженні [5] знайдено аналітичний опис ізотропних ліній за формулами Шварца (H. Schwarz) на основі просторової кривої, що лежить на поверхні циліндра та на основі кривої укусу. Але використання формул Шварца для знаходження параметричних рівнянь ізотропних ліній пов'язане з інтегруванням складних виразів і можливе тільки в окремих випадках. У статті [6] було побудовано мінімальні поверхні на основі квазіконформної заміни параметра у рівнянні ізотропної кривої.

У праці [7] авторів даного дослідження було запропоновано здійснювати аналітичний опис ізотропних ліній на основі функцій $u = u(t); v = v(t)$, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$. Для зазначених функцій було знайдено аналітичні умови утворення ізотропних ліній і побудовано мінімальні поверхні за допомогою функцій $u(t) = \sin kt; v(t) = \cos kt$ та $u(t) = \operatorname{ch} kt; v(t) = i \cdot \operatorname{sh} kt$, де $k \in \mathbb{R}$. При цьому потребує дослідження можливість утворення параметричних рівнянь ізотропних ліній та мінімальних поверхонь при використанні інших функцій $u = u(t); v = v(t)$, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$.

Мета дослідження – знайти параметричні рівняння ізотропної лінії за допомогою гіперболічних функцій $u = \operatorname{cth} kt; v = i \cdot \operatorname{csch} kt$, де

i – уявна одиниця, $k = \text{const}$, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$. За допомогою вказаної ізотропної лінії побудувати мінімальні поверхні.

Матеріали і методи дослідження. Аналітичний опис мінімальних поверхонь здійснено у комплексному просторі з твірними ізотропними лініями переносу.

Результати дослідження та їх обговорення. У праці [7] авторів даної статті визначено аналітичні залежності утворення просторових ізотропних ліній нульової довжини за допомогою функцій комплексної змінної $u = u(t)$; $v = v(t)$, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$. Параметричні рівняння ізотропних ліній мають вигляд [8]:

$$x(t) = \int \left(u - \frac{1}{2(u+v)} \right) dt; \quad y(t) = \int \left(v - \frac{1}{2(u+v)} \right) dt; \quad z(t) = \pm \frac{i}{\sqrt{2}} \int \frac{dt}{u+v}, \quad (1)$$

$$x(t) = \int \left(u - \frac{1}{2(u-v)} \right) dt; \quad y(t) = \int \left(v + \frac{1}{2(u-v)} \right) dt; \quad z(t) = \pm \frac{i}{\sqrt{2}} \int \frac{dt}{u-v}. \quad (2)$$

Слід зазначити, що існує обмежена кількість функцій $u = u(t)$; $v = v(t)$, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$ та допускають можливість інтегрування виразів (1) і (2). Розглянемо функції $u(t) = \text{cth } kt = \frac{e^{kt} + e^{-kt}}{e^{kt} - e^{-kt}}$; $v(t) = i \cdot \text{csch } kt = \frac{2 \cdot i}{e^{kt} - e^{-kt}}$, де $k \in \mathbb{R}$, i – уявна одиниця, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$. Тоді параметричні рівняння уявної ізотропної лінії, знайдені за формулами (1), мають вигляд:

$$\begin{aligned} x(t) &= -\frac{1}{2k} \ln \left(1 + \text{ch } kt \right) - 2 \ln \left(\text{sh } kt \right); \\ y(t) &= -\frac{1}{2k} \left[2 \cdot i \cdot \ln \left(\text{ch} \left(\frac{kt}{2} \right) \right) + \ln \left(1 + \text{ch } kt \right) - 2 \cdot i \cdot \ln \left(\text{sh} \left(\frac{kt}{2} \right) \right) \right]; \\ z(t) &= \pm \frac{i \cdot \ln \left(\text{ch } kt \right) + i}{\sqrt{2} k}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здійсимо для функцій комплексної змінної (3) заміну: $t = u + i \cdot v$. Відокремивши дійсну та уявну частину, отримаємо рівняння мінімальної поверхні:

$$\begin{aligned}
X_{u,v} &= \frac{1}{2k} \ln \left[\frac{1}{2} (1 + \cos 2kv + \operatorname{ch} 2ku) \right] - \\
&\quad - \frac{1}{4k} \ln \cos^2 kv \cdot \operatorname{ch}^2 ku + 1 + \sin kv \cdot \operatorname{sh} ku; \\
Y_{u,v} &= \frac{1}{k} \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{kv}{2} \right) \cdot \operatorname{th} \left(\frac{ku}{2} \right) \right] - \frac{1}{k} \operatorname{arctg} \left[\operatorname{ctg} \left(\frac{ku}{2} \right) \cdot \operatorname{th} \left(\frac{kv}{2} \right) \right] - \\
&\quad - \frac{1}{4k} \ln \cos^2 kv \cdot \operatorname{ch}^2 ku + 1 + \sin kv \cdot \operatorname{sh} ku; \\
Z_{u,v} &= \mp \frac{1}{\sqrt{2k}} \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{sch} ku}{\cos kv} + \operatorname{tg} kv \cdot \operatorname{th} ku \right],
\end{aligned} \quad (4)$$

та приєднаної мінімальної поверхні:

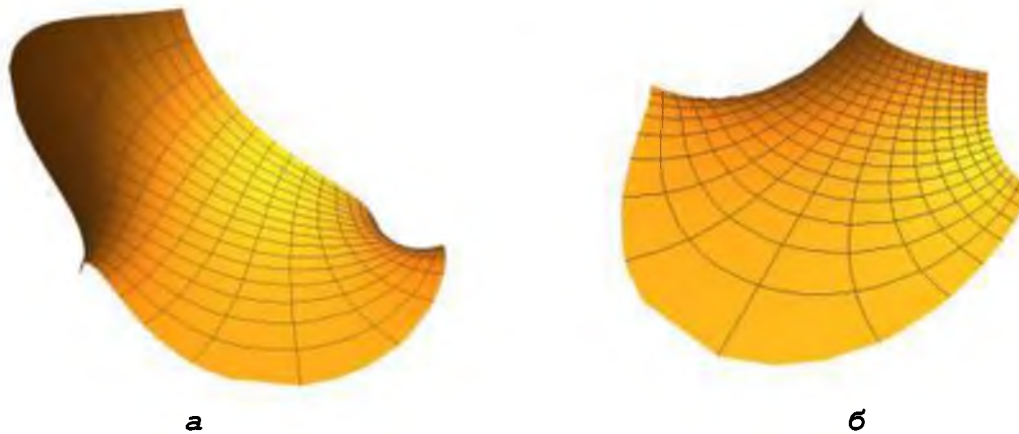
$$\begin{aligned}
X^*_{u,v} &= -\frac{1}{2k} \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{sch} ku}{\cos kv} + \operatorname{tg} kv \cdot \operatorname{th} ku \right] + \frac{1}{k} \operatorname{arctg} \operatorname{ctg} ku \cdot \operatorname{th} kv; \\
Y^*_{u,v} &= -\frac{1}{2k} \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{sch} ku}{\cos kv} + \operatorname{tg} kv \cdot \operatorname{th} ku \right] \\
&\quad + \frac{1}{2k} \ln \left[\frac{1}{2} (1 + \cos 2kv + \operatorname{ch} 2ku) \right] - \frac{1}{2k} \ln \left[\frac{1}{2} (1 + \cos 2kv + \operatorname{ch} 2ku) \right]; \\
Z^*_{u,v} &= \pm \frac{1}{2\sqrt{2k}} \ln \cos^2 kv \cdot \operatorname{ch}^2 ku + 1 + \sin kv \cdot \operatorname{sh} ku.
\end{aligned} \quad (5)$$

Коефіцієнти першої квадратичної форми мінімальних поверхонь (4) та приєднаних мінімальних поверхонь (5) дорівнюють:

$$\begin{aligned}
E = G &= \frac{1 + \cos 2kv + \operatorname{ch} 2ku}{2 \cdot \operatorname{ch} 2ku - \cos 2kv - 4 \sin kv \cdot \operatorname{sh} ku + \cos 2kv + \operatorname{ch} 2ku + 2}; \\
F &= 0.
\end{aligned}$$

Мінімальні поверхні, побудовані за протилежних знаків виразів аплікату, є конгруентними. Вирази коефіцієнтів другої квадратичної форми мінімальної поверхні (4) та приєднаної поверхні (5) мають громіздкий вигляд і в даній статті не наводяться. Знайдені векторно-параметричні рівняння $\bar{R} = \bar{R}_{u,v}$ поверхні (4) та $\bar{R}^* = \bar{R}^*_{u,v}$ поверхні (5), віднесених до ізометричної (або ізотермічної) сітки координатних ліній, задовольняють умовам $\frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial v^2} = 0$ та $\frac{\partial^2 \bar{R}^*}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \bar{R}^*}{\partial v^2} = 0$ відповідно. Тому, згідно з твердженням, доведеним у праці [8] авторів даної статті, поверхні (4) і (5) є мінімальними.

На рисунку (а, б) зображено мінімальні поверхні, побудовані за рівняннями (4), (5) при $k = 1$; $u \in \left(0; \dots \frac{\pi}{2}\right)$; $v \in \left[-\frac{\pi}{3}; \dots \frac{\pi}{3}\right]$.



Відсіки мінімальних поверхонь, побудованих за допомогою ізотропної лінії (1):

- а) відсік мінімальної поверхні, побудованої за рівняннями (4);
- б) відсік приєднаної мінімальної поверхні, побудованої за рівняннями (4)

Параметричні рівняння ізотропних ліній, знайдені за формулами (2) для функцій $u = \text{cth } kt$; $v = i \cdot \text{csch } kt$, де $k \in \mathbb{R}$, мають подібну будову з рівняннями (3). Відповідні мінімальні поверхні мають спільні характеристики кривини поверхні з побудованими поверхнями (4), (5), тому у даній статті результати їх дослідження не наведено.

Висновки і перспективи. Для функцій $u = \text{cth } kt$; $v = i \cdot \text{csch } kt$, де i – уявна одиниця, $k = \text{const}$, які задовольняють умову $u^2 + v^2 = 1$, можна знайти аналітичний опис двох різних просторових ізотропних ліній нульової довжини за допомогою функцій комплексної змінної. Кожній ізотропній лінії відповідає мінімальна поверхня та приєднана мінімальна поверхня, які мають подібні властивості кривини поверхні. Використання функцій комплексної змінної дає змогу отримати нескладний аналітичний опис мінімальних поверхонь та досліджувати їх конструктивні властивості. Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні диференціальних характеристик утворених мінімальних поверхонь для оптимізації інженерних методів проектування поверхонь технічних форм.

Список літератури

1. Расчёт оболочек сложной формы / [Гуляев В. И., Баженов В. А., Гоцуляк Е. А., Гайдайчук В. В.]. – К. : Будівельник, 1990. – 192 с.
2. Abueidda Diab W. Acoustic band gaps and elastic stiffness of PMMA cellular solids based on triply periodic minimal surfaces [Text] / Diab W. Abueidda, Iwona Jasiuk, Nahil A. Sobh // Composite Structures. – 2018. – Vol. 145. – P. 20–27. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.032>.

3. Математическая энциклопедия / [гл. ред. И. М. Виноградов]. – Т. 3. – М. : Советская энциклопедия, 1982. – С. 683–690.
4. Гацунаев М. А. О равномерной сходимости кусочно-линейных решений уравнения минимальной поверхности / М. А. Гацунаев, А. А. Клячин // Уфимский математич. журнал. – 2014. – Т. 6. – № 3. – С. 3–16.
5. Коровіна І. О. Конструювання поверхонь сталої середньої кривини за заданими лініями інцидентії : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.01.01 / І. О. Коровіна. – Київський національний університет будівництва і архітектури. – К., 2012. – 20 с.
6. Аушева Н. М. Моделирование поверхностей на основе квазиконформной замены параметра / Н. М. Аушева, А. Л. Гурин // Сучасні проблеми моделювання : зб. наук. праць. – Мелітополь : МДПУ ім. Богдана Хмельницького, 2017. – № 10. – С. 17–21.
7. Пилипака С. Ф. Дослідження аналітичних залежностей для утворення ізотропних ліній та конструювання мінімальних поверхонь [Електронний ресурс] / С. Ф. Пилипака, М. М. Муквич // Енергетика та автоматика. – 2017. – № 4. – С. 133–143. – Режим доступу до журн. : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/issue/view/375>
8. Пилипака С. Ф. Утворення мінімальних поверхонь за допомогою уявної циклоїди, заданої комплексним натуральним рівнянням / С. Ф. Пилипака, М. М. Муквич // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон : ХНТУ, 2017. – № 3 (62). – Т. 2. – С. 312–316.

References

1. Gulyaev, V. I., Bazhenov, V. A., Gotsulyak, E. A., Gajdajchuk, V. V. (1990). Raschyot obolochek slozhnoj formy [Calculation of shells of complex shape]. Kiev: Budivel'nyk, 192.
2. Diab W. Abueidda, Iwona Jasiuk, Nahil A. Sobh (2018). Acoustic band gaps and elastic stiffness of PMMA cellular solids based on triply periodic minimal surfaces. Composite Structures, 145, 20–27. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.032>.
3. Matematicheskaya entsyklopediya. (1982). [Encyclopedia of mathematics]. Moscow: Sovetskaya entsyklopediya, 683–690.
4. Hatsunaev, M. A., Klyachin, A. A. (2014). O ravnomernoy skhodimosti kusochno-lineynykh resheniy uravneniya minimal'noy poverkhnosti [On uniform convergence of piecewise-linear solutions to minimal surface equation]. Ufimskiy matematychny zhurnal, 6 (3), 3–16.
5. Korovina, I. O. (2012). Konstruyuvannya poverkhon' staloyi seredn'oyi kryvyny za zadanymy liniyamy intsydentsiyi [Construction of surfaces of a constant main curvature according to the given lines of an incident]. Kiev National University of Civil Engineering and Architecture. Kyiv, 20.
6. Ausheva, N., Gurin, A. (2017). Modelyuvannya poverkhon' na osnovi kvazikonformnoyi zaminy parametra [Modeling of surfaces based on quasiconformal parameter change]. Suchasni problemy modelyuvannya, 10, 17–21.
7. Pylypaka, S. F., Mukvich, M. M. (2017). Doslidzhennya analitychnykh zalezhnostey dlya utvorenniya izotropnykh liniy ta konstruyuvannya minimal'nykh poverkhon' [Research of analytical conditions for the formation of isotropic lines and for construction of minimal surfaces]. Enerhetyka ta avtomatyka, 4, 133–143. Available at: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/issue/view/375>
8. Pylypaka, S. F., Mukvich, M. M. (2017). Utvorennya minimal'nykh poverkhon' za dopomohoyu uyavnoyi tsykloyidy, zadanoyi kompleksnym natural'nym

rivnyannyam [Construction of minimal surfaces by the imaginary cycloid given by the complex natural equation]. Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu, 3 (62), 2, 312–316.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ИЗОТРОПНЫХ ЛИНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ И ОБРАЗОВАНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

С. Ф. Пилипака,
Н. Н. Муквич

Аннотация. Получено аналитическое описание изотропных линий нулевой длины и минимальных поверхностей с помощью функций комплексного переменного. Использованы интегральные зависимости образования мнимых изотропных линий, определённые из равенства нулю дифференциала дуги пространственной линии. Параметрические уравнения изотропных линий получены с помощью функций $u = \operatorname{cth} \lambda t$; $v = i \cdot \operatorname{csch} \lambda t$. Аналитическое описание минимальных поверхностей и присоединённых минимальных поверхностей осуществлено в комплексном пространстве с изотропными линиями в качестве линий сети переноса. Приведены выражения коэффициентов первой квадратичной формы образованных минимальных поверхностей.

Показано, что для указанных функций, можно найти аналитическое описание двух различных пространственных изотропных линий нулевой длины с помощью функций комплексного переменного. Каждой изотропной линии соответствует минимальная поверхность и присоединённая минимальная поверхность, которые имеют общие свойства кривизны поверхности. Использование функций комплексного переменного позволяет получить несложное аналитическое описание минимальных поверхностей и исследовать их конструктивные свойства. Перспективы дальнейших исследований заключаются в определении дифференциальных характеристик образованных минимальных поверхностей для оптимизации инженерных методов проектирования поверхностей технических форм.

Ключевые слова: изотропная линия, минимальная поверхность, присоединённая минимальная поверхность, гиперболические функции, квадратичная форма поверхности, функция комплексного переменного

DEFINITION OF PARAMETRIC EQUATIONS OF ISOTROPIC LINES BY HYPERBOLIC FUNCTIONS AND CONSTRUCTION OF MINIMAL SURFACES

S. Pylypaka,
M. Mukvich

Abstract. In this article an analytical description of isotropic lines of zero length and minimal surfaces is carried out with the help of function of a complex variable. The integral dependences of the formation of imaginary isotropic lines, found from the condition of equality of zero differential of the arc of the spatial line, are used. Parametric equations of isotropic lines are found using functions $u = \operatorname{cth} \kappa t$; $v = i \cdot \operatorname{csch} \kappa t$. Analytical description of minimal surfaces and associated minimal surfaces in complex space made of isotropic lines as lines of a translation net. The expressions of the coefficients of the first quadratic form of the formed minimal surfaces are given.

It is explored that for the indicated functions satisfying the condition one can find an analytical description of two different spatial isotropic lines of zero length using the functions of a complex variable. Each isotropic line corresponds to the minimal surface and the associated minimal surface, which have similar properties of the curvature of the surface. Use of function of a complex variable allows to get a simple analytical description of minimal surfaces, investigate their design geometrical parameters. Prospects for further research are to determine the differential characteristics of the created minimal surfaces for optimization of engineering methods of designing surfaces of technical forms.

Keywords: isotropic line, minimal surface, associated minimal surface, hyperbolic functions, quadratic form of a surface, function of a complex variable

УДК 662.7

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОПЛИВНЫХ ГРАНУЛ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ

Д. Н. КОРИНЧУК, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

К. А. КОРИНЧУК, инженер

Институт технической теплофизики НАН Украины

E-mail: Korinchuk@nas.gov.ua

Аннотация. Исследовано термическое разложение измельченной и гранулированной при различных давлениях древесины сосны. Прочность возникших межмолекулярных связей в гранулированной биомассе может отражаться на кинетических параметрах термического разложения биомасс. Исследование влияния давления прессования на кинетические характеристики термического разложения биомассы позволит расширить понимание механизмов гранулообразования биополимеров.

Целью данной работы является определение, с использованием модели неизотермической кинетики Бройдо, кинетических параметров десорбции физически связанной влаги и активационных процессов неизотермического разложения гемицеллюлозы древесной биомассы в зависимости от давления прессования.

Проведен анализ термодеструкции по кинетической модели Бройдо образцов биотоплив из древесины сосны, измельченных и гранулированных при давлении 80–120 МПа, отобранных на территории Украины. Представлены результаты расчета кинетических параметров для стадий десорбции физически связанной влаги и термического разложения гемицеллюлоз. Значение энергии активации десорбции влаги для биомассы сосны находится в диапазоне 52,6–57,5 кДж/моль, где меньшее значение соответствует измельченной древесине, а большее – давлению прессования 120 МПа. Рассчитаны значения кинетических констант термического разложения гемицеллюлоз. Значение энергии активации для измельченной биомассы составляет 104 кДж/моль и повышается для гранул с увеличением давления прессования до 137–170 кДж/моль, что составляет 37–70 %, где большее значение соответствует давлению прессования 120 МПа.

Установлено, что гранулированное биотопливо обладает более высокой термической стойкостью в периодах десорбции влаги и разложения гемицеллюлоз, и она возрастает с повышением давления прессования. Данное явление объяснено частичной сшивкой макромолекул полисахаридного комплекса биомассы между собой либо через молекулу воды, что подтверждает основные положения молекулярной теории брикетирования.

Ключевые слова: биотопливо, биомасса, сосна, гранулирование, энергия активации, метод неизотермической кинетики, модель Бройдо

Актуальность. Биомасса является сложным объектом для энергетического использования. Неоднородный гранулометрический состав, колебания влажности, калорийности приводят к снижению эффективности сжигания данного топлива в котлах. Регулярная наладка и оптимизация режимов работы котельного оборудования требуют высокой квалификации обслуживающего персонала. Более простой путь повышения эффективности энергетического использования биомассы – нормализация биотоплива по гранулометрическому составу и влажности – обеспечит снижение эксплуатационных затрат и высокую эффективность работы оборудования [1].

Повысить качественные показатели топлива, привести их к единым стандартным показателям позволяют технологии гранулирования. В основе механизма гранулирования лежат вызванные давлением и деформацией физико-химические молекулярные взаимодействия в многокомпонентной системе взаимосвязанных биополимеров, заключенных в капиллярно-пористую коллоидную структуру биомассы.

Прочность возникших межмолекулярных связей в гранулированной биомассе может отражаться на кинетических параметрах термического разложения биомасс. Исследование влияния давления прессования на кинетические характеристики термического разложения биомассы позволит расширить понимание механизмов гранулообразования биополимеров.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования в области термического разложения гранулированных биомасс немногочисленны и отражены в работах [2–5].

Представленные в работе [3, 4] результаты свидетельствуют о том, что прессование биомассы снижает прочность молекулярных контактов, поскольку значения энергии активации у гранулированной биомассы ниже, чем у исходного сырья. Данные результаты противоречат молекулярной теории брикетирования [6], согласно которой, образование гранул происходит в результате молекулярного контакта частиц непосредственно между собой либо через молекулу воды. Соответственно, в гранулированной биомассе количество межмолекулярных связей должно превышать значения для измельченной биомассы, и эффективные значения энергии активации также должны повышаться.

В то же время, измельчение биомассы ведет к деструкции макроструктуры полимеров и уменьшению степени молекулярного взаимодействия. Объяснить полученные результаты можно тем, что перед исследованием гранулированное сырье подвергалось размолу, как и исходное. Однако суммарное механическое воздействие прессования и размола могло привести к большим механическим деструктивным явлениям, которые появились в значениях энергии активации. В работе [2] присутствуют обратные утверждения о повышении энергии активации в гранулированном биотопливе, но в области разложения лигнина, что связано, скорее всего, с высокотемпературным прессованием сырья в области пластификации лигниновой составляющей. Существующие исследования достаточно противоречивы и не раскрывают связи механизмов гранулирования биомассы и кинетических характеристик термического разложения.

Цель исследования – определение, с использованием модели неизотермической кинетики Бройдо, кинетических параметров десорбции физически связанной влаги и активационных процессов неизотермического разложения гемицеллюлозы древесной биомассы в зависимости от давления прессования.

Материалы и методы исследования. Образцы древесной биомассы предоставлены ООО Интерсорс, г Берегово. Влажность, плотность, зольность, теплота сгорания исследуемых проб образцов определялись по стандартным методикам (табл. 1). Для проведения исследований влияния давления прессования на кинетические параметры термического разложения биомассы было разработано и изготовлено специальное оборудование (рис.1). Устройство для получения гранул представляет собой

разборную матрицу и пуансон для прессования сырья в гранулы диаметром 8 мм. Высота гранулы зависела от объема исходной смеси. Внутри гранулы формировалось отверстие для размещения в тигле и плотного контакта материала гранулы и термопары дериватографа. Прессование производилось при температуре сырья 25 °С.



Рис. 1. Оборудование для изготовления образцов гранул

Перед термическими исследованиями только негранулированное биотопливо подвергалось размолу. Характеристики биотоплива и параметры давления прессования представлены в табл. 1.

1. Характеристики исследуемых образцов древесины сосны

№	Давление прессования, МПа	Плотность аналитической пробы, кг/м куб.	Влажность Аналитическая W^a , %	Зольность аналитическая на сухую массу A^a , %	Низшая теплота сгорания на аналитическую массу Q^a , МДж/кг
1	0	350 (насыпной вес)			
2	80	890	7,15	0,9	17,2
3	100	920			
4	120	960			

Термические исследования биомассы, торфа, и композиционных топлив проводили на синхронно-термическом дериватографе Q-1000 (Paulik Erdey) в диапазоне температур 20...1000 °С при скорости нагрева 7,4 К/мин. Атмосферой служила неподвижная воздушная среда. В качестве инертного вещества в тигле сравнения использовали оксид алюминия. Коррекцию шкалы температур осуществляли по температуре перехода 573 К кварца с α - в β -форму.

Анализ кинетики термодеструкции образцов проводили на основании термогравиметрических данных в температурном диапазоне до 500 °С. В качестве критерия оценки участия отдельных полимеров древесины в гранулообразовании принималось значение энергии активации удаления влаги и термоокислительной деструкции. Энергия активации термоокислительной деструкции – избыток энергии, необходимый для разрушения химических связей, образующих основную цепь полимера, под воздействием тепла и кислорода воздушной среды. Кривые термогравиметрии позволяют определить энергию активации термоокислительной деструкции, которую рассчитывали с использованием модели Бройдо, применяемой к пиролизу целлюлозы и основанной на двойном логарифмировании.

Этот метод расчета в настоящее время широко используется для изучения зависимости механических свойств полимеров от их химического состава и строения [7]. Суть метода заключается в предположении, что степень конверсии или разложения исследуемого вещества может быть описана выражением:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = K \cdot (1 - \alpha)^n, \quad (1)$$

где K – константа скорости реакции разложения исследуемого вещества;

α – степень конверсии биотоплива;

n – порядок реакции;

τ – время термического разложения, с⁻¹.

Константа скорости реакции разложения исследуемого вещества может быть найдена из уравнения Аррениуса:

$$K = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (2)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹;

E – энергия активации, кДж/моль;

T – температура исследуемого вещества, К.

Степень разложения материала может быть рассчитана как убыль массы вещества, отнесенная к массе вещества за вычетом зольного остатка по уравнению:

$$\alpha = \frac{m_0 - m(\tau)}{m_0 - m_{\kappa}}. \quad (3)$$

Подставив уравнение (2) в уравнение (1), получим зависимость: (4)

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot (1 - \alpha)^n. \quad (4)$$

Разделив левую и правую части уравнения (4) на скорость нагрева $\beta = \frac{dT}{d\tau}$, получим следующую зависимость:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} \cdot (1-\alpha)^n. \quad (5)$$

Предположим, что реакции термического разложения имеют порядок, удовлетворяющий условию $n \leq 1$. Разделив переменные в уравнении (5) и проведя интегрирование правой и левой части, получим зависимость:

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1-\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (6)$$

Интеграл по температуре приближенно может быть рассчитан по следующему уравнению:

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} e^{-\frac{E}{RT}} = \frac{R}{E} T_{\text{ext}}^2 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (7)$$

где T_{ext} – опорная температура, которая соответствует экстремуму скорости разложения вещества.

Заменяя интеграл по температуре и интегрируя правую и левую часть уравнения, получим:

$$-\ln(1-\alpha) = \frac{A R}{\beta E} T_{\text{ext}}^2 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (8)$$

После логарифмирования правой и левой части уравнения (8) получим:

$$\ln(-\ln(1-\alpha)) = \ln\left(\frac{A R}{\beta E} T_{\text{ext}}^2\right) - \frac{E}{RT}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что значение энергии активации E может быть определено как тангенс угла наклона линейного участка кривой, построенной в координатах: $\ln(-\ln(1-\alpha)); \frac{1000}{T}$. Проанализировав кривые термического разложения можно выделить линейные участки, аппроксимировать их линейным уравнением типа $y = a \cdot x + b$, где величина параметра a соответствует величине $\frac{R}{E}$, b – соответствует комплексу $\ln\left(\frac{A R}{\beta E} T_{\text{ext}}^2\right)$, из которого может быть найдено значение предэкспоненциального множителя.

Результаты исследований и их обсуждение. В исследуемом температурном диапазоне можно наблюдать процессы удаления связанной влаги и термическое разложение углеродсодержащих биополимерных комплексов гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина. Идентифицировать

влияние режима гранулообразования на кинетические параметры термодеструкции возможно в периодах десорбции влаги и первичного разложения биомассы, т. е. разложения гемицеллюлоз. Оба периода представляют интерес и с позиции проведения термоподготовки биомассы с целью удаления балластных составляющих с высоким содержанием кислорода, что улучшает энергетические показатели биотоплива.

В интервале температур разложения исследуемых образцов от 25 до 500 °С по термодинамическим зависимостям были построены зависимости степени конверсии от температуры в координатах $\ln(-\ln(1-\alpha)); \frac{1000}{T}$. Полученные графические зависимости для

исходного сырья древесины сосны и гранул (рис. 1), проанализированы на предмет линейных участков соответствующих убыли массы образцов. Графические зависимости для гранул, полученных при давлении прессования 100 МПа и 120 МПа совпадали, поэтому на рис. 1 кривая, полученная при давлении 100 МПа, не приводится. Фрагменты графиков в области (а), соответствуют периоду десорбции физически связанной влаги из микро- и макропор, фрагменты графиков в области (b) периоду преимущественно термодеструкции гемицеллюлоз. Как видно из (рис.1), эти участки достаточно точно аппроксимируются линейными зависимостями, что говорит о порядке суммарных реакций протекающих в образцах $n \leq 1$. В первом периоде убыль массы исследованных образцов коррелирует со значениями влажности.

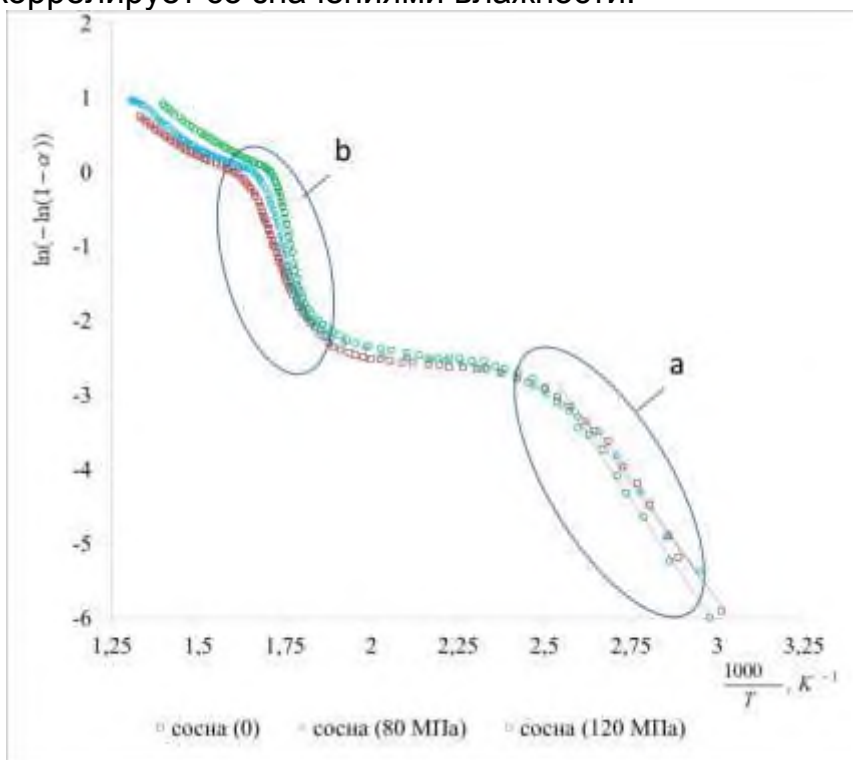


Рис. 2. Графические результаты анализа неізотермического разложения биомассы древесины в исходном и гранулированном состоянии. Участок а – период преимущественно десорбции влаги, b – период неізотермического разложения гемицеллюлоз

Уравнения регрессии и рассчитанные по ним величины энергии активации для участка преимущественной десорбции влаги, представлены в табл. 2. В интервале температур 130...230 °С для биомассы сосны существенных изменений массы не наблюдается. Разложение наступает интенсивно и при более высоких температурах.

2. Кинетические характеристики первого периода разложения древесины сосны

№	Давление Прессования, МПа	Температурный интервал разложения (T_{ext}), °С	Степень конверсии, α	Аппроксимирующая зависимость, (коэффициент корреляции R)	Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, c^{-1}	Энергия активации E , Дж/моль
1	0	28-168/(85)	0-0,07	$-6,32 \cdot x + 13,2$ ($R=0,99$)	12,19	52600
2	80	28-168/(86)	0-0,07	$-6,71 \cdot x + 14,3$ ($R=0,99$)	13,35	55800
3	100	28-168/(87)	0-0,07	$-6,87 \cdot x + 14,6$ ($R=0,99$)	13,66	57000
4	120	28-168/(87)	0-0,07	$-6,91 \cdot x + 15$ ($R=0,99$)	13,77	57500

Значение энергии активации в первом периоде для биомассы сосны находится в диапазоне 52,6–57,5 кДж/моль. Прослеживается четкая закономерность между увеличением давления прессования, приростом плотности материала и увеличением энергии активации термического разложения в первом периоде. Значение энергии активации для прессованной биомассы превышает значение для исходного негранулированного сырья на 6–9 %, где большее значение соответствует давлению прессования 120 МПа.

3. Кинетические характеристики второго этапа разложения древесины сосны

№	Давление прессования, МПа	Температурный интервал разложения (T_{ext}), °С	Степень конверсии, α	Аппроксимирующая зависимость, (коэффициент корреляции R)	Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, c^{-1}	Энергия активации E , Дж/Моль
1	0	178-335/(315)	0,07-0,56	$-12,5 \cdot x + 20,02$ ($R=0,995$)	18,7	104000
2	80	178-320/(297)	0,715-0,55	$-16,5 \cdot x + 27,2$ ($R=0,98$)	26,2	137000
3	100	178-310/(290)	0,715-0,56	$-18,8 \cdot x + 31,8$ ($R=0,99$)	31,8	156000
4	120	178-295/(290)	0,715-0,55	$-20,3 \cdot x + 35$ ($R=0,99$)	34,8	170000

При дальнейшем повышении температуры до 227...335 °С наблюдался второй период термодеструкции, сопровождающийся большей потерей массы соответствующей преимущественно разложению наименее термостойкой низкокалорийной составляющей биомассы – гемицеллюлозы.

Для линейного участка преимущественного разложения гемицеллюлоз исследуемых образцов так же определены аппроксимирующие уравнения и рассчитаны значения кинетических параметров (табл. 3). Как и в первом периоде, сохраняется закономерность между увеличением давления прессования, приростом плотности материала и увеличением энергии активации термического разложения. Значение энергии активации для измельченной биомассы составляет 104 кДж/моль и повышается для гранул с увеличением давления прессования до 137–170 кДж/моль, что составляет 37–70 %, где большее значение соответствует давлению прессования 120 МПа. Также в прессованном биотопливе наблюдается смещение точки максимума T_{ext} в сторону уменьшения.

Данное явление может оказывать положительный эффект при термической подготовке гранул с целью повышения теплоты сгорания, поскольку содержащиеся в большом количестве полисахаридные комплексы глюкоманнан и арабиногалактан в составе гемицеллюлоз сосновой биомассы затягивают процесс термического разложения в область более высоких температур, что приводит к перекрытию пика разложения целлюлозы пиком разложения гемицеллюлоз [8, 9]. Смещение точки максимума T_{ext} в сторону уменьшения позволяет разделить температурные диапазоны разложения гемицеллюлозы и целлюлозы, тем самым в процессе термообработки минимизировать потерю калорийной составляющей [10].

Термическое разложение образцов при температурах выше 295...335 °С соответствует преимущественно разложению лигниновой составляющей сосны. Аппроксимация линейной зависимостью кривых (рис. 2) в диапазоне температур 335...450 °С позволила получить следующие уравнения регрессии и рассчитанные по ним величины энергии активации: $P=120$ МПа; $y = -3,011x + 5,0899$; $R^2 = 0,9944$; $E = 25,1$ кДж/моль; $P=80$ МПа $y = -3,0301x + 4,9752$; $R^2 = 0,9818$; $E = 25,2$ кДж/моль; $P = 0$ МПа; $y = -3,0148x + 4,7334$; $R^2 = 0,9916$; $E = 25,1$ кДж/моль.

Как видно из уравнений, давление прессования не оказывает влияния на значения энергии активации термического разложения лигниновой составляющей. Отклонение значений энергии активации не превышают 0,5 %. Следовательно, термическая стабильность лигниновой составляющей в данных условиях прессования не повышается. Соответственно в процессе гранулообразования количество молекулярных связей с участием лигнининовой составляющей незначительно, а лигниновая составляющая не имеет определяющего значения при гранулообразовании в данных условиях [11].

Неизотермический анализ разложения гранул биомассы сосны показал, что гранулированное биотопливо обладает более высокой термической стойкостью в диапазоне температур 227...335 °С, и она

возрастает с повышением давления прессования. Исходя из того, что процесс термического разложения представляет собой разрыв физико-химических связей внутри его составляющих с последующим весьма быстрым образованием конечных продуктов разложения, высокие значения энергии активации можно объяснить частичной сшивкой макромолекул полисахаридного комплекса гемицеллюлоз биополимеров, входящих в состав биомассы.

Данное заключение об увеличении числа сшивок и повышении прочности молекулярных связей при прессовании хорошо согласуется с положениями молекулярной теории брикетирования, указанными выше, и свидетельствует об участии полисахаридного комплекса в процессах гранулообразования при низкотемпературном прессовании. Также увеличение значений энергии активации в области десорбции влаги, может свидетельствовать об участии молекул воды в процессе сшивки макромолекул биомассы. Данное явление, как указывалось ранее, также предполагала теория брикетирования.

Выводы и перспективы. С использованием кинетической модели Бройдо получены значения кинетических параметров десорбции влаги и неизотермического разложения гемицеллюлоз для биомассы древесины сосны измельченной и гранулированной при давлении в диапазоне 80–120 МПа.

Установлено, что гранулированное биотопливо обладает более высокой термической стойкостью в периодах десорбции влаги и разложения гемицеллюлоз, и она возрастает с повышением давления прессования. Данное явление объяснено частичной сшивкой макромолекул полисахаридного комплекса биомассы между собой либо через молекулу воды, что подтверждает основные положения молекулярной теории брикетирования.

Установлено, что в процессе гранулообразования количество молекулярных связей с участием лигниновой составляющей незначительно, а лигниновая составляющая при низкотемпературном прессовании не имеет определяющего значения в гранулообразовании.

Также в прессованном биотопливе наблюдается смещение точки максимума T_{ext} в сторону уменьшения. Это явление позволяет предположить, что процесс гранулирования может влиять на температурные диапазоны разложения гемицеллюлозы и целлюлозы, что может быть использовано при термоподготовке биотоплив для уменьшения потери калорийной составляющей.

Результаты выполненных исследований можно использовать при расчетах процессов, связанных с термической подготовкой гранул древесины сосны.

Список литературы

1. Снежкін Ю. Ф. Композиційні палива на основі торфу і рослинної біомаси : монографія / Снежкін Ю. Ф., Корінчук Д. М., Михайлик В. А. – К. : Либідь, 2012. – 211 с.

2. Утгоф С. С. Идентификация химических и механических изменений в уплотненной термомеханическим способом древесине ольхи / С. С. Утгоф // Труды БГТУ. Серия 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2014. – № 4 (168). – С. 124–129.
3. Марьяндышев П. А. Экспериментальное исследование процесса термического разложения биотоплива / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, Н. В. Шкаева, Л. В. Константинович // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – Т. 2, № 4 (52). – С. 22–25.
4. Марьяндышев П. А. Анализ термогравиметрических данных различных видов древесины / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, В. К. Любов // Химия твердого топлива. – 2015. – № 2. – С. 59–64.
5. Марьяндышев П. А. Анализ термогравиметрических и кинетических данных различных видов древесного биотоплива Северо-Западного региона Российской Федерации / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, В. К. Любов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2016. – № 1 (349). – С. 167–182.
6. Наумович В. М. Теоретические основы процесса брикетирования торфа / В. М. Наумович. – Минск : АН БССР, 1960. – 208 с.
7. Broido A. A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data. // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 1969. – Vol. 7, №. 10. – P. 1761–1773.
8. Петрунина Е. А. Термический анализ затопленной древесины / Е. А. Петрунина, С. Р. Лоскутов, А. С. Шишкин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник – 2017. – Т. 21, № 1. – С. 54–63.
9. Терентьева Э. П. Химия древесины, целлюлозы и синтетических полимеров : учеб. пособие / Терентьева Э. П., Удовенко Н. К., Павлова Е. А. – С-Пб. : СПбГТУРП, 2014. – 83 с.
10. Снежкін Ю. Ф. Дослідження режимів термообробки біомаси та торфу у виробництві композиційного біопалива / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, М. М. Безгин // Промислова теплотехніка. – 2017. – Т. 39, №. 1. – С. 53–57.
11. Соловьева Т. В. Превращение компонентов лигноуглеводной матрицы в технологии древесноволокнистых плит : дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.03 / Соловьева Т. В. БГТУ. – Минск, 1998. – 259 с.

References

1. Snezhkin, YU. F., Korinchuk, D. M., Mikhaylik, V. A. (2012). Kompozytsiyni palyva na osnovi torfu i roslynnoyi biomasy: syrovyna, vlastyvoli, rezhymy, obladnannya, tekhnolohiyi: monografiya [Composite fuels based on peat and plant biomass]. K. : Vid-vo "Libid", 211.
2. Utgof, S. S. (2014). Identifikatsiya khimicheskikh i mekhanicheskikh izmeneniy v uplotnennoy termomekhanicheskim metodom drevesinyne olkhi [Identification of chemical and mechanical changes in thermomechanically compacted alder wood]. Trudy BGTU. Seriya 4: Khimiya, tekhnologiyaorganicheskikhveshchestv i biotekhnologiya, 4, (168), 124–129.
3. Maryandyshev, P. A., Chernov A. A., Shkayeva, N. V., Konstantinovich, L. V. (2013). Eksperimentalnoye issledovaniye protsessa termicheskogo razlozheniya biotopliva [Experimental study of the process of thermal decomposition of biofuel]. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta, 2 (4 (52)), 22–25.
4. Maryandyshev, P. A., Chernov A. A., Lyubov, V. K. (2015). Analiz termogravimetricheskikh dannykh razlichnykh vidov drevesiny [Analysis of thermogravimetric data of various types of wood]. Khimiya tverdogo topliva, 2, 59–64.

5. Mar'yandyshev, P. A., Chernov, A. A., Lyubov, V. K. (2016). Analiz termogravimetricheskikh i kineticheskikh dannykh razlichnykh vidov drevesnogo biotopliva Severo-Zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii [Analysis of thermogravimetric and kinetic data of various types of wood biofuel in the North-West region of the Russian Federation]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal, 1 (349), 167–182.
6. Naumovich, V. M. (1960). Teoreticheskiye osnovy briketirovaniya orfa [Theoretical foundations of the peat briquetting process]. Minsk: AN BSSR, 208.
7. Broido, A. (1969). A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 7 (10), 1761–1773.
8. Petrunina, Ye. A., Loskutov, S. R., Shishikin, A. S. (2017). Termicheskiy analiz zatoplennoy drevesiny [Thermal analysis of flooded wood]. Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin, 21 (1), 54–63.
9. Terentyeva, E. P., Udovenko, N. K., Pavlova, Ye. A. (2014). Khimiya drevesiny, tsellyulozy i sinteticheskikh polimerov: uchebnoye posobiye [Chemistry of wood, cellulose and synthetic polymers]. S-Pb.: SPbGTURP, 83.
10. Snezhkin, Y. F., Korinchuk, D. M., Bezhin, M. M. (2017). Doslidzhennya rezhymiv termoobrobky biomasy ta torfu u vyrobnytstvi kompozytsiynoho biopalyva [Investigation of modes of heat treatment of biomass and peat in the production of composite biofuels]. Promyslova teplotekhnika, 39 (1), 53–57.
11. Solovyeva, T. V. (1998). Prevrashcheniye komponentov lignouglevodnoy matritsy v tekhnologii drevesnovoloknistykh plit [The transformation of the components of the ligno-carbohydrate matrix into the technology of wood fiber boards]. Minsk, 259.

НЕІЗОТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ ІЗ ДЕРЕВИНИ СОСНИ

**Д. М. Корінчук,
К. О. Корінчук**

Анотація. Досліджено термічний розклад подрібненої та гранульованої за різних тисків деревини сосни. Міцність міжмолекулярних зв'язків, які виникають у гранульованій біомасі, може відображатися на кінетичних параметрах термічного розкладання біомас. Дослідження впливу тиску пресування на кінетичні характеристики термічного розкладання біомаси дозволить розширити розуміння механізмів гранулоутворення біополімерів.

Метою дослідження є визначення, з використанням моделі неізотермічної кінетики Бройдо, кінетичних параметрів десорбції фізично зв'язаної вологи і активаційних процесів неізотермічного розкладання геміцелюлози деревної біомаси залежно від тиску пресування.

Проаналізовано термодеструкцію по кінетичній моделі Бройдо зразків біопалив з деревини сосни подрібнених і згранульованих при тиску 80–120 МПа, відібраних на території України. У роботі подано результати розрахунку кінетичних параметрів для стадій десорбції фізично зв'язаної вологи і термічного розкладання геміцелюлоз.

Значення енергії активації десорбції вологи для біомаси сосни знаходиться в діапазоні 52,6–57,5 кДж / моль, де менше значення відповідає подрібненій деревині, а більше – тиску пресування 120 МПа. Розраховано значення кінетичних констант термічного розкладання геміцелюлоз. Значення енергії активації для подрібненої біомаси становить 104 кДж/моль і підвищується для гранул зі збільшенням тиску пресування до 137–170 кДж/моль, що становить 37–70 %, де більше значення відповідає тиску пресування 120 МПа.

Встановлено, що гранульоване біопаливо має більш високу термічну стійкість у періодах десорбції вологи і розкладання геміцелюлоз, і вона зростає з підвищенням тиску пресування. Дане явище пояснено частковою зшивкою макромолекул полісахаридного комплексу біомаси між собою або через молекулу води, що підтверджує основні положення молекулярної теорії брикетування.

Ключові слова: біопаливо, біомаса, сосна, гранулювання, енергія активації, метод неізотермічної кінетики, модель Бройдо

NON-ISOTHERMAL ANALYSIS OF PELLETS FROM PINE WOOD

D. Korinchuk,
K. Korinchuk

Abstract. The article is devoted to the study of the thermal decomposition of milled and granulated pine wood at various pressures. The strength of the intermolecular bonds that arise in granulated biomass can be reflected in the kinetic parameters of the thermal decomposition of biomass. Investigation of the influence of the pressing pressure on the kinetic characteristics of the thermal decomposition of biomass allows broadening the understanding of the mechanisms of biopolymers pellet formation.

The purpose of this paper is to determine the kinetic parameters of desorption of physically bound moisture and to determine activation processes of non-isothermal decomposition of hemicelluloses of wood biomass, depending on the pressing pressure, using the non-isothermal kinetics Broido model.

The work provides an analysis according to the Broido kinetic model of the thermal destruction of biofuel samples from pine wood milled and granulated at a pressure of 80–120 MPa selected over the territory of Ukraine. The results of calculation of kinetic parameters for the stages of desorption of physically-bound moisture and thermal decomposition of hemicelluloses are presented. The value of the activation energy of moisture desorption for pine biomass is in the range of 52.6– 57.5 kJ / mol, where the less value corresponds to milled wood, and the highest value corresponds to the pressing pressure of 120 MPa. The values of the kinetic constants of the thermal decomposition of hemicelluloses are calculated. The value of the activation energy for milled biomass is 104.0 kJ / mol and increases for pellets with an increase of the pressing pressure to 137–170 kJ / mol, which are 37–70%, where a highest value corresponds to a pressing pressure of 120 MPa.

It has been established that granulated biofuel has a higher thermal stability during periods of desorption of moisture and decomposition of hemicelluloses, and it increases with increasing a pressing pressure. This fact is explained by the partial cross-linking of the macromolecules of the polysaccharide biomass complex with each other or through a water molecule, which confirms the main provisions of the molecular theory of briquetting.

Keywords: *biofuel, biomass, pine wood, granulation, activation energy, non-isothermal kinetics method, Broido model*

УДК 621.314.55(088.8)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА КІЛЬЦЕВИХ МАГНІТОПРОВОДАХ

М. В. БРАГІДА, кандидат технічних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: nni. elektrik@gmail.com

Анотація. *Визначення оптимальних параметрів пристроїв та режимів роботи є однією з основних задач проектування. Найпоширенішими є методи математичного моделювання електричних машин. Сучасне програмне забезпечення дає змогу доволі точно розрахувати електромагнітні процеси та визначити режими роботи. За допомогою комп'ютерної програми Mathcad можна безпосередньо працювати з математичним апаратом, вносити зміни та корективи.*

Метою дослідження є визначення режимів роботи зварювального трансформатора, описаного в [6] за допомогою математичного моделювання, та їх оцінка з результатами досліджу.

За відомими параметрами конструкції зварювального трансформатора та результатами дослідження визначалися індуктивності та активні опори обмоток і розраховувалися струми.

Доцільно математичну модель використовувати для рішення зворотної задачі – знаходження оптимальних параметрів зварювального трансформатора при заданих струмах.

Ключові слова: *зварювальний трансформатор, кільцевий магнітопровід, регулювання струму зварювання, первинна обмотка, вторинна обмотка, комп'ютерна програма Mathcad, система диференціальних рівнянь.*

Актуальність. Зварювальний трансформатор, що складається з кільцевого магнітопроводу, на якому розміщені первинна та вторинна обмотки, та магнітопроводу регулювання струму зварювання, що охоплюється частиною витків вторинної обмотки, потребує оптимізації його параметрів та режимів роботи. За допомогою математичної моделі та комп'ютерної програми Mathcad можна знайти прийнятні технічні рішення.

Математичне моделювання електромагнітних процесів дозволяє доволі точно визначити його параметри не витрачаючи час та кошти на дослідні зразки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У попередній праці [2, ст.131–135] розглянуто методику визначення параметрів системи регулювання струму зварювання, а саме: магнітопроводу, який забезпечує максимально допустимий струм зварювання.

Математична модель електромагнітних процесів зварювального трансформатора дає змогу оптимізувати їх за значенням струмів в обмотках і підтвердити достовірність розрахунків цих параметрів. Доволі часто її доцільно використовувати для рішення зворотної задачі – знаходження оптимальних параметрів зварювального трансформатора при заданих струмах.

Сучасні технічні засоби та програмне забезпечення [5, ст. 286–380] дозволяють без надмірних зусиль вирішувати подібні задачі та, оптимізувавши режими роботи, підібрати й уточнити конструкційні параметри.

Мета дослідження – визначення за допомогою математичної моделі режимів роботи зварювального трансформатора та їх оцінка з результатами дослідів.

Матеріали і методи дослідження. Робочий процес зварювального трансформатора дослідимо за допомогою рівнянь падіння напруг у його обмотках. Для однофазного двохобмоткового трансформатора дійсні такі рівняння напруг у диференціальній формі:

$$u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} + r_1 \cdot i_1; \quad (1)$$

$$u_2 = -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} - M \cdot \frac{di_1}{dt} - r_2 \cdot i_2 - L_3 \frac{di_2}{dt},$$

де L_1 , L_2 , L_3 – індуктивності обмоток: первинної, вторинної та частини вторинної, що охоплює магнітопровід регулювання, Гн;

M – взаємна індуктивність первинної та вторинної обмоток, Гн;

r_1 , r_2 – активні опори первинної та вторинної обмоток;

u_1 , u_2 , i_1 , i_2 – миттєві значення напруг і струмів первинної та вторинної обмоток.

У трансформаторах без феромагнітного осердя величини L_1 , L_2 , L_3 , M постійні, а з феромагнітним осердям, знехтувавши впливом вищих гармонік струму, згідно з [3 с. 274] приймаємо, що ці величини постійні і для певного режиму роботи трансформатора зі стальним осердям.

Індуктивність первинної обмотки трансформатора визначимо за конструкційними параметрами з виразу [1, с. 88]

$$L_1 = \frac{W_1^2 \cdot h \cdot B_1}{2\pi \cdot H_1} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (2)$$

де W_1 – кількість витків первинної обмотки, вит;

h – висота магнітопроводу, м;

R_1, R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси кільцевого магнітопроводу, м.

Значення напруженості магнітного поля H_1 , згідно із законом повного струму:

$$H_1 = \frac{i_1 \cdot W_1}{l_{cp}}, \quad (3)$$

де l_{cp} – довжина середньої лінії кільця магнітопроводу, м.

Магнітну індукцію B_1 знайдемо із таблиці намагнічування сталі [4 с. 390].

Індуктивність вторинної обмотки визначимо аналогічно, підставивши у вираз (2) число витків обмотки.

Значення взаємної індукції M знайдемо згідно з [1 с. 91],

$$M = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot h \cdot B_1}{2\pi \cdot H_1} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (4)$$

де W_2 – число витків вторинної обмотки трансформатора, вит.

Індуктивність магнітопроводу регулювання струму зварювання L_3 визначимо за конструкційними параметрами, підставивши у вирази (2, 3) значення параметрів.

Конструкційні параметри трансформатора та магнітопроводу регулювання струму зварювання:

$W_1=350$ витків; $W_2=85$ витків; $h=0,06$ м; $R_1=0,085$ м; $R_2=0,12$ м; $W_{2p}=41$ виток; $h_p=0,096$ м; $R_{1p}=0,024$ м; $R_{2p}=0,056$ м.

Запишемо (1) у вигляді

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{u_1}{L_1} - \frac{M}{L_1} \cdot \frac{di_2}{dt} - \frac{r_1}{L_1} \cdot i_1; \quad (5)$$

$$\frac{di_2}{dt} = -\frac{u_2}{L_2 + L_3} - \frac{M}{L_2 + L_3} \cdot \frac{di_1}{dt} - \frac{r_2}{L_2 + L_3} \cdot i_2.$$

Виконавши математичні перетворення, представимо систему диференціальних рівнянь (5) у стандартній формі (формі Коші):

$$\frac{di_1}{dt} = -\frac{r_1 \cdot (L_2 + L_3)}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \cdot i_1 + \frac{M \cdot r_2}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \cdot i_2 + \frac{M \cdot u_2 + u_1 \cdot (L_2 + L_3)}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2}; \quad (6)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{M \cdot r_1}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \cdot i_1 - \frac{r_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \cdot i_2 - \frac{u_2 \cdot L_1 + M \cdot u_1}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2}$$

Результати досліджень та їх обговорення. У такій формі система диференціальних рівнянь розв'язується в комп'ютерній програмі Mathcad. Нижче наведено форму запису для розрахунку в програмі Mathcad та результати розрахунків [5 с. 286].

ORIGIN := 1

$$r_2 := 0.04 \quad r_1 := 1 \quad L_1 := 0.1 \quad L_2 := 0.0$$

$$M := 0.0488 \quad L_3 := 0.0024$$

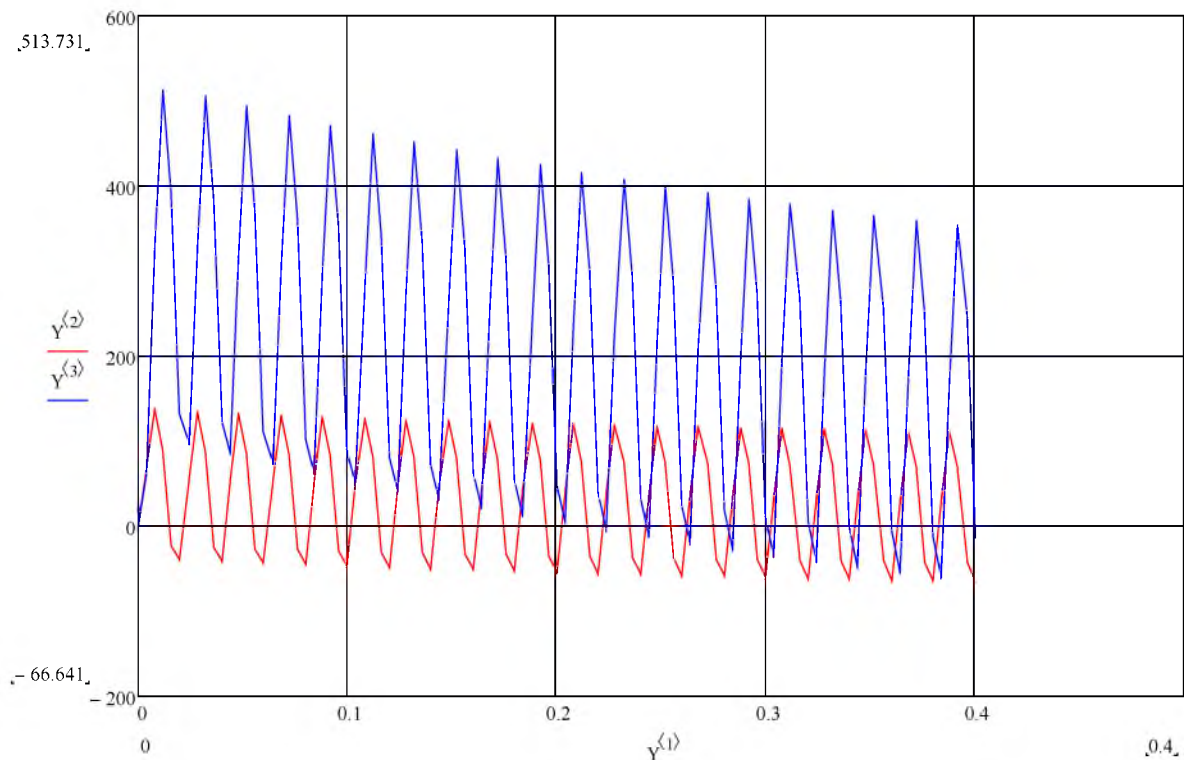
$$U_1 := 310 \quad U_2 := 28$$

$$i := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$D(t, i) := \begin{bmatrix} -r_1 \cdot \frac{(L_2 + L_3)}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \cdot i_1 + \frac{M \cdot r_2}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \cdot i_2 + \frac{M \cdot U_2 \cdot \sin(314 \cdot t + \pi) + U_1 \cdot \sin(314 \cdot t) \cdot (L_2 + L_3)}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \\ \frac{M \cdot r_1}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \cdot i_1 - \frac{L_1 \cdot r_2}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \cdot i_2 - \frac{M \cdot U_1 \cdot \sin(314 \cdot t) + L_1 \cdot U_2 \cdot \sin(314 \cdot t + \pi)}{L_1 \cdot (L_2 + L_3) - M^2} \end{bmatrix}$$

$$Y := \text{rkfixed}(i, 0, 0.4, 100, D)$$

Залежність струмів i_1 , i_2 від часу t подано на рисунку.



Залежність струмів первинної та вторинної обмоток від часу

Висновки і перспективи. Розмах коливань синусоїди струму первинної обмотки – 148 А, що відповідає діючому значенню 52 А. Розмах коливань синусоїди струму вторинної обмотки – 407 А, що відповідає діючому значенню 144 А. Струм первинної обмотки під час горіння дуги коливався в межах $37 \div 43$ А, а вторинний – $153 \div 170$ А, що становить у середньому 30% та 12%. Така невідповідність пояснюється недостатньою визначеністю магнітних показників сталі магнітопроводів.

Список літератури

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1973 – 750 с.
2. Брагіда М. В. Зварювальний трансформатор із плавним регулюванням струму зварювання / М. В Брагіда, І. С. Зубков // Науковий вісник НУБіП України. – 2015. – Вип. 224. – С.131–135.
3. Вольдек А. И. Электрические машины : учеб. для студ. высш. техн. учеб. заведений] /А. И. Вольдек. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
4. Гольберг О. Д. Проектирование электрических машин : учеб. для втузов / Гольберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. – М. : Высш. шк., 1984. – 431 с.
5. Кирьянов Д. В. Mathcad 12 / Д. В. Кирьянов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 576 с.
6. Пат. 72397, Україна, МПК Н 01 F 30/06/ Трансформатор для зварювання / Васьковський Ю. М., Брагіда М. В., Чуєнко Р. М., Брагіда Є. М. ; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № 201014661 ; заявл. 06. 12. 10 ; опубл. 27. 08 12, Бюл. №16.

References

1. Bessonov, L. A. (1973). Teoretichni osnovi elektrotechniki [Theoretical bases electrical engineers]. Moscow, Bischa schkola, 750.
2. Bragida, M. V., Sybkov, I. S. (2015). Svarochni transformator plavnim rehulirovannjam strumu svaruvanja [The welding transformer with smooth regulating of a welding current] Naukovi visnik NUBiP Ukrainy, 224, 131–135.
3. Voldek, A. I. (1974). Elektrichni maschini [Electric cars]. Leningrad,; Enerhija, 840.
4. Golderg, O. D., Gurin, A. S., Sviridenko, I. S. (1984). Proektirowanie elektrichnich maschin [Designing of electric cars]. Moscow: Bischa schkola, 431.
5. Kiryanov, D. V. (2005). Mathcad 12 [Mathcad 12]. Sankt-Petersburg: BCHV-Petersburg, 576.
6. Vaskovski, Ju. M., Bragida, M. V., Chuenko, R. M., Bragida, E. M. (2012). The transformer for welding. Patent of Ukraine for useful model. Н 01 F 30/06. № 72397; declared 06.12.2010; published 27.08.2012, № 16.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С КОЛЬЦЕВЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

М. В. Брагида

Аннотация. Определение оптимальных параметров устройств и режимов их работы является одной из важнейших задач проектирования. Наиболее широкое распространение получили методы математического моделирования электрических машин. Современное программное обеспечение позволяет достаточно точно рассчитывать электромагнитные процессы в трансформаторе и определять режимы работы. Компьютерная программа Mathcad позволяет непосредственно работать с математическим аппаратом, вносить изменения и коррективы.

Цель исследования – определение режимов работы сварочного трансформатора, описанного в [6] с помощью математического моделирования и их оценка с результатами исследований.

Для этого необходимо определить параметры сварочного трансформатора и, подставив их в математическую модель, рассчитать токи.

Математическую модель можно использовать для определения оптимальных параметров сварочного трансформатора при известных токах.

Ключевые слова: сварочный трансформатор, кольцевой магнитопровод, регулирование сварочного тока, вторичная обмотка, первичная обмотка, компьютерная программа Mathcad, система дифференциальных уравнений

MATHEMATICAL MODELLING OF THE WELDING TRANSFORMER WITH RING MAGNETS

M. Bragida

Abstract. Definition of optimum parameters of devices and modes of their work is one of the major problems of designing. Most the wide circulation was received by methods of mathematical modeling of electric cars. The modern software allows to count precisely enough electromagnetic processes in the transformer and to define operating modes. Computer program MathCAD allows to work directly with mathematical apparatus, to make changes and corrective amendments.

Definition of operating modes of the welding transformer described in [6] by means of mathematical modeling and their estimation with results of researches is a research objective.

For this purpose it is necessary to define parameters of the welding transformer and, having substituted them in mathematical model, to calculate currents.

The mathematical model can be used for definition of optimum parameters of the welding transformer at known currents.

Keywords: the welding transformer, regulation of a welding current, a secondary winding, a primary winding, computer program MathCAD, system of the differential equations

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ СПОТВОРЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ ВИЩИМИ ГАРМОНІКАМИ

А. М. ГЛАДКИЙ, кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
**Національний університет біоресурсів
природокористування України**
E-mail: amglad@ukr/net

Анотація. Поширення сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій веде до збільшення частки споживачів із нелінійними навантаженнями, які спричиняють спотворення синусоїдальної напруги вищими гармоніками, що негативно впливає на інше обладнання, викликаючи його перегрів і пошкодження, порушення синхронізації пристроїв і збої в мережах передачі даних та інші негативні наслідки. Зазначені фактори зумовлюють необхідність розробки нових методів досліджень, аналізу і мінімізації нелінійних спотворень напруги.

Мета дослідження – аналіз динаміки спотворень форми синусоїдальної напруги вищими гармоніками, визначення числових характеристик спотворень та можливостей їх мінімізації.

Дослідження динаміки спотворень форми кривої синусоїдальної напруги вищими гармоніками проводилось шляхом числового моделювання миттєвого значення напруги за допомогою автоматизованої системи.

Оцінка спотворень форми напруги проводилась за відхиленням від синусоїди «опорних» точок – амплітудного значення напруги U , і фази амплітудного значення напруги φ .

Проведено моделювання та аналіз спотворень форми синусоїдальної напруги другою та третьою вищими гармоніками. Отримано залежності огибаючої напруги U від фази φ і фази φ огибаючої від початкової фази φ_1 другої і третьої гармонік та проведено оцінки спричинених цими гармоніками спотворень. Приведено формули для оцінки граничних відхилень амплітуди: $U_{\max}=1+Kn$; фази: $\varphi_1=\arccos(nKn)$; розрахунку початкової фази гармоніки φ_n , за якої відхилення фази φ рівні нулю: $\varphi_2=\pm\pi/2$ і $\varphi_3=0$, $\varphi_3=\pm\pi$, та рівняння для φ_1 і φ , за яких відхилення U дорівнюють нулю.

Отримані при моделюванні оцінки спотворень синусоїдальної напруги вищими гармоніками можуть використовуватися для визначення допустимих рівнів нелінійних спотворень, обчислення похибок вимірювань амплітуди, частоти і різниці фаз від вищих гармонік, розробки методів мінімізації спотворень та ін.

Ключові слова: електроенергія, якість, гармоніки, спотворення напруги, моделювання

Актуальність. Застосування електроенергії забезпечує впровадження нових електротехнологій у промисловості та сільському господарстві. Водночас, постійне зростання обсягів нелінійних навантажень, зумовленого, зокрема, широким впровадженням комп'ютерно-інтегрованих технологій, енергозберігаючих джерел світла, частотно-регульованого приводу інших сучасних електроспоживачів із нелінійною вольт-амперною характеристикою негативно впливає на рівень якості електроенергії, зумовлюючи виникнення вищих гармонік.

Вищі гармоніки спричиняють спотворення синусоїдальності кривої напруги і негативно впливають на інше обладнання, викликаючи його перегрів і пошкодження, порушення синхронізації пристроїв і збої в мережах передачі даних та інші негативні наслідки. Зазначені фактори зумовлюють необхідність розробки нових методів дослідження нелінійних спотворень в електричних мережах, нових методів обробки спотворених сигналів і мінімізації спотворень [1–3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найвідомішими методами обробки сигналів для визначення показників якості електричної енергії є методи середньоквадратичних значень, перетворення Фур'є, вейвлет-аналізу та ін. [2]. Зазначені методи не дають змоги оцінити вплив кожної гармоніки та її параметрів на спотворення форми кривої. У [3] розроблено аналітичні методи визначення числових характеристик спотворень, у [4] – автоматизовану систему їх моделювання.

Мета дослідження – аналіз динаміки спотворень форми кривої синусоїдальної напруги вищими гармоніками, визначення числових характеристик спотворень та можливостей їх мінімізації.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження динаміки спотворень форми кривої синусоїдальної напруги вищими гармоніками проводилося шляхом числового моделювання миттєвого значення напруги $u(t)$ за допомогою автоматизованої системи [3] у вигляді:

$$u(t) = \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^N K_n \sin[n(\omega t + \varphi_1) + \varphi_n], \quad (1)$$

де t – час; ω – частота;

$\varphi_1, \varphi_n, \dots, \varphi_N$ – початкова фаза;

$n = 2, 3, \dots$ – номер;

N – кількість;

$K_n = U_n / U_1$ – коефіцієнт;

U_1, U_n – амплітуда гармоніки, відповідно.

Оцінка спотворень форми кривої напруги проводилася за відхиленням від синусоїди «опорних» точок напруги, які використовуються при вимірюваннях амплітуди і фази гармонійного коливання. До таких точок належать амплітудне значення напруги U , і фаза амплітудного значення напруги φ . Значення напруги U , і фази φ визначалися з рівнянь:

$$\frac{du(t)}{dt} = 0; \quad \frac{d^2 u(t)}{dt^2} > 0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} U = u(t_m), & \text{для } t = t_m, 0 \leq t_m \leq 2\pi/\omega; \\ U \geq u(t), & \text{для } t \neq t_m, 0 \leq t \leq 2\pi/\omega. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \cos \varphi + nK_n \cos(n\varphi + \varphi_n) = 0; \\ \sin \varphi + n^2 K_n \sin(n\varphi + \varphi_n) > 0. \end{cases} \quad (4)$$

При K_n , обмеженому значеннями $0 \leq K_n \leq n^{-2}$, напруга U , визначена умовами (2–3) задовольняє всім вимогам до огинаючої [3], фаза φ , обчислена за формулами (4), визначає фазу U .

Результати досліджень та їх обговорення. Проведено моделювання спотворень форми напруги $u(t)$ другою та третьою гармоніками, рис. 1.

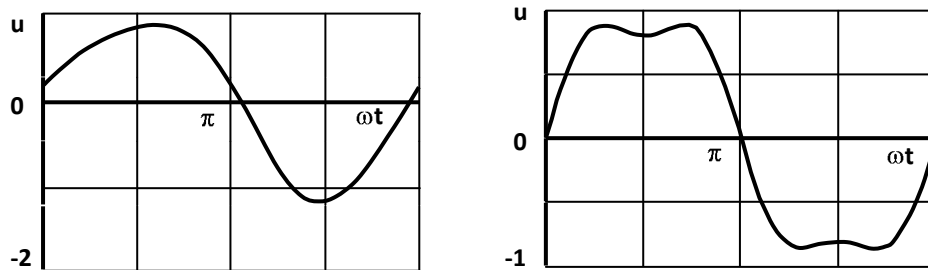


Рис. 1. Форма напруги $u(t)$ при:

$n=2, K_2=0,2; \varphi_2=\pi/2$ (зліва) та $n=3, K_3=0,2 \varphi_3=0$ (справа).

З наведених графіків видно, що при однакових рівнях гармонік третя гармоніка вносить більш суттєві спотворення форми напруги, які пояснюються вищою частотою цієї гармоніки.

Результати досліджень динаміки спотворень амплітуди напруги $u(t)$, спричинених другою гармонікою, проведених згідно з формулами (1–3) методом обчислення огинаючої U , та фази напруги $u(t)$, проведених шляхом обчислення фази огинаючої φ , згідно із залежностями (1–2, 4), наведено на рис. 2.

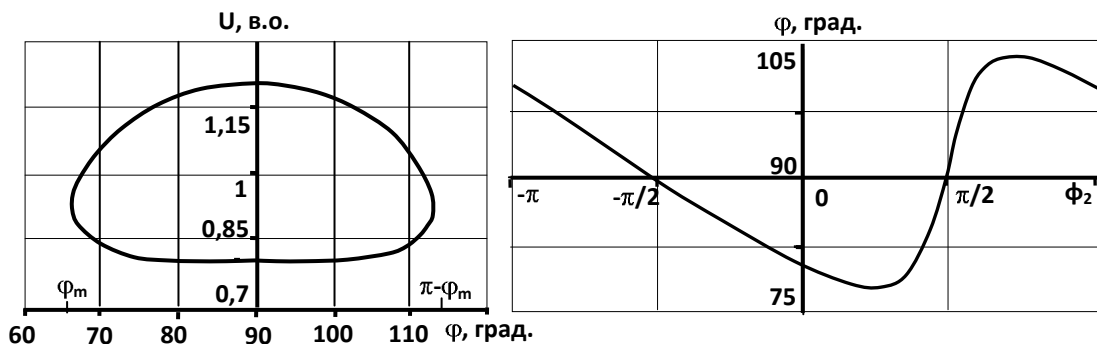


Рис. 2. Залежності огинаючої U від фази φ і фази φ від початкової фази φ_2 при $K_2=0,2$

Результати, отримані при моделюванні, і наведені залежності дають змогу провести кількісні оцінки спотворень амплітуди і фази напруги $u(t)$, спричинені другою гармонікою. Огинаюча U напруги $u(t)$ може перевищувати амплітуду першої гармоніки, бути меншою від неї або рівною їй. Максимальні значення огинаючої $U_{\max}$ і, відповідно, граничні відхилення огинаючої U від одиничної амплітуди першої гармоніки, спостерігаються при значенні фази $\varphi = \pi/2$, початковій фазі другої гармоніки $\varphi_2 = -\pi/2$ і становлять $U_{\max} = 1 + K_2$. При певних значеннях $\varphi \neq \pi/2$, які залежать від значень K_2 , φ_2 і визначаються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \cos \varphi + 2K_2 \cos(2\varphi + \varphi_2) = 0; \\ \sin \varphi + K_2 \sin(2\varphi + \varphi_2) = 1; \\ K_2^2 + 2K_2 \cos(\varphi + \varphi_2) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

огинаюча U дорівнює амплітуді першої гармоніки, рис. 2, точки $U=1$, а граничні відхилення огинаючої U дорівнюють нулю.

Фаза напруги $u(t)$ може випереджати фазу першої гармоніки, відставати від неї, або співпадати з нею, рис. 2. Максимальні відхилення фази φ_m від значення $\pi/2$ і, відповідно, граничні відхилення фази φ_m від фази першої гармоніки φ_1 становлять $\varphi_m = \arccos(2K_2)$ і $\varphi_m = \pi - \arccos(2K_2)$, і спостерігаються при значеннях початкової фази другої гармоніки $\varphi_2 = \pi - \arccos(2K_2)$ і $\varphi_2 = 2\arccos(2K_2)$ відповідно. При значеннях початкової фази $\varphi_2 = \pm\pi/2$ фаза φ огинаючої U співпадає з фазою першої гармоніки $\varphi = \varphi_1 = \pm\pi/2$ і відхилення фази φ будуть дорівнювати нулю.

На рис. 3 наведено результати досліджень динаміки огинаючої U та фази огинаючої φ , за наявності в спектрі напруги третьої гармоніки.

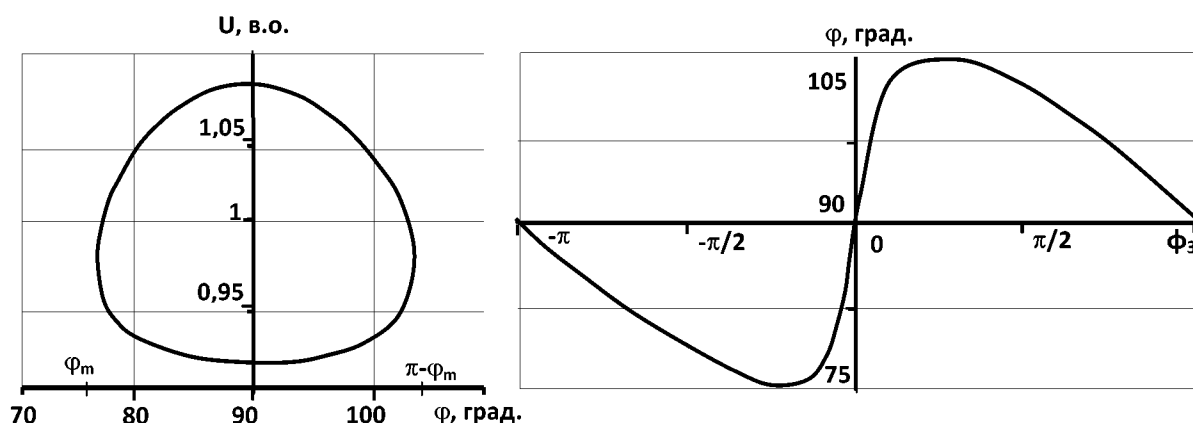


Рис. 3. Залежності огинаючої U від фази φ і фази φ від початкової фази φ_3 при $K_3 = 1/12$

Граничні відхилення огинаючої U від одиничної амплітуди першої гармоніки спостерігаються при значенні фази $\varphi = \pi/2$, початковій фазі третьої гармоніки $\varphi_3 = \pi$ і становлять $U_{\max} = 1 + K_3$. За певних значень $\varphi \neq \pi/2$, які визначаються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \cos \varphi + 3K_3 \cos(3\varphi + \varphi_3) = 0; \\ \sin \varphi + K_3 \sin(3\varphi + \varphi_3) = 1; \\ K_3^2 + 2K_3 \cos(2\varphi + \varphi_3) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

огинача U дорівнює амплітуді першої гармоніки, рис. 3, точки $U=1$, а граничні відхилення огиначаючої U дорівнюють нулю.

Граничні відхилення фази φ_m від фази першої гармоніки φ_1 становлять $\varphi_m = \arccos(3K_3)$ і $\varphi_m = \pi - \arccos(3K_3)$ і досягаються при значеннях початкової фази третьої гармоніки $\varphi_3 = \pi - 3\arccos(3K_3)$ і $\varphi_3 = -\pi + 3\arccos(K_3)$ відповідно. При значеннях початкової фази $\varphi_3 = 0$, $\varphi_3 = \pm\pi$ фаза φ огиначаючої U співпадає з фазою першої гармоніки $\varphi = \varphi_1 = \pm\pi/2$, і її відхилення стають рівними нулю.

Аналіз результатів оцінок спотворень, зумовлених другою і третьою гармоніками, свідчить, що при однакових, пропорційних K_n граничних відхиленнях амплітуди третя гармоніка спричинює більші у $\arccos(3K_n)/\arccos(2K_n)$ раз граничні спотворення фази і більш значні спотворення синусоїдальності форми напруги.

Висновки і перспективи. Вищі гармоніки спотворюють форму кривої синусоїдальної напруги, змінюючи значення амплітуди і фази напруги. Результати роботи дозволяють проводити оцінки максимальних відхилень амплітуди U і фази φ синусоїдальної напруги, зумовлених другою і третьою гармоніками. За рівних значень коефіцієнтів гармонік максимальні відхилення фази напруги, зумовлені третьою гармонікою, перевищують максимальні відхилення фази, зумовлені другою гармонікою. Встановлено амплітудно-фазові співвідношення, за яких спотворення фази та амплітуди напруги, спричинені другою та третьою гармоніками, відсутні.

Отримані при моделюванні оцінки спотворень синусоїдальної напруги вищими гармоніками, зокрема, їх максимальних і нульових значень, можуть використовуватися для встановлення допустимих рівнів гармонік, електромагнітної сумісності, обчислення похибок вимірювань амплітуди, частоти і різниці фаз від вищих гармонік, розробки методів мінімізації гармонічних спотворень, їх впливу на обладнання та ін.

Список літератури

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, – 2010. – 375.
2. Володарський Є. Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання / Є. Т. Володарський, А. В. Волошко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – 3/8 (69). – С. 10–17.
3. Гладкий А. М. Распределение вероятностей смеси случайных сигналов с кратными частотами / А. М. Гладкий // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2000. – Т. 43, № 7–8. – С. 75–78.

4. Гладкий А. М. Автоматизована система дослідження спотворень кривої синусоїдальної напруги вищими гармоніками / А. М. Гладкий // Науковий вісник НУБіП України. – 2015. – № 209, ч. 1. – С. 223–228.

5. Гладкий А. М. Дослідження спотворень синусоїдальної напруги вищими гармоніками: 24 Міжнародна конференція "Автоматика-2017" / А. М. Гладкий // Збірник тез доповідей 24 Міжнародної конференції "Автоматика-2017". – К., 2017. – С. 63.

References

1. Zhezhelenko, I. V. (2010). Vysshie harmoniki v sistemah elektrosnabzhenia [Higher harmonics in power supply systems]. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 375.

2. Volodarskij, Ye. T., Voloshko, A. V. (2014). Systema monitorynhu yakosti elektrychnoi enerhii v detsentralizovanykh systemakh elektropostachannia [System for monitoring the quality of electric energy in decentralized power supply systems]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/8 (69), 10–17.

3. Gladkij, A. M. (2000). Raspredelenie veroyatnostey smesi sluchaynyih signalov s kratnyimi chastotami [Probability distribution of a mixture of random signals with multiple frequencies]. Radioelectronics and Communications Systems, 43 (7–8), 75–78.

4. Gladkij, A. M. (2015). Avtomatysovana systema doslidzhennia spotvoren kryvoi synusoidalnoi napruhy vyshchymy harmonikamy [Automated research system distortion of the curve sinusoidal voltage from higher harmonics]. Scientific Herald NULES of Ukraine, 209 (1), 223–228.

5. Gladkij, A. M. (2017). Doslidzhennia spotvoren synusoidalnoi napruhy vyshchymy harmonikamy [Study of distortion of the sinusoidal voltage from higher harmonics]. Collection of abstracts 24th International Conference "Automation-2017". Kyiv, 63.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСШИМИ ГАРМОНИКАМИ

А. М. Гладкий

Аннотация. Распространение современных компьютерно-интегрированных технологий ведет к увеличению доли потребителей с нелинейными нагрузками, которые вызывают искажения синусоидального напряжения высшими гармониками, что негативно влияет на другое оборудование, вызывая его перегрев и повреждение, нарушение синхронизации устройств и сбои в сетях передачи данных и другие негативные последствия. Указанные факторы обуславливают необходимость разработки новых методов исследований, анализа и минимизации нелинейных искажений напряжения

Цель работы – исследования динамики искажений формы синусоидального напряжения высшими гармониками, определения числовых характеристик искажений и возможностей их минимизации.

Исследование динамики искажений формы кривой синусоидального напряжения высшими гармониками проводилось путем численного моделирования мгновенного значения напряжения с помощью автоматизированной системы.

Оценка искажений формы напряжения проводилась по отклонению от синусоиды «опорных» точек – амплитудного значения напряжения U и фазы амплитудного значения напряжения φ .

Проведено моделирование и анализ искажений формы синусоидального напряжения второй и третьей высшими гармониками. Получены зависимости огибающей напряжения U от фазы φ и фазы φ огибающей от начальной фазы φ_n второй и третьей гармоник и проведены оценки вызванных этими гармониками искажений. Приведены формулы для оценки предельных отклонений амплитуды: $U_{\max}=1+K_n$; фазы: $\varphi_m = \arccos(nK_n)$, начальной фазы гармоники φ_n , при которой отклонения фазы φ равны нулю: $\varphi_2 = \pm \pi/2$ и $\varphi_3 = 0$, $\varphi_3 = \pm \pi$, и уравнения для φ_n и φ , при которых отклонения U равны нулю.

Полученные при моделировании оценки искажений синусоидального напряжения высшими гармониками могут использоваться для определения допустимых уровней нелинейных искажений, вычисления погрешностей измерений амплитуды, частоты и разности фаз от высших гармоник, разработки методов минимизации искажений и др.

Ключевые слова: электроэнергия, качество, гармоники, искажения напряжения, моделирование

DYNAMICS EXAMINATION OF THE PROCESS OF SPINNING OF SYNOZOIDAL STRESS BY HIGH HARMONY

A. Gladkyi

Abstract. The spread of modern computer-integrated technologies leads to an increase in the proportion of consumers with nonlinear loads that cause distortion of the sinusoidal voltage by higher harmonics, which adversely affects other equipment, causing it to overheat and damage, disturbing device synchronization and interruptions in data networks and other negative consequences. These factors necessitate the development of new methods for research, analysis and minimization of nonlinear voltage distortions

The purpose of the work – the study of the distortion dynamics of the form of sinusoidal voltage by higher harmonics, the definition of numerical characteristics of distortions and the possibilities for their minimization.

The study of the distortion dynamics of the shape of the sinusoidal voltage curve by higher harmonics was carried out by numerical simulation of the instantaneous voltage value using an automated system.

The estimation of distortions of the form of voltage was carried out on the deviation from the sinusoid of the "reference" points - the amplitude value of the voltage U , and the phase of the amplitude value of the voltage φ .

The simulation and analysis of distortions of the sinusoidal voltage form with the second and third highest harmonics was carried out. Dependences of the bending voltage U on the phase φ and the phase φ of the envelope of the second phase and the third harmonic of the φ_n phase have been obtained and the

estimates of the distortions caused by these harmonics have been carried out. The formulas for estimating boundary variations of the amplitude are given: $U_{\max} = 1 + K_n$; phases: $j\omega = \arcsin(nK_n)$; the calculation of the initial phase of the harmonic $j\omega$, in which the phase deviation φ is equal to zero: $j2 = \pm p / 2$ and $j3 = 0$, $j3 = \pm p$, and the equation for $j\omega$ and φ , at which deviations U are zero.

The obtained harmonics in the simulation of distortion of sinusoidal voltage can be used to determine the permissible levels of nonlinear distortions, to calculate the errors of measurements of amplitude, frequency and phase difference from higher harmonics, to develop methods for minimizing distortions, etc.

Keywords: electric power, quality, harmonics, voltage distortion, modeling

УДК 621.3.067

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СНАББЕРНОМУ ВУЗЛІ ЕЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

І. М. ГОЛОДНИЙ, кандидат технічних наук

О. В. САНЧЕНКО, аспірант*

E-mail: golodnyi@ukr.net

Анотація. Сучасний асинхронний регульований електропривод базується на використанні напівпровідникових перетворювачів напруги різних типів, дослідженню різних робочих характеристик яких, через складність чи високу вартість, мало приділено уваги. З розвитком комп'ютерного моделювання з'явилася можливість поглибити дослідження даних процесів.

Мета дослідження – покращення якості гармонічного складу вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів регульованого трифазного асинхронного електропривода.

Дослідження трифазного напівпровідникового перетворювача напруги з широтно-імпульсним керуванням проводився з використанням положень теорії електричних кіл синусоїдального і несинусоїдального періодичного струму та комп'ютерного моделювання в системі MatLab.

На створеній комп'ютерній моделі приведена методика вибору і вибрані параметри RC-снаббера для захисту електронного ключа і покращення гармонічного складу вихідної напруги та струму перетворювача.

Результати досліджень на комп'ютерній моделі електромагнітних процесів у колі силового електронного ключа показали, що при активно-індуктивному навантаженні ($R = 48 \text{ Ом}$, $L =$

*Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент І. М. Голодний

© І. М. Голодний, О. В. Санченко, 2018

0,0197 Гн), які відповідають обмотковим даним електродвигуна АИРП80-А6У2, імпульси напруг досягають 60 кВ.

Вибрані параметри снаббера ($R_S = 150$ Ом, $C_S = 0,3$ мкФ) дають можливість при комутації транзисторного ключа зменшити імпульс напруги до 1,1 кВ. При цьому склад вищих гармонік не порушується, але їх вплив у відсотковому співвідношенні до основної зменшується.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вищі гармоніки, форма кривої напруги та струму, комп'ютерна модель, регульований електропривод

Актуальність. Для регульованого асинхронного електропривода часто використовують напівпровідникові перетворювачі напруги, зокрема тиристорні регулятори, дослідженню робочих характеристик яких в технічній літературі приділяється мало уваги. Це пов'язано зі складністю чи високою вартістю проведення таких досліджень. З розвитком комп'ютерного моделювання з'явилася можливість поглибити дослідження різних характеристик електропривода та порівняти отримані результати з фактичними даними реального електропривода вентиляційної установки зі станцією керування "Кліматика-1".

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У попередніх працях показано, що для регульованого малопотужного асинхронного електропривода за собівартістю перевагу мають напівпровідникові перетворювачі напруги. Недолік таких пристроїв у тому, що вони генерують у мережу живлення імпульси напруги та вищі гармоніки. Якість електроенергії залежить від способу керування перетворювачами. Для підтвердження цього положення в MatLab було створено моделі однофазного та трифазного регульованого асинхронного електропривода з регулюванням вихідної напруги за принципом широтно-імпульсного перетворювача [1].

Мета дослідження – покращення якості гармонічного складу вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів регульованого трифазного асинхронного електропривода.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження трифазного напівпровідникового перетворювача напруги з широтно-імпульсним керуванням проводилося з використанням положень теорії електричних кіл синусоїдального і несинусоїдального періодичного струму та комп'ютерного моделювання в системі MatLab.

Результати досліджень та їх обговорення. Для дослідження роботи снабберного кола силового транзисторного ключа і вибору його параметрів в основу взято модель трифазного напівпровідникового перетворювача з широтно-імпульсним керуванням [1], яку наведено на рис. 1. У складі силового блоку перетворювача є трифазне джерело живлення Three-Phase Source, у кожній фазі якого увімкнено активно-індуктивне навантаження RL, трифазний діодний міст Universal Bridge. Блоками RL ($R = 48$ Ом, $L = 0,0197$ Гн) імітується активний опір та індуктивність обмотки статора електродвигуна АИРП80-А6У2 приводу осьового вентилятора ВО-Ф-5,6А. У коло постійної напруги діодного моста

увімкнено силовий транзистор IGBT, який виконує роль ключа для вмикання і вимикання силового кола. Керування роботою транзистора здійснюється блоком Pulse Generator, в якому задається частота комутації та час увімкненого стану транзистора.

Решта блоків моделі є допоміжними і використовуються для визначення миттєвих значень напруги та струму (блок Scope), а також їх амплітудні величини для основної гармоніки (блок Display 1) та спектральний склад (блок To Workspace).

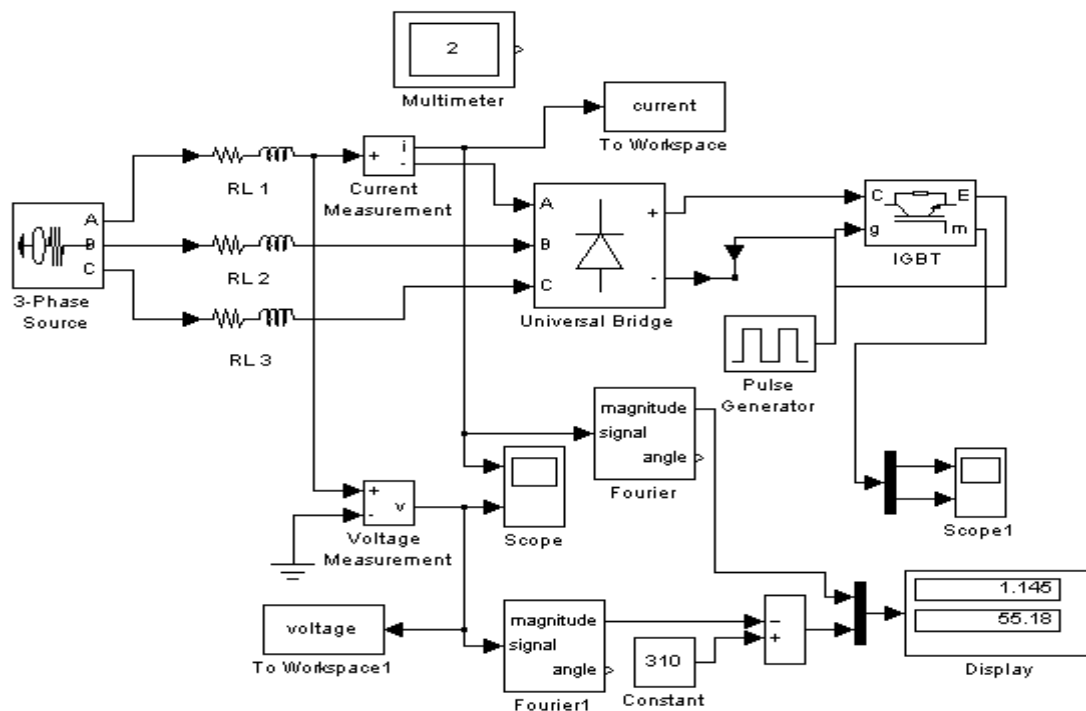


Рис. 1. Модель трифазного регулятора напруги на базі широтно-імпульсного керування

Вікно настройки силового транзисторного ключа IGBT дає можливість задати параметри елементів снабберного кола, яке складається з резистора R_S і ємності C_S .

Попередніми дослідженнями електромагнітних процесів у силовому електронному ключі без снабберного кола встановлено, що імпульсу напруги в силовому колі перетворювача досягають $U_{IMP} = 60$ кВ.

Для зменшення величини імпульсної напруги використовують один із найпростіших RC-снабберів. Розрахунок активного опору і ємності снабберного вузла розраховують наближено.

Ємність конденсатора визначають за формулою, де за час зарядки конденсатора t_3 наближено беруть час закривання транзистора збільшений у 2...3 рази [2]:

$$C_S = \frac{I_K \cdot t_3}{U_D},$$

де I_K – струм транзистора; U_D – напруга джерела живлення;
 t_3 – час зарядки конденсатора.

Максимальна перенапруга на колекторі при вимиканні транзистора з урахуванням ємності снаббера визначають за рівнянням [3]:

$$\Delta U_S = \sqrt{\frac{E_L + I_K^2}{C_S}}.$$

Оскільки розрахунок за приведеними виразами наближений, то зазвичай номінал снабберного конденсатора для керування двигунами потужності від сотень ват до десятків кіловат, незалежно від типу двигуна, напруги, режимів роботи, вибирають наближено в межах 0,1...0,4 мкФ. Комп'ютерна модель регулятора напруги (рис. 1) дає можливість провести корекцію величини снабберного конденсатора.

Опір снабберного резистора R_S вибирають з двох міркувань [2].

1. Опір повинен бути достатньо малим, щоб конденсатор встиг розрядитися навіть за мінімальної тривалості увімкненого стану транзистора t_P :

$$\frac{t_P}{3} > R_S C_S.$$

2. Опір повинен бути достатньо великим, щоб імпульсний струм через транзистор не перевищував допустимого значення. Якщо струм буде більший від допустимого, необхідно збільшувати величину опору.

З урахуванням вищенаведених аналітичних викладок і наступним уточненням за результатами комп'ютерного моделювання, було вибрано дані снаббера: $R_S = 150$ Ом, $C_S = 0,3$ мкФ.

Результати комп'ютерного моделювання з використанням розрахованого RC-снаббера наведено на рис. 2 і 3.

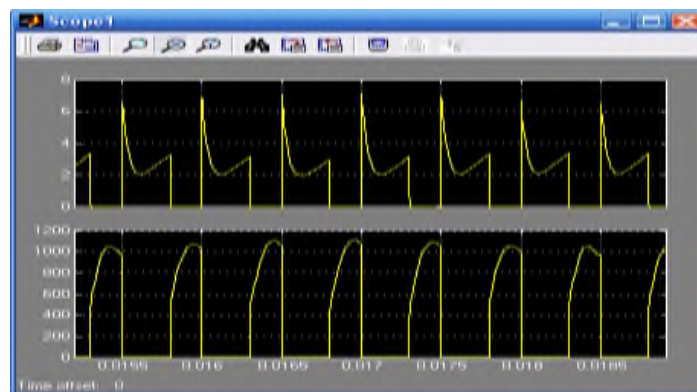


Рис. 2. Миттєві значення струму (верхня крива) і напруги (нижня крива) з використанням снаббера

Згідно з результатами досліджень встановлено, що використання снаббера дало змогу зменшити імпульс напруги при вимиканні електронного транзисторного ключа від 60 кВ до 1,1 кВ (рис. 2).

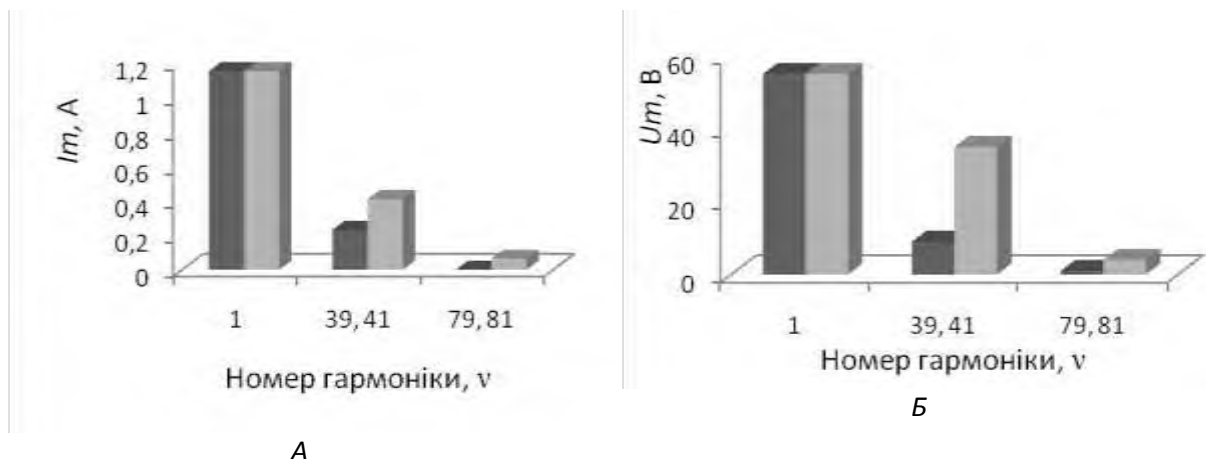


Рис. 3. Абсолютні значення амплітуд гармонік струму (а) і напруги (б) трифазного регулятора напруги зі снаббером (ліві колонки) і без нього (праві колонки)

Гармонічний склад струму і напруги регулятора з використанням снабберного вузла не змінюється. Вплив вищих гармонік, як струму, так і напруги, у відсотковому відношенні до основної зменшується (рис. 3).

Висновки і перспективи. Результати досліджень на комп'ютерній моделі електромагнітних процесів у колі силового електронного ключа свідчать, що при активно-індуктивному навантаженні ($R = 48 \text{ Ом}$, $L = 0,0197 \text{ Гн}$), яке відповідає обмотковим даним електродвигуна АИРП80-А6У2, імпульси напруг досягають 60 кВ.

На практиці розрахунок параметрів елементів снаббера проводиться наближено, результати яких можна коректувати за допомогою комп'ютерного моделювання.

Вибрані параметри снаббера ($R_S = 150 \text{ Ом}$, $C_S = 0,3 \text{ мкФ}$) дають можливість при комутації транзисторного ключа зменшити імпульс напруги до 1,1 кВ. При цьому склад вищих гармонік не порушується, але їх вплив у відсотковому співвідношенні до основної зменшується.

Список літератури

1. Голодний І. М. Комп'ютерна модель трифазного регульованого асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем / І. М. Голодний, О. В. Санченко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – К., 2016. – Вип. 242 – С. 97–100.
2. Новиков П. Защита силового транзистора. Часть 1. Перенапряжение // Силовая электроника. – № 3. – 2012. – С. 31–35.
3. Колпаков А., Ламп Й. Проблемы проектирования IGBT-инверторов: перенапряжение и снабберы / А. Колпаков, Й. Ламп // Силовая электроника. – № 5. – 2008. – С. 98–103.

References

1. Holodnyi, I. M., Sanchenko, O. V. (2016). Kompiuterna model tryfaznoho rehulvanoho asynkhronnoho elektropyvoda z shyrotnotno-impulsnym peretvoriuvachem [Computer model of a three-phase controlled asynchronous

electric drive with a wide-pulse converter]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia "Tekhnika ta enerhetyka APK", 242, 97–100.

2. Novikov, P. (2012). Zashchita silovogo tranzistora. Ch. 1. Perenapryazheniye [Protection of the power transistor. Part 1. Overvoltage]. Silovaya elektronika, 3, 31–35.

3. Kolpakov, A., Lamp, J. (2008). Problemy proyektirovaniya IGBT-invertorov: perenapryazheniye i snabbery [Problems of designing IGBT-inverters: overvoltage and snubbers]. Silovaya elektronika, 5, 98–103.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ СНАББЕРНОГО УЗЛА ЭЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА РЕГУЛЯТОРА НАПЯЖЕНИЯ

**И. М. Голодный,
А. В. Санченко**

Аннотация. Современный асинхронный регулируемый электропривод базируется на использовании полупроводниковых преобразователей напряжения различных типов, исследованию различных рабочих характеристик которых, из-за сложности или высокой стоимости, мало уделено внимания. С развитием компьютерного моделирования появилась возможность углубить исследования данных процессов.

Цель исследования – улучшение качества гармонического состава выходного напряжения полупроводниковых преобразователей регулируемого трехфазного асинхронного электропривода.

Исследование трехфазного полупроводникового преобразователя напряжения с широтно-импульсным управлением проводилось с использованием положений теории электрических цепей синусоидального и несинусоидального периодического тока и компьютерного моделирования в системе MatLab.

На созданной компьютерной модели приведена методика выбора и выбранные параметры RC-снаббера для защиты электронного ключа и улучшения гармонического состава выходного напряжения и тока преобразователя.

Результаты исследований на компьютерной модели электромагнитных процессов в кругу силового электронного ключа показали, что при активно-индуктивной нагрузке ($R = 48 \text{ Ом}$, $L = 0,0197 \text{ Гн}$), которые соответствуют обмоточным данным электродвигателя АИРП80-А6У2, импульсы напряжения достигают 60 кВ.

Выбранные параметры снаббера ($R_S = 150 \text{ Ом}$, $C_S = 0,3 \text{ мкФ}$) дают возможность при коммутации транзисторного ключа уменьшить импульс напряжения до 1,1 кВ. При этом состав высших гармоник не нарушается, но влияние их в процентном соотношении к основной уменьшается.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, высшие гармоники, форма кривой напряжения и тока, компьютерная модель, регулируемый электропривод

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF THE ELECTRON KEY SNUBERN UNIT VOLTAGE REGULATOR

I. Golodnyi,
A. Sanchenko

Abstract. *The modern asynchronous controlled electric drive is based on the use of semiconductor voltage converters of various types, for which, due to complexity or high cost, little attention is paid to the study of various performance characteristics. With the development of computer modeling, it became possible to deepen the research of these processes.*

The purpose of the study is to improve the quality of the harmonic composition of the output voltage of semiconductor converters of a regulated three-phase asynchronous electric drive.

The study of a three-phase semiconductor voltage converter with pulse-width control was carried out using the provisions of the theory of electrical circuits of sinusoidal and nonsinusoidal periodic current and computer simulation in the MatLab system.

The created computer model provides a selection procedure and selected RC snubber parameters for protecting the electronic key and improving the harmonic composition of the output voltage and current of the converter.

The results of the research on the computer model of electromagnetic processes in the circle of the power electronic key showed that when the active-inductive load ($R = 48 \text{ Ohm}$, $L = 0.0197 \text{ H}$) corresponds to the winding data of the AIRP80-A6U2 motor, the voltage pulses reach 60 kV.

The selected snubber parameters ($R_S = 150 \text{ }\Omega$, $C_S = 0.3 \text{ }\mu\text{F}$) enable the switching of the transistor switch to reduce the voltage pulse to 1.1 kV. At the same time, the composition of the higher harmonics is not violated, but their influence as a percentage of the main harmonic is reduced.

Keywords: *electromagnetic processes, higher harmonics, voltage and current curve shape, computer model, adjustable electric drive*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ІМІТАЦІЙНІЙ МОДЕЛІ

В. О. МІРОШНИК, кандидат технічних наук, доцент

Ю. Л. ЦИЦЮРСЬКИЙ, асистент

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: mir49@meta.ua

Анотація. У сільському господарстві України більша частина споживання електроенергії припадає на електричні приводи. Дослідження таких об'єктів як об'єктів керування на імітаційних моделях дозволить зменшити затрати і збільшити ефективність створення автоматичних систем керування ними. Метою досліджень є створення імітаційної моделі електродвигуна постійного струму по каналу регулювання обертів для створення системи автоматизації.

На базі відомої математичної моделі електродвигуна постійного струму як об'єкта керування розроблено параметричну схему та імітаційну модель у середовищі Simulink MATLAB. За допомогою цієї моделі досліджено вплив керуючого параметра, напруги U і збурення M_c на параметр керування, частота обертання електродвигуна. Визначено для досліджуваного електродвигуна вектор узагальнених координат, скаляр керування, скаляр збурень і розроблено програму в середовищі MATLAB за розрахунком передатної функції електродвигуна.

Виконано приклад розрахунку передатної функції об'єкта. Зазначена імітаційна модель дає змогу студентам розроблювати алгоритми керування електродвигуном постійного струму для більш ефективного регулювання його параметрів.

Ключові слова: математична модель, електродвигун постійного струму, передатна функція, оберти електродвигуна

Актуальність. На частку електроприводів від спожитої електроенергії сільським господарством України припадає 60–70 %. Для більш економного використання цієї електроенергії необхідно широко впроваджувати автоматизовані системи регульованого електроприводу з використанням сучасної мікропроцесорної техніки. Досліджувати такі електродвигуни як об'єкти керування з мінімальними затратами і високою ефективністю зручно за допомогою імітаційних моделей, зокрема бібліотек Simulink MATLAB.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Моделювання динамічних режимів роботи регульованих електроприводів, з метою дослідження і розробки систем автоматичного керування, широко практикується у різних галузях сільськогосподарських виробництв [1, 3]. Для цього широко використовуються бібліотеки пакету Simulink MATLAB [2].

Математична модель двигуна постійного струму з незалежним збудженням від постійних магнітів [1] може бути задана системою рівнянь електричної і механічної частин двигуна у вигляді:

$$\begin{aligned} L \frac{dI}{dt} + RI + c_e \omega &= U \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_d - M_c \\ M_d &= c_m I \end{aligned} \quad (1)$$

Перше рівняння відображує взаємозв'язок між змінними у ланцюзі якоря, друге – умови механічної рівноваги. Як узагальнені координати вибираємо струм якоря I і частоту обертання якоря ω . Керуванням є напруга на якорі U , збуренням – момент опору навантаження M_c . Параметрами моделі є активний опір і індуктивність ланцюга та якоря, позначені відповідно R , і L , а також приведений момент інерції J і певні конструктивні постійні c_e і c_m . У системі СІ $c_e = c_m$.

Параметрична схема математичної моделі електродвигуна постійного струму показана на рис. 1.

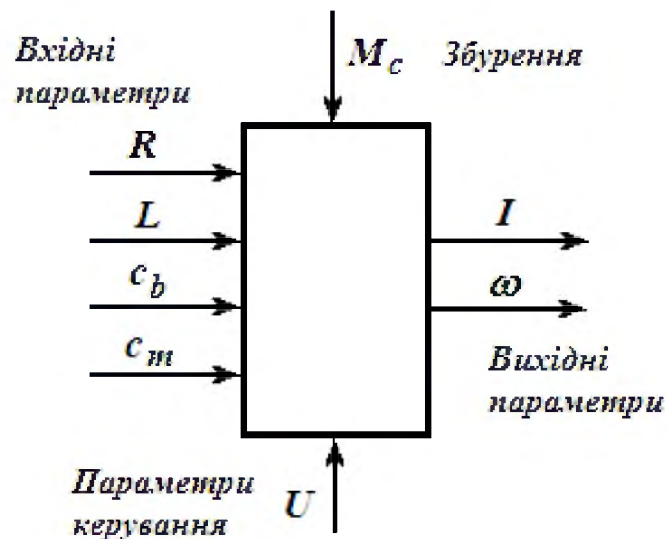


Рис. 1. Параметрична схема електродвигуна постійного струму

Вирішуючи вихідну систему відносно перших похідних, отримаємо рівняння двигуна в просторі станів:

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= -\frac{R}{L}I - \frac{c_e}{L}\omega + \frac{1}{L}U; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{c_m}{J}I - \frac{1}{J}M_c. \end{aligned} \quad (2)$$

Мета дослідження – створити імітаційну модель електродвигуна постійного струму як об'єкта керування його обертами.

Матеріали і методи дослідження. За математичною моделлю об'єкта керування створюємо в середовищі Simulink MATLAB імітаційну модель двигуна постійного струму з незалежним збудженням від постійних магнітів (рис. 2). Осцилографи W і I будуть показувати динаміку зміни обертів електродвигуна і величину струму в якорі електродвигуна. Параметром керування є напруга U , збуренням – момент опору навантаження M_c , значення яких на схемі взяли 150 В і 40 Н·м.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати імітаційного моделювання отримаємо з блока Score у вигляді графіка перехідного процесу. Початкове значення величини обертів вводимо за допомогою блока $W0$ при збуренні $M_c = 10$ Н·м, яке дорівнює 110,6 рад/с.

У результаті отримаємо криву зміни обертів електродвигуна у часі (перехідного процесу електродвигуна) при збуренні $M_c = 40$ Н·м, (рис. 3). Установлене значення обертів буде дорівнювати 114,1 рад/с. Таким чином, зміна збурення (моменту опору навантаження) на 30 Н·м призведе до зменшення обертів електродвигуна на 3,5 рад/с.

Проведемо дослідження моделі. Визначимо вплив керуючого параметра напруги електродвигуна U на регульований параметр обертів електродвигуна ω . Для цього задамо певні конкретні значення параметрів двигуна, наприклад:

$$M_c = 40 \text{ Н·м}; R = 0,2 \text{ Ом}; L = 0,006 \text{ Гн}; J = 0,1 \text{ кг/м}^2; c_e = c_m = 1,3 \text{ В / с}$$

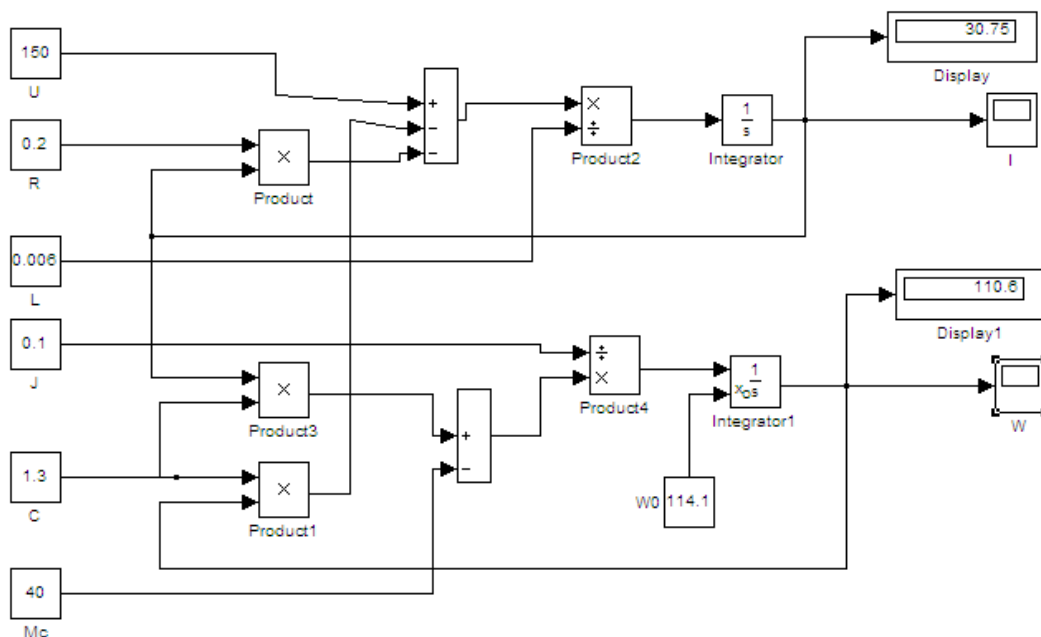


Рис. 2. Імітаційна модель двигуна постійного струму з незалежним збудженням від постійних магнітів

Напругу електродвигуна будемо змінювати від 150 до 220 В.

У результаті, з використанням ППП MathCad отримаємо графік впливу керуючого параметра U , В на оберти електродвигуна ω , рад/с (рис. 4).

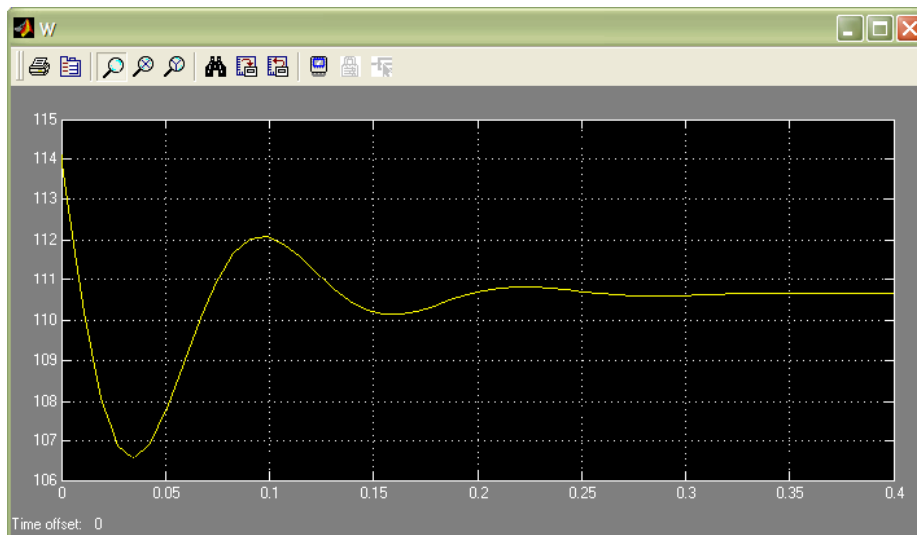


Рис. 3. Графік перехідного процесу для каналу обертів електродвигуна

Визначимо також вплив збурення, моменту опору навантаження M_c , яке змінюється від 0 до 60 Н·м на оберти електродвигуна, рад/с при напрузі $U=220$ В. Решту параметрів залишаємо незмінними (рис. 5).

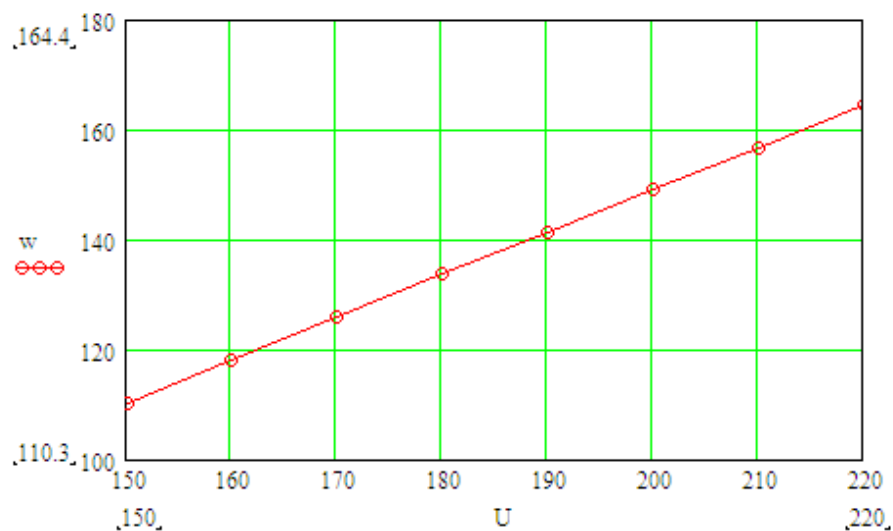


Рис. 4. Вплив керуючого параметра, напруги U (В) на параметр керування, оберти електродвигуна (рад/с)

Знайдемо за допомогою ППП MATLAB передатну функцію електродвигуна. Для цього приведемо рівняння 2 до матричного виду:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu + Df; \\ e &= Cx, \end{aligned} \quad (3)$$

де $x = (I, \omega)^T$ – вектор узагальнених координат;

$u = U$ – вектор керування (у розглянутому випадку він є скаляром);

$f = M_c$ – вектор (скаляр) збурення.

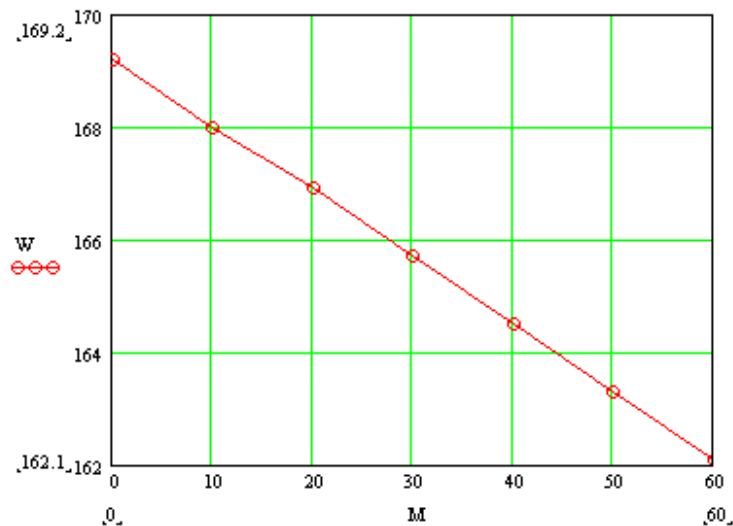


Рис. 5. Вплив збурення M_c (Н) на параметр керування, оберти електродвигуна (рад/с)

Матриці моделі будуть такими:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{c_e}{L} \\ -\frac{c_m}{J} & 0 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Якщо за регульовану величину вибрати частоту обертання, то рівняння вимірювань запишеться у вигляді

$$y = \omega, \quad (5)$$

а матриця вимірювань набуде вигляду

$$C = (0 \ 1). \quad (6)$$

Складемо програму в середовищі пакета MATLAB (рис. 6) і в командному вікні, з використанням вибраних даних, отримаємо передатну функцію електродвигуна:

$$W(p) = \frac{1548}{p^2 + 33.33p + 2012}. \quad (7)$$

```
Command Window

>>
>> J=0.14; c=1.3; R=0.2; L=0.006;
>> A=[-R/L -c/L; c/J 0];
>> B=[1/L;0];
>> C=[0 1]; D=0;
>> sd=ss(A,B,C,D);
>> wd=tf(sd)

Transfer function:
      1548
-----
s^2 + 33.33 s + 2012
```

Рис. 6. Програма MATLAB за розрахунком передатної функції електродвигуна

Висновки і перспективи. Створено математичну модель об'єкта керування електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням від постійних магнітів. За допомогою імітаційної моделі досліджено вплив напруги і моменту опору на характеристики роботи електродвигуна. Визначено для досліджуваного електродвигуна вектор узагальнених координат, скаляр управління, скаляр збурень і розроблено програму в середовищі MATLAB за розрахунком передатної функції електродвигуна. Виконано приклад розрахунку передатної функції об'єкта. Зазначена імітаційна модель дає змогу розроблювати алгоритми керування електродвигуном постійного струму для більш ефективного керування ним і дасть змогу студентам вивчати електродвигун постійного струму і розроблювати систему його керування за допомогою комп'ютерної програми.

Список літератури

1. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання : навч. посіб. / [І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, М. В. Синявський та ін.]. – К. : АграрМедіаГруп, 2011. – 513 с.
2. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 288 с.
3. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів : навч. посіб. / [В. П. Лисенко, Є. В. Чернишенко, В. М. Решетюк та ін.]. – К. : Аграр Медіа Груп, 2016. – 476 с.

References

1. Golodnyi, I. M., Lavrinenko, Yu. M., Syniavs'kyi et al. (2011). Regul'ovanyi elektropyvod. Teoriia. Modeliuvannia. Navchal'nyi posibnyk [Adjustable electric drive. Theory. Simulation: Tutorial]. Kyiv: AgrarMediaGroup, 513.
2. Chernyh, I. V. (2011). Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press, 288.
3. Lisenko, V. P., Chernyshenko, E. V., Reshetyuk, V. M. et al. (2016). Identifikaciya ta modelyuvannya tehnologichnih ob'ektiv. Navchalnyi posibnik. [Identification and modelling of technological objects. Tutorial]. Kyiv: AgrarMediaGroup, 476.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

**В. А. Мирошник,
Ю. Л. Цицюрский**

Аннотация. В сельском хозяйстве Украины на электропривод приходится большая часть потребления электроэнергии. Его исследование в качестве объекта управления на имитационных моделях позволит уменьшить затраты и увеличить эффективность создания систем автоматического управления электроприводом. Целью исследований является создание имитационной модели

электродвигателя постоянного тока по каналу регулирования частотой вращения для создания системы автоматизации.

На базе известной математической модели электродвигателя постоянного тока как объекта управления разработаны параметрическая схема и имитационная модель в среде Simulink MATLAB. С ее помощью исследовано влияние управляющих параметров (напряжения U и возмущения M_c) на параметр управления (частоту вращения вала электродвигателя). Для исследуемого электродвигателя определены: вектор обобщенных координат, скаляр управления, скаляр возмущения, разработана программа в среде MATLAB для определения передаточной функции электродвигателя.

Приведен пример расчета передаточной функции. Полученная имитационная модель дает возможность студентам разрабатывать более эффективные алгоритмы управления электродвигателем постоянного тока.

Ключевые слова: математическая модель, электродвигатель постоянного тока, передаточная функция, частота вращения вала электродвигателя

RESEARCH OF THE DC MOTOR ON THE IMITATION MODEL

V. Miroshnyk,
Y. Tsitsyurskiy

Abstract. In the agriculture of Ukraine, the electric drive accounts for the majority of electricity consumption. His research as an object of control on simulation models will reduce costs and increase the efficiency of creating automatic control systems for electric drives. The aim of the research is to create an imitation model of a DC motor through the speed control channel to create an automation system.

Based on the well-known mathematical model of a DC electric motor as a control object, a parametric circuit and a simulation model have been developed in the Simulink MATLAB environment. With its help, the effect of control parameters (voltage U and perturbation M_c) on the control parameter (the speed of the motor shaft) was investigated. For the electric motor that is being investigated, the vector of generalized coordinates, the control scalar, the perturbation scalar are defined, a program is developed in the MATLAB environment for determining the transfer function of the electric motor.

An example of calculation of the transfer function is given. The resulting simulation model enables students to develop more efficient DC motor control algorithms.

Keywords: mathematical model, DC motor, transfer function, motor shaft speed

ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ АЕРОІОННОЇ ОБРОБКИ

В. А. МУЗИЧЕНКО, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
**Національний науковий центр «Інститут механізації
та електрифікації сільського господарства»**
E-mail: moozychenko.va@gmail.com

Анотація. Отримано аналітичні залежності для визначення потужності, що споживається власне об'єктом обробки, потужності, яка відбирається з мережі під час роботи іонізатора, як без об'єкта обробки, так і з об'єктом обробки. Ці залежності проілюстровано відповідними рисунками.

Шляхом аналізу співвідношення між енергією, яка затрачена на процес генерування аероіонів, та тією, що поглинається об'єктом під час аероіонної обробки, визначено енергоефективність процесу такої обробки.

Визначено показник, який характеризує ступінь поглинання енергії об'єктом під час його обробки в полі коронного розряду та його залежність від робочої напруги іонізатора.

Ключові слова: рослинна продукція, зберігання, електрокоронний іонізатор, енергія, витрати, поглинання, ефективність

Актуальність. Актуальність роботи полягає в потребі оцінки енергоефективності електрокоронного іонізатора, як робочого органу для обробки рослинної продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним із ефективних методів енергозбереження є скорочення втрат при зберіганні. Усунення втрат дає прибавку ресурсів споживання при менших затратах на додаткове виробництво такого самого об'єму продукції [1].

Розроблена технологія зберігання рослинної продукції із соковитими тканинами з використанням аероіонної обробки [2].

Її невід'ємною складовою є використання динаміки біопотенціалів, як джерела інформації про стан біологічного об'єкта шляхом визначення ступеня енергетичного впливу на нього. Отримано залежності ефективності обробки від біопотенціалу об'єкта та режимів обробки [3, 4].

Зміна біопотенціалів рослинної продукції із соковитими тканинами при аероіонній обробці відбувається під дією зовнішнього енергетичного впливу. У зв'язку з цим, постає задача пов'язати енергетичні показники процесів генерування аероіонів з показниками поглинання енергії об'єктом під час аероіонної обробки.

Така оцінка необхідна для розрахунків відповідного обладнання.

Мета дослідження – визначення енергетичних показників роботи електрокоронного іонізатора.

Матеріали і методи дослідження. Методика дослідження базується на нелінійності залежності струму коронного розряду в повітрі від його робочої напруги та лінійності аналогічної залежності в об'єкті обробки, що розташований в полі коронного розряду.

Шляхом безпосередніх вимірювань струмів і напруг у процесі роботи іонізатора та аналізу його еквівалентних схем визначаються опір об'єкта обробки та струм, що протікає через нього. Цього достатньо для визначення енергії, що поглинається об'єктом у процесі його обробки в полі коронного розряду.

Результати досліджень та їх обговорення. Оцінка енергоефективності процесу аероіонної обробки полягає у визначенні співвідношення між енергією, яка затрачена на власне процес та тією, що поглинається об'єктом обробки. Для визначення останньої запропоновано еквівалентну схему електродної системи технологічного вузла для аероіонної обробки рослинної продукції в полі коронного розряду [5], подану на рис. 1.

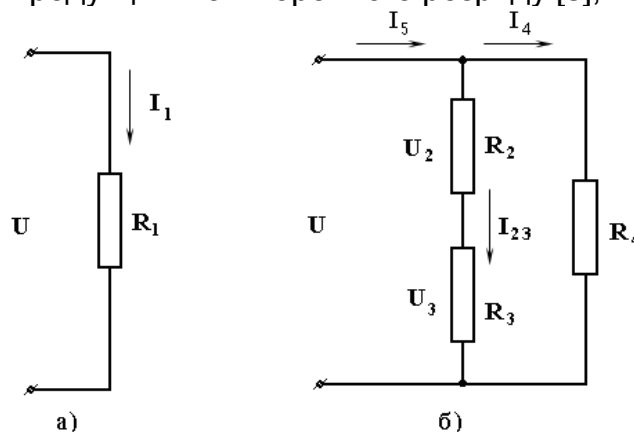


Рис. 1. Еквівалентна схема електрокоронного іонізатора:

а) без об'єкта обробки; б) з об'єктом обробки

Об'єкт обробки не має безпосереднього контакту з електродами, тому послідовно з його опором R_2 з'єднаний опір повітря R_3 . Він відповідає повітряним проміжкам між електродами та об'єктом обробки. По обидва боки об'єкта, послідовно з ним, є по одному такому опору, але для спрощення подальших викладок їх доцільно об'єднати в один. Аналогічно паралельно опору R_2 є опір повітря R_4 .

За відсутності в проміжку між електродами об'єкта, що обробляється, опір цього проміжку R_1 .

Потужність, яка споживається іонізатором, визначається струмом, що проходить по ньому I_5 та прикладеною до нього напругою U .

Потужність, яка поглинається об'єктом обробки R_2 , визначається струмом, що проходить по ньому I_{23} та прикладеною до нього напругою U_2 .

Напруга U , прикладена між заземленим електродом та тим що коронує, зумовить відповідні струми (див. рис. 1).

Напруга U , а також струми I_1 та I_5 можуть бути виміряні безпосередньо.

Опір рослинної продукції значно менший, ніж опір повітря, тому знехтувавши ним, а також спадом напруги на об'єкті обробки, визначимо струм I_{23} , що протікає через об'єкт обробки послідовно з повітрям, з використанням рівняння вольт-амперної характеристики коронного розряду [6]. У результаті отримано [5]

$$I_{23} = G_3 U_3 - U_{03}^2 + I_{023}, \quad (1)$$

де G_3 – крутість вольт-амперної характеристики, $A \cdot V^{-2}$;

U_3 – робоча напруга, В;

U_{03} – початкова напруга коронного розряду, В;

I_{023} – початковий струм коронного розряду, А,
звідки

$$U_3 = \sqrt{\frac{I_{23} - I_{023}}{G_3}} + U_{03}. \quad (2)$$

Потужність, що споживається об'єктом обробки

$$P_2 = I_{23} U_2. \quad (3)$$

Підставивши в (3) (1) та (2), з урахуванням того, що

$$U_2 = U - U_3, \quad (4)$$

маємо:

$$P_2 = I_{23} \left(U - \sqrt{\frac{I_{23} - I_{023}}{G_3}} + U_{03} \right). \quad (5)$$

Потужність, яка споживається іонізатором, визначається струмом, що проходить по ньому та прикладеною до нього напругою.

Без об'єкта обробки

$$P_1 = I_1 U. \quad (6)$$

З об'єктом обробки

$$P_5 = I_5 U. \quad (7)$$

Різниця між (6) та (5) буде вищою за (3), що й зображено на рис. 2.

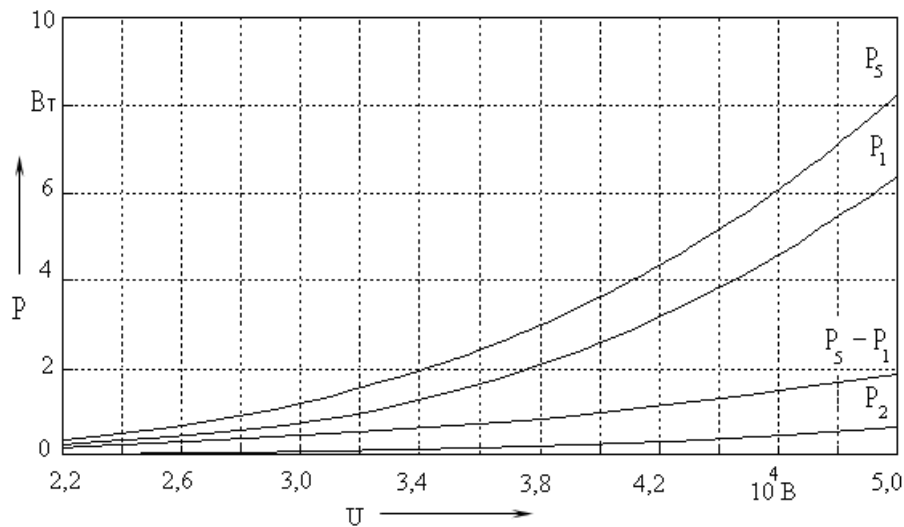


Рис. 2. Залежність потужності іоноутворення від наявності у проміжку між електродами об'єкта обробки

Співвідношення $P_2/P_5 - P_1$ є аналогом коефіцієнта корисної дії іонізатора.

Залежність цього співвідношення від напруги, що прикладена до електродів, наведено на рис. 3.

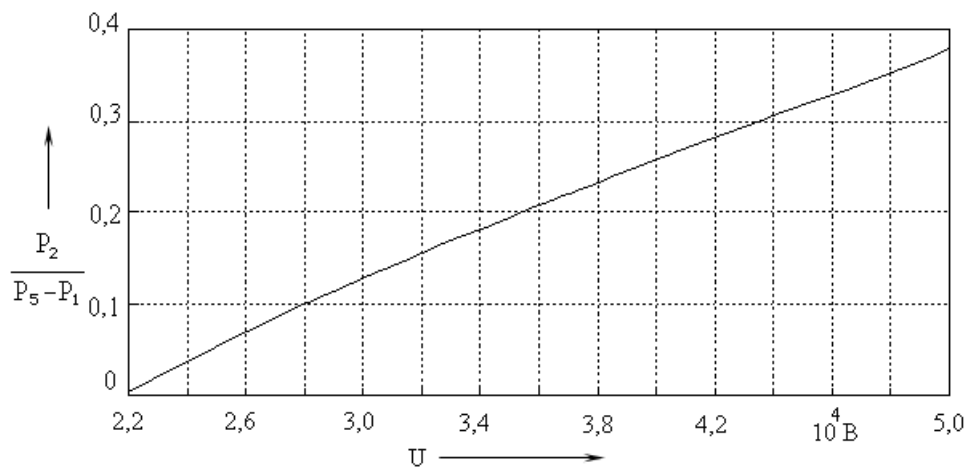


Рис. 3. Залежність співвідношення $P_2/P_5 - P_1$ від напруги, що прикладена до електродів

Між напругою та концентрацією аероіонів існує прямо пропорційна залежність [7].

Тому для досягнення максимальної енергоефективності електрокоронного іонізатора слід дотримуватися його роботи за максимальної робочої напруги.

Висновки і перспективи. Визначено показник, який характеризує ступінь поглинання енергії об'єктом під час його обробки в полі коронного розряду та його залежність від робочої напруги іонізатора.

Список літератури

1. Музиченко В. А. Енергетична оцінка використання аероіонної обробки в сховищах рослинної продукції з соковитими тканинами / В. А. Музиченко // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування : матеріали міжнар. науково-техніч. конф. 14–18 лист. 2016 р. – К. : НУБіП, 2016. – С. 19–20.
2. Музиченко В. А. Підсумки досліджень впливу аероіонної обробки на лежкість рослинної продукції обробки / В. А. Музиченко // актуальні питання енергетики та біотехнологій : тези II міжнар. науково-практичної конф., 18–19 травня 2017 р. – Бережани, 2017. – С. 46–47.
3. Музиченко В. А. Визначення режимів електрообробки рослинної продукції з соковитими тканинами / В. А. Музиченко, І. В. Бондаренко // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2013. – Вип. 97, т. 2. – С. 194–201.
4. Музыченко В. А. Моделирование состояния сочного растительного сырья при обработке и хранении / В. А. Музыченко // научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-технич. конф. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2014. – С. 229–233.
5. Музиченко В. А. Визначення опору рослинної продукції під час аероіонної обробки / В. А. Музиченко // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства : матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – 9–10 жовтня 2002 р. – Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Вип. 10. – Х., 2002. – С. 326–334.
6. Мартыненко И. И. Аппроксимация вольт-амперных характеристик с.-х. электрокоронных устройств / И. И. Мартыненко, В. А. Музыченко // Механизация и электрификация сел. хоз.-ва. – К. : Урожай, 1988. – Вип. 68. – С. 54–57.
7. Музиченко В. А. Залежність продуктивності електрокоронного іонізатора від його конструктивних параметрів / В. А. Музиченко // Механізація та електрифікація сіл. госп.-ва. – К. : Аграрна наука, 1995. – Вип. 81. – С. 73–79.

References

1. Muzychenko, V. A. (2016). Enerhetychna otsinka vykorystannia aeroionnoi obrobky v skhovyshchakh roslynnoi produktsii z sokovytymy tkanynamy [Energy assessment of the use of aeroion processing in the storage of plant products with juicy fabrics]. Materialy Mizhnar. naukovo-tekhnich. konf. Problemy suchasnoi enerhetyky i avtomatyky v systemi pryrodokorystuvannia. 14–18 lyst. 2016 r. Kiyv: NUBiP, 2016, 19–20.
2. Muzychenko, V. A. Pidsumky doslidzhen vplyvu aeroionnoi obrobky na lezhkist roslynnoi produktsii obrobky [The results of research on the influence of aerion processing on the heaviness of plant processing products]. Aktualni pytannia enerhetyky ta botekhnoohii: tezy II mizhnar. naukovo-praktychna konf., 18–19 travnia 2017 r., Berezhany, 46–47.
3. Muzychenko, V. A., Bondarenko, I. B. (2013). Vyznachennia rezhymiv elektroobrobky roslynnoi produktsii z sokovytymy tkanynamy [Mode of electromagnetic treatment of biological objects] Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva, 97 (2), 194–201.
4. Muzychenko, V. A. (2014). Modelirovaniye sostoyaniya sochnogo rastitel'nogo syr'ya pri obrabotke i khraneni [Modeling of succulent plant materials during processing and storage]. Nauchno-tehnicheskii progress v selskohozyaystvennom proizvodstve:

materialyi Mezhdunar. Nauch.-tehnich. konf. / RUP «NPTs NAN Belarusi po mehanizatsii selskogo hozyaystva». Minsk, 2014, 229–233.

5. Muzychenko, V. A. (2002). Vyznachennia oporu roslynnoi produktsii pid chas aeroionnoi obrobky [Determination of the resistance of plant products during aerion treatment]. Visnyk Kharkivskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva: Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy, 10, 326–334.

6. Martynenko, Y. Y., Muzychenko, V. A. (1988). Approksymatsyia volt-ampernykh kharakterystyk s.-kh. elektrokoronnykh ustroistv [Approximation of the current-voltage characteristics of agricultural electrocorona machinery]. Mekhanyzatsyia i elektryfikatsyia sel. khoz.-va, 68, 54–57.

7. Muzychenko, V. A. (1995). Zalezhnist produktyvnosti elektrokoronnoho ionizatora vid yoho konstruktyvnykh parametriv [The dependence of the performance of the electro corona ionizer on its constructive parameters]. Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil. hosp.-va, 81, 73–79.

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА АЭРОИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В. А. Музыченко

Аннотация. Получены аналитические зависимости для определения мощности, поглощаемой объектом обработки, а также потребляемой ионизатором мощности, как с объектом обработки, так и без него. Эти зависимости проиллюстрированы соответствующими рисунками.

Путём анализа соотношения между энергией, потребляемой ионизатором, с объектом обработки и поглощаемой объектом обработки выполнена оценка энергоэффективности процесса такой обработки.

Определён показатель, характеризующий степень поглощения энергии объектом при его обработке в поле коронного разряда и его зависимость от рабочего напряжения ионизатора.

Ключевые слова: растительная продукция, хранение, электрокоронный ионизатор, энергия, потери, поглощение, эффективность

ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY THE PROCESS OF AEROION TREATMENT

V. Muzychenko

Abstract. Analytical dependences are obtained for determining the power consumed by the object of processing itself, the power taken from the network during the operation of the ionizer, both without the object of processing, and with the object of processing. These dependencies are illustrated by the corresponding drawings.

By analyzing the relationship between the energy expended on the process of generation of aeroions and that absorbed by the object during air-conditioning processing, an energy efficiency assessment of the processing process was performed.

The index characterizing the degree of energy absorption by the object during its processing in the corona discharge field and its dependence on the operating voltage of the ionizer is determined.

Keywords: *vegetable production, storage, electrocoron ionizer, energy, consumption, absorption, efficiency*

УДК 631.24.243

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ

О. В. ОКУШКО, кандидат технічних наук, доцент

П. М. КОВТУН, старший викладач кафедри

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: oaleks@ukr.net

Анотація. Проаналізовано сучасні методи відновлення й ремонту техніки та обладнання в ремонтних майстернях. Пропонується застосування методів електростатичної обробки, які завдяки зростанню вимог до якості відновлення електротехнічного обладнання, а також їх техніко-економічним показникам, не можуть бути замінені іншими технологіями, що дозволяє більш ощадливе використання паливно-енергетичних ресурсів, витрат електроенергії, створення екологічно чистих технологій та захисту навколишнього середовища тощо.

Ключові слова: *технологія, ремонт, обладнання, ремонтна майстерня, енергія, електричне поле, обробка, покриття*

Актуальність. У сучасних технологічних процесах (вирощування, переробка та зберігання) сільськогосподарського виробництва використовується достатньо велика кількість електротехнічного обладнання, ефективна і надійна робота якого, значною мірою, сприяє підвищенню якості сільськогосподарської продукції та зменшенню енергоресурсовитрат під час її обробки.

Впровадження таких технологій пов'язано із суттєвим технологічним відставанням агропромислової галузі від рівня розвинених країн світу, особливо у створенні безвідхідних технологій виробництва, переробці та зберіганні сільськогосподарської продукції. Вирішення цих проблем повинно здійснюватися шляхом розробки сучасних технологій, у т.ч.

електротехнологій, що повинно зумовити суттєве зменшення енергоємності, створення високоефективної техніки і технологій для більш якісної переробки сільськогосподарської продукції, її виробництва та зберігання, а також зменшення питомих витрат у процесах ремонту й технічного обслуговування сільськогосподарської техніки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз останніх досліджень свідчить, що особливостями технологій, які застосовуються в ремонтних майстернях для відновлення й ремонту техніки та електрообладнання є те, що здебільшого, вони застарілі та енергоресурсовитратні, що й зумовлює значні трудовитрати, низьку продуктивність праці та невисоку якість [1, 3].

До таких технологій можна віднести: механічну обробку матеріалів з особливими фізико-механічними властивостями, термічну обробку, емалювання та фарбування, відновлення зношених вузлів і деталей, зварювання металів тощо.

Мета дослідження – аналіз сучасних електротехнологій з відновлення й ремонту сільськогосподарської техніки, електрообладнання та розробки пропозицій щодо їх використання в різних технологічних процесах.

Матеріали і методи дослідження. У технологічних процесах, які використовують електротехнології, застосовують різні форми електричної енергії, наприклад, енергія постійного і змінного струму, енергія електромагнітного поля широкого спектру частот, енергія електричного поля тощо. Електрична енергія, яка впливає на оброблювані об'єкти, може спричинювати теплову, механічну, фізико-хімічну та іншу дію [3].

Електротехнології з успіхом реалізуються в різних галузях промисловості (машино- та суднобудівна, авіаційна, будівельна, меблева, побутова та ін.) багатьох країн світу. Так, наприклад, застосування різних методів електротехнологій останніми роками знаходиться у центрі уваги фахівців багатьох країн, у т.ч. Західної Європи, США, Японії, Росії та ін. Підвищений інтерес до електротехнологій у цих країнах підтверджується збільшенням щорічних вкладень, наприклад, у США від 8 до 35 млн \$, зростанням кількості електротехнологічних установок, наприклад, в Японії – на 43 %, Росії – на 21 %,

Електростатичний метод виробництва покриттів (порошкові, рідинні фарби), у т.ч. і метод електроосадження, на сьогодні за обсягами реалізації в різних галузях становить близько 82–85 % від обсягу випуску всіх покриттів. Нині можна стверджувати, що в деяких випадках, електротехнології взагалі, завдяки зростанню сучасних вимог до якості продукції та техніко-економічним показникам, не можуть бути замінені іншими технологіями, наприклад, щодо ощадливого використання паливно-енергетичних ресурсів, витрат електроенергії, створення екологічно чистих технологій та захисту навколишнього середовища, методів підведення електроенергії тощо.

Результати досліджень та їх обговорення. У процесах ремонту сільськогосподарської техніки знаходить своє застосування електротехнологія очищення технічних рідин, і, у першу чергу, олив,

палива від феромагнітних домішок, які утворюються за рахунок спрацювання взаємодіючих деталей тощо. Так, наприклад, у моторних та трансмісійних мастилах такі домішки (частинки) становлять 25–35 % [2, 4].

Ця технологія здійснюється із застосуванням магнітного поля, дія якого сприяє подовженню ресурсу масел на 3–5 % та вирішенню проблеми їх відновлення, вторинного або багатократного використання.

У підвищенні ефективності та ресурсозбереження у процесах ремонту й відновлення сільськогосподарської техніки особливе місце займають так звані кінцеві або фінішні операції, у т.ч. при виробництві захисно-декоративних покриттів, якість і стійкість яких, значною мірою впливає на збільшення строків та умов експлуатації, а також надійність роботи електрообладнання.

Виробництво таких покриттів здійснюється шляхом застосування електростатичного методу фарбування, який на сьогодні являє собою найбільш досконалий метод, перш за все, у техніко-економічному плані. Його якісно-кількісні показники, зумовили можливості створення високопродуктивних та високоефективних технологічних процесів у різних галузях промисловості, що, насамперед, порівняно з іншими, забезпечило заощадження фарби до 65–95 %, високу якість покриття (експлуатаційна міцність збільшується в 1,2–1,3 раза). У табл. 1 наведено техніко-економічні показники електростатичного методу фарбування [4, 5].

1. Техніко-економічні показники електростатичного методу фарбування

Функціональні	Економічні	Ергономічні
Фізичні підстави	Економія фарби, якість покриття	Підвищення екологічних показників. поліпшення умов праці
Задана товщина	Підвищення продуктивності	
Автоматизація процесу	Скорочення технологічного процесу	

Електрофарбувальне обладнання, а це, перш за все, високовольтні джерела (генератори та випрямлячі), фарборозпилювачі на основі використання відцентрових сил в електростатичному полі, пневмоелектророзпилювачі та системи подачі фарб з успіхом випускаються в багатьох країнах світу (США, Канада, Японія, Німеччина, Росія, Білорусь тощо). У табл. 2 наведено технічні характеристики ряду високовольтних джерел, які використовуються при електрофарбуванні. Це обладнання використовується не тільки для оснащення високопродуктивних автоматизованих та роботизованих ліній електрофарбування, а й з успіхом при електрофарбуванні незначних партій виробів в умовах невеликих господарств як пересувні малогабаритні установки або безпосередньо як ручні електрофарборозпилювачі (табл. 3). Незважаючи на значну різноманітність, електрофарбувальне обладнання не має суттєвих відмінностей, крім конструктивних, що пов'язано з галузями застосування [5].

Перспективним напрямом застосування електротехнологій є нанесення фарбового покриття на металеві конструкції опор ЛЕП 35–110 кВ, що ефективніше вирішить проблеми боротьби з корозією металу, яка, у свою чергу, вплине на довговічність, механічну стійкість і тривалість експлуатації опор.

2. Технічні характеристики високовольтних джерел

Тип джерела	U_{max} , кВ	$I_{нав}$, мкА	U_{ex} , В
Cascade	85	150 – 250	220 – 240
Classic	100	150 – 250	220 – 240
LEPS	140	150 – 250	220 – 240
Micropack	100	–	220 – 240
HVP	120	–	220 – 240
HSP	150	–	220 – 240
HSN	200	–	220 – 240

3. Технічні характеристики електрофарборозпилювачів

Технічна характеристика	Один. вимір.	NO-2-701	УРЦ-4	Sames-Kremlin Spraymum	Graco
Вхідна напруга	В	110/220	220	220	220
Вихідна потужність	кВт	0,1	0,15	0,08	
Вихідна напруга	кВ	90	60 – 90	85	85
Втрати фарби	%	<1-2	< 5	1	1-1,5
Максимальна продуктивність	мл/хв	<200	300–500	<150	<150
Маса (розпилювач)	кг	1,25	1,5	0,88	0,83
Тип високовольтного джерела		RGV-90		SAMES	PRO Xs3

Характер експлуатації особливо електричних мереж сільськогосподарського призначення (термін їх експлуатації – 30–40 років, нерівномірність навантаження, застосування для ремонту окремих вузлів та елементів опор недосконалих та неефективних методів тощо) сприяє їх пошкодженню, і, у першу чергу, за рахунок корозійної дії. Усе це вимагає заміни або відновлення окремих вузлів безпосередньо на місці, тобто у польових умовах. Сучасний стан таких мереж свідчить, що щорічна потреба в проведенні відновлювальних робіт тільки для ЛЕП 35–110 кВ становить близько 110–150 опор (без урахування окремих елементів), кожна з яких становить 130–250 м² поверхні металоконструкцій залежно від класу напруги і виду опор.

Однією з переваг електростатичного методу, який вирішить наведену проблему, є його універсальність, що особливо важливо для вирішення питань, пов'язаних із відновленням покриттів при реконструкціях та ремонті металевих опор ЛЕП безпосередньо у польових умовах.

Висновки і перспективи. Реалізація електротехнологій в умовах майстерні може сприяти підвищенню якості ремонтно-відновлюваних робіт при ремонті електрообладнання і техніки, яка стримується недостатнім фінансуванням на розробку сучасного електротехнологічного обладнання та низькою кваліфікацією обслуговуючого персоналу.

Список літератури

1. Електротехнології обробки сільськогосподарської продукції / [Іноземцев Г. Б., Берека О. М., Окушко О. В., Усенко С. М.] ; за ред. Іноземцева Г. Б. – К. : Компрінт, 2015. – 306 с.
2. Верещагин И. П. Высоковольтные электротехнологии / И. П. Верещагин. – М. : МЭИ, 1999. – 192 с.
3. Радько И. П. Разработка экологически безопасных контакт-деталей для электрических аппаратов / И. П. Радько // Мотрол. – 2013. – Вып. № 4 (15).
4. Іноземцев Г. Б. Перспективні методи виготовлення та ремонту електротехнічного обладнання в умовах АПК // Г. Б. Іноземцев, О. В. Окушко // Енергетика і автоматика. – 2016. – № 4.
5. Іноземцев Г. Б. Энергоэкономия в системах электроснабжения сельского хозяйства : навч. посіб. / Г. Б. Іноземцев, В. В. Козирський, О. В. Окушко. – К. : Компрінт, 2015. – 151 с.

References

1. Inozemtsev, G. B., Bereka, O. M., Okushko, O. V., Usenko, S. M. (2015). Elektrotekhnologii obrobky silskohospodarskoi produktsii [Electrical processing of agricultural products]. Kyiv: Kompyrnt, 306.
2. Verescagin, I. P. (1999). Vysokovoltnye elektrotehnologi [High-voltage electrotechnologies]. Moscow: MEI, 192.
3. Radko, I. P. (2013). Razrabotka ekologicheskii bezopasnykh kontakt detale dlia elektricheskikh apparatov [Development of environmentally friendly contact parts for electrical appliances]. Motrol, № 4 (15).
4. Inozemtsev, G. B., Okushko, O. V. (2016). Perspektyvni metody vyhotovlennia ta remontu elektrotekhnichnoho obladnannia v umovakh APK [Promising methods of manufacturing and repairing electrical equipment in the conditions of the agroindustrial complex] Enerhetyka i avtomatyka, 4.
5. Inozemtsev, G. B., Kozyrskiy, V. V., Okushko, O. V. (2015). Enerhozberezhennia v systemakh elektropostachannia silskoho hospodarstva [Energy saving in power supply systems in agriculture] Kyiv: Kompyrnt, 151.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

**А. В. Окушко,
П. Н. Ковтун**

Аннотация. Проанализированы современные методы восстановления и ремонта техники и оборудования в ремонтных мастерских. Предложено применение методов электростатической обработки, которые, благодаря возросшим требованиям к качеству восстановления электротехнического оборудования, а также их технико-экономическим показателям, не могут быть заменены другими технологиями, что позволяет более экономное использование топливно-энергетических ресурсов, затрат электроэнергии, создания экологически чистых технологий и защиты окружающей среды и т.п.

Ключевые слова: технология, ремонт, оборудование, ремонтная мастерская, энергия, электрическое поле, обработка, покрытие

APPLICATION OF MODERN IN THE REPAIR AND REHABILITATION WORKS WILL BE CARRIED OUT

O. Okushko,
P. Kovtun

Abstract. In the article the analysis of modern methods of repair and repair of equipment and equipment in repair shops is carried out. It is proposed to use electrostatic processing methods, which, due to the increase in requirements for the quality of the restoration of electrical equipment, as well as their technical and economic indicators, can not be replaced by other technologies, which allows more economical use of fuel and energy resources, electricity costs, creation of environmentally friendly technologies and protection the environment and so on.

Keywords: technology, repair, equipment, repair workshop, energy, electric field, processing, coating

УДК 631.563.5:633.1

ДО ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ДИНАМІКИ ТИПОВИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В. О. ГРИЩЕНКО, кандидат технічних наук
Національний університет біоресурсів
і природокористування України
E-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Анотація. Визначено актуальність наявної математичної моделі типового об'єкта сільськогосподарського призначення з біологічним наповненням («дихаюча продукція», рослини, тварини), технологічні параметри якого змінюються як у часі, так і за координатою. Визначено типову систему диференціальних рівнянь у частинних похідних, яка з певними припущеннями достатньо точно описує процеси теплообміну повітряного потоку з елементами об'єкта.

На прикладі процесу охолодження рослинного продукту в насипу активним вентиляванням повітрям з меншою, ніж продукт, температурою, подано наближені аналітичні розв'язки системи рівнянь у частинних похідних, які визначають динаміку об'єкта зі змінними за висотою насипу параметрами. Показано, що при застосуванні ступінчастого методу розрахунку безперервних процесів на основі математичного опису процесу в елементарному шарі можна точно описувати реальний процес охолодження дисперсного продукту, використовуючи чарунковий принцип побудови

© В. О. Грищенко, 2018

динамічної моделі. Розроблено в MATLAB/Simulink, як функціональні блоки, імітаційну модель процесу.

Ключові слова: математична модель, передатна функція, імітаційна модель

Актуальність. На сьогодні створення ефективної системи керування технологічним процесом або об'єктом сільськогосподарського призначення неможливе без використання математичних моделей динамічних властивостей об'єкта керування. Оскільки значна кількість об'єктів енергоспоживання передбачає наявність теплових та масообмінних процесів, що обумовлює значну інерційність (яка характеризується сталими часу, для отримання відгуку й транспортного запізнення для геометрії потоків впливу фізичного середовища), розгляд задачі моделювання в межах динамічних об'єктів з урахуванням розподіленості параметрів за координатою є обґрунтованим. Адекватне прогнозування поведінки такого об'єкта при збуреннях дозволить забезпечувати керування параметрами із застосуванням простих, практично використовуваних контролерів параметричного керування.

Нині актуальною є проблема підвищення стійкості до зберігання свіжозібраного врожаю рослинної продукції за місцем її виробництва шляхом охолодження вентилязованого повітря.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз існуючих літературних джерел свідчить, що здебільшого, розрахунок параметрів процесів на промислових сільськогосподарських об'єктах провадиться для стаціонарних режимів на підставі напівемпіричних залежностей, отриманих для конкретних умов, і слабо відображує реальний механізм явищ [1]. Складні інерційні об'єкти замінюються передатними функціями першого порядку із запізненням [2].

У фундаментальних працях [3, 4] на основі аналізу сільськогосподарських об'єктів подані моделі, що описують процес складними трансцендентними передатними функціями, використання яких значно ускладнює синтез САК. Числові методи [5] розв'язку динамічних задач потребують знання початкових умов і змінних коефіцієнтів. Наявність прикладних комп'ютерних програм дає можливість розрахувати перехідні процеси і за наявністю нелінійностей [6, 7]. Але типові програми MatCAD і MATLAB не дають можливості врахувати розподіленість параметрів.

Мета дослідження – проаналізувати підходи до створення математичних моделей об'єктів із розподіленими параметрами і визначити найбільш раціональну форму опису динаміки об'єктів із розподіленими параметрами.

Матеріали і методи дослідження. Для визначення динамічних характеристик об'єктів моделювання використано аналітично-розрахунковий метод, сутність якого полягає в наступному: на основі апріорної інформації про фізичну картину явищ, що відбуваються при взаємодії поверхні продукту із джерелом тепловиділень (біохімічного

характеру), з потоком повітря, складаються рівняння теплового балансу в диференціальній формі з частинними похідними, які враховують зміну параметрів потоку за координатою.

Результати досліджень та їх обговорення. За характером теплових і матеріальних потоків і зв'язків між ними технологічні процеси (наприклад, нагрівання матеріалу, сушіння, охолодження і вентиляція приміщень), з урахуванням їх цільового призначення і які реалізуються на відповідних об'єктах (виробничі приміщення, плодо- і зерно сховища, сушарки, технологічні установки) прийнято вважати типовими об'єктами АПК (об'єктами керування). Типові об'єкти (процеси) можна описати ідентичними за структурою диференціальними рівняннями. Оскільки типові об'єкти мають розподілені за координатою руху матеріальних потоків і змінні в часі параметри, то математичний опис їх динамічних характеристик здійснюють системою диференціальних рівнянь у частинних похідних.

Так, динаміка процесів тепло при охолодженні або сушінні рослинної продукції з біологічними тепловиділеннями, примусовим вентиляванням описується системою диференціальних рівнянь [6, 7]:

$$\begin{cases} c_{np} m_{np} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = q_{np} F_p - \alpha f F_n (\theta_{np} - t) \\ m_v c_v \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_v H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha f F_n (\theta_{np} - t) \end{cases} \quad (1)$$

де θ, t – температура рослинної продукції та повітря;

F_p, F_{np}, F_n – площа решітки, поверхня продукту та вільного об'єму шару в перетині;

V – швидкість повітря в перетині;

α – коефіцієнт теплообміну;

q_{np} – питомі тепловиділення на одиницю висоти вздовж координати x ;

ρ_n, ρ_{np} – густина повітря і продукту;

G_v – витрати повітря;

m_v, m_{np} – маса повітря і продукту в об'ємі насипу;

H – висота насипу.

Дана модель отримана при використанні загальноприйнятих типових припущень [3, 6].

Математична модель динаміки теплообміну описує цілий ряд типових теплообмінних процесів: нагрівання кульових тіл у шарі за наявності джерел або стоків теплоти в об'ємі [8], охолодження коренеплодів [9], сушіння дисперсного матеріалу в щільному шарі [10], динаміку одношарового ТВЕ [4], активне вентилявання зерна [3] і вентилявання тваринницьких приміщень.

Точного аналітичного рішення системи (1) не існує, тому використовують наближені методи розв'язку: у вигляді передатних функцій, рядів, чарункових моделей.

Найбільш характерним об'єктом із розподіленими параметрами, є вентильований (з метою охолодження) насип зернового матеріалу (або плодоовочевої продукції). Процеси теплообміну в насипу рослинної продукції з біологічними тепловиділеннями при фільтрації повітря крізь шар описано системою диференціальних рівнянь.

Використовуючи перетворення за Лапласом [4], розв'язок отримують у вигляді передатних функцій. Як приклад, наводимо (виключаючи подробиці перетворення) передатні функції, отримані із системи (1) по каналах температура повітря в шарі – температура повітря на вході і температура продукту – температура повітря на вході:

$$\begin{cases} \frac{\bar{t}}{t_1} = e^{-A \sqrt{x}} \\ \frac{\bar{\theta}}{t_1} = B \sqrt{x} e^{-A \sqrt{x}} \end{cases}; \quad (2)$$

де $A \sqrt{x} = \frac{a_1 p^2 + a_2 p - a_3}{T p + 1}$; $B \sqrt{x} = \frac{a_5}{T p + 1}$; $T = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot F}$; $a_1 - a_5$ – сталі коефіцієнти, що визначаються зі співвідношень коефіцієнтів рівнянь (1).

Трансцендентні передатні функції можуть бути зведені до суми звичайних дробно-раціональних передатних функцій розкладення в ряд функції $\exp(-A \sqrt{x})$, оскільки використовувати в технічних розрахунках трансцендентні функції утруднено.

Для отримання наближеного аналітичного розв'язку рівнянь типу (1) найбільш класичним є спосіб інтегрування рівняння другого порядку у частинних похідних. Нехтуючи першою складовою рівняння (1) (її значення становить 0,05 % з величини другого члена рівняння) переписемо рівняння у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{1}{B} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = t - \theta + \varepsilon \\ \frac{1}{A} \frac{\partial t}{\partial x} = \theta - t \end{cases}, \quad (3)$$

де $A = \frac{\alpha f}{H G c}$; $B = \frac{\alpha f}{m c}$; $\varepsilon = \frac{q_v}{\alpha \rho F}$.

Виключаючи з рівнянь (3) величину t з урахуванням $\varepsilon = \varepsilon_0 - \theta$ (джерело тепловиділень негативне і пропорційне різниці температур), матимемо:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x \partial \tau} + A \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + B (1 + \varepsilon_0) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Отримане гіперболічне рівняння другого порядку розв'язується методом інтегральних перетворень Лапласа-Карсона при таких

початкових і граничних умовах [11]: $\theta|_{\tau=0} = \theta_0$; $t|_{\tau=0} = t_0$, розв'язок має такий вигляд:

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 + \theta_1 - \theta_0 \exp(-Ax) \int_0^\tau \exp(-b\tau) J_0(\sqrt{Abx\tau}) d\tau. \quad (5)$$

Підставляючи (5) в (4) отримаємо формулу для визначення температури теплоносія:

$$t(x, \tau) = \theta_0 + \theta_1 - \theta_0 \exp(-Ax) \left[\exp(-b\tau) J_0(\sqrt{Abx\tau}) + b \int_0^\tau \exp(-b\tau) J_0(\sqrt{Abx\tau}) d\tau \right], \quad (6)$$

де $b = B(1 - \varepsilon_0)$.

Інтеграл, що входить в формули (5) і (6), може бути обчислено шляхом розкладання функції Бесселя в ряд і обмежитися першими трьома членами (похибка не перевищить 1 %).

При обмеженні тільки одним членом ряду (із завищенням результату до 10 %): матимемо спрощені формули:

$$\theta(x, \tau) \approx \theta_0 + \theta_1 - \theta_0 \exp(-Ax) [1 - \exp(-b\tau)], \quad (7)$$

$$t(x, \tau) = \theta_0 + \theta_1 - \theta_0 \exp(-Ax).$$

Найбільш точні дані про динамічні властивості розподіленого об'єкта можна отримати використовуючи чарункову математичну модель [6, 7], на основі опису процесу в елементарному шарі. Приймаючи температуру продукту в елементарному шарі незмінною за висотою в напрямку руху повітря, зробимо в рівнянні (3) заміну $\frac{\partial t}{\partial x} \approx \frac{dt}{dx} \approx \frac{\Delta T}{\Delta x} \approx \frac{t_2 - t_1}{H}$ і отримаємо потрібну рівність:

$$Q + mc \frac{d\theta}{d\tau} = Gc(t_2 - t_1) = \alpha f(\theta - t). \quad (8)$$

Використовуючи поняття коефіцієнта охолодження: $\eta = \frac{t_2 - t_1}{\theta - t_2}$, (де t_1, t_2 – температура повітря на вході і виході насипу продукту) з другої і третьої частини рівностей (8) отримаємо: $\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha f}{G_v c_p}\right)$.

На основі першої і третьої частини рівностей сформулюємо математичний опис нестационарного теплообміну в шарі продукту у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{d\tau} = -k(\theta_1 - t_1) + p; & t_1 = t_v = \text{const} \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} = -k(\theta_2 - t_2) + p; & t_2 = t_1(1 - \eta) + \eta\theta_1 \\ \dots \\ \frac{d\theta_n}{d\tau} = -k(\theta_n - t_n) + p; & t_n = t_{n-1}(1 - \eta) + \eta\theta_{n-1} \end{cases} \quad (9)$$

Для аналізу математичного опису нестационарного процесу охолодження створена імітаційна модель в MATLAB/Simulink (рис. 1) і отримані залежності зміни температури продукту в часі й за координатою (рис. 2).



Рис. 1. Загальна схема імітаційної моделі теплових режимів у насипу вентильованого продукту

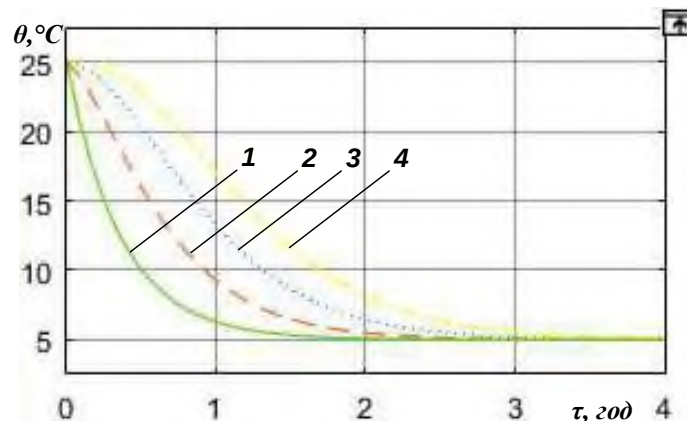


Рис. 2. Зміна температури продукту в часі на висоті:
1 – 0,6 м; 2 – 1,2 м; 3 – 1,8 м; 4 – 2,4 м

Висновки і перспективи. 1. Моделювання процесу охолодження продукту дає змогу за наближеними формулами відтворити процес зміни температури продукту та повітря в часі й за висотою шару.

2. Отримана імітаційна модель MATLAB/Simulink може бути використана для синтезу і аналізу САК процесом охолодження або нагрівання продукції.

Список літератури

1. Жадан В. З. Теоретические основы кондиционирования воздуха при хранении сочного растительного сырья / В. З. Жадан. – М. : Пищевая промышленность, 1972. – 154 с.
2. Бородин И. Ф. Автоматизация технологических процессов : учеб. для вузов / И. Ф. Бородин, Ю. А. Судник. – М. : Колос, 2005. – 344 с.
3. Мартыненко И. И. Автоматизация управления температурно–влажностными режимами сельскохозяйственных объектов / Мартыненко И. И., Гирнык Н. Л., Полищук В. М. – М. : Колос, 1984. – 152 с.
4. Шевяков А. А. Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов / А. А. Шевяков, Р. В. Яковлева. – М. : Машиностроение, 1968. – 320 с.
5. Математическое моделирование процессов конвективной сушки / [М. Л. Гирнык и др.]. – К. : Будивельник, 1993. – 248 с.
6. Котов Б. И. Математическое моделирование динамических режимов принудительного вентилирования плодов и овощей в плотном слое / Б. И. Котов, В. А. Грищенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Х. : ХНТУСГ, 2014. – Вип. 148. "Механізація сільськогосподарського виробництва". – С. 382–388.
7. Котов Б. І. Ідентифікація закономірностей тепло- і масоперенесення в процесах охолодження і зберігання рослинної сировини / Б. І. Котов, В. О. Грищенко // Збірник наукових праць Кіровоградського державного університету. – Кіровоград, 2004. – Вип. 14. – С. 19–24.
8. Волков М. А. Тепло- и массообменные процессы для хранения пищевых продуктов / Волков М. А. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 272 с.
9. Бодров В. И. Аналитическое исследование теплового режима насыпи картофеля и овощей при активной вентиляции / Бодров В. И., Трошин В. Г. // В кн. : Вентиляция и кондиционирование воздуха. – Рига, Риж. политехн. ин-т, 1979. – С. 47–53.
10. Котов Б. І. Аналітичне дослідження тепломасопереносу в товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – № 166, ч. 4. – С. 138–147.
11. Рабинович Г. Д. Некоторые задачи нестационарного теплообмена в слое дисперсного материала / Рабинович Г. Д. // Инж.-физич.журнал. – 1960. – Т. 3. – № 4. – С. 73–80.

References

1. Zhadan, V. Z. (1972). Teoreticheskie osnovy konditsionirovaniya vozdukha pri khranenii sochnogo rastitel'nogo syr'ya [Theoretical foundations of air conditioning during storage of juicy plant material]. Moscow: Food industry, 154.
2. Borodin, I. F. (2005). Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov: uchebnik dlya vuzov [Automation of technological processes: a textbook for universities]. Moscow: Kolos, 344.
3. Martynenko, I. I., Girnyk, N. L., (1984). Avtomaticheskoe upravlenie temperaturno-vlazhnostnymi rezhimami sel'skhozajstvennyh obektov [Automatic control of temperature-humidity modes of agricultural facilities]. Moscow: Kolos, 152.

4. Shevyakov, A. A., Yakovleva, R. V. (1968). Inzhenernye metody rascheta dinamiki teploobmennyykh apparatov [Engineering methods for calculating the dynamics of heat exchangers]. Moscow: Mashinostroenie, 320.
5. Girnyk, M. L. ed (1993). Matematicheskoe modelirovanie protsessov konvektivnoy sushki [Mathematical modeling of convective drying processes]. Kiev.: Budivel'nik, 248.
6. Kotov, B. I., Grishchenko, V. A. (2014). Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh rezhimov prinuditel'nogo ventilirovaniya plodov i ovoshchey v plotnom sloe [Mathematical modeling of dynamic modes of forced ventilation of fruits and vegetables in a dense layer]. News of Kharkiv National Technical University of the Syllable State. Peter Vasilenko, 148, 382–388.
7. Kotov, B. I., Hryshchenko, V. O. (2004). Identyfikatsiia zakonmirnostei teplo- i masoperenesennia v protsesakh okholodzhennia i zberihannia roslynnoi syrovyny [Identification of the laws of heat and mass transfer in the processes of cooling and storage of plant material]. Collection of scientific works of Kirovograd State University, 14, 19–24.
8. Volkov, M. A. (1982). Teplo- i massoobmennye protsessy dlya khraneniya pishchevykh produktov [Heat and Mass Transfer Processes for Food Storage]. Moscow: Light and Food Industry, 272.
9. Bodrov, V. I., Troshin, V. G. (1979). Analiticheskoe issledovanie teplovogo rezhima nasypi kartofelya i ovoshchey pri aktivnoy ventilyatsii [Analytical study of the thermal regime of embankment of potatoes and vegetables with active ventilation]. Ventilation and air conditioning, 47–53.
10. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A. (2011). Analitichne doslidzhennia teplomasoperenosu v товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна [Analytical study of heat and mass transfer in a thick layer of material at a two-stage process of drying grain]. Scientific Journal NUBiP Ukraine, 166 (4), 138–147.
11. Rabinovich, G. D. (1960). Nekotorye zadachi nestatsionarnogo teploobmena v sloe dispersnogo materiala [Some problems of non-stationary heat transfer in a layer of disperse material]. Engineering and Physics Journal, 3/4, 73 –80.

К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ДИНАМИКИ ТИПОВЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В. А. Грищенко

Аннотация. *Определена актуальность имеющейся математической модели типового объекта сельскохозяйственного назначения с биологическим наполнением («дышащая продукция», растения, животные), технологические параметры которого изменяются как во времени, так и по координате. Определена типовая система дифференциальных уравнений в частных производных, которая с определенными допущениями достаточно точно описывает процессы теплообмена воздушного потока с элементами объекта.*

На примере процесса охлаждения растительного продукта в насыпи активным вентилированием воздухом с меньшей, чем продукт, температурой, представлены приближенные аналитические решения системы уравнений в частных производных, определяющие динамику

объекта с переменными по высоте насыпи параметрами. Показано, что при применении ступенчатого метода расчета непрерывных процессов, на основе математического описания процесса в элементарном слое, можно точно описывать реальный процесс охлаждения дисперсного продукта, используя ячейковый принцип построения динамической модели. Разработана в MATLAB / Simulink в виде функциональных блоков имитационная модель процесса.

Ключевые слова: математическая модель, передаточная функция, имитационная модель

TO QUESTION OF MATHEMATICAL DESCRIPTION OF DYNAMICS OF TYPICAL AGRICULTURAL OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

V. Hryshchenko

Abstract. The article determines the relevance of the existing mathematical model of a typical object agricultural purpose with biological content ("breathing products", plants, animals) whose technological parameters vary both in time and coordinates. The definite system of differential equations in partial derivatives, with certain assumptions, accurately describes the processes of heat exchange of the airflow with the elements of the object.

In the example of the process of cooling the plant product in the mound by active ventilation with air with less than the temperature product, approximate analytic solutions of the system of equations in partial derivatives are given that determine the dynamics of the object with variables in the height of the mound by parameters. It is shown that when applying the step-by-step method for calculating continuous processes on the basis of the mathematical description of the process in the elementary layer it is possible to accurately describe the actual process of cooling the disperse product using the cell's principle of constructing a dynamic model. The simulation process model is developed in MATLAB / Simulink in the form of functional blocks.

Keywords: mathematical model, transfer function, simulation model

ЕНЕРГЕТИЧНІ ВТРАТИ ПРИ КОМУТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

В. В. КОРОБСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

А. С. СІРОШТАН, студент магістратури

E-mail: kor.vladlen.2002@gmail.com

Анотація. Запропоновано формулу для визначення величини електричної енергії, яка виділяється за один цикл комутації в одному контакті, і розраховано втрати електроенергії при однократній комутації дуги електромагнітним пускачем із серійними та дослідними контактними матеріалами.

Метою дослідження є встановлення взаємозв'язку між теплофізичними характеристиками контактного матеріалу, параметрами електричної мережі та величиною енергетичних втрат при комутації дуги.

Об'єктами експериментального дослідження були контакт-деталі, що виготовлені із серійного (CrMo_{0,2}+M1) та дослідного (81,3%Cu+10%Cr+2,0%TiB₂+3,0%Nb+2,0%C+0,7%Zr) контактних матеріалів. Вони використовувалися в електромагнітних пусках ПМЛ – 1100.

Осцилограми струму і напруги отримуються за допомогою універсального двопробного запам'ятовуючого осцилографа С8-14.

Зменшення часу горіння електричної дуги при комутації струму можна досягти за рахунок введення в композицію таких складових: С, Мо, МоО₃, Cr. Економічна ефективність застосування пускачів ПМЛ 1100 з дослідними контактами досягається за рахунок значно меншої вартості контакт-деталей (приблизно в 22–25 разів) Для споживача забезпечується зниження втрат на 6% електричної енергії, яка виділяється при комутації струму в контактах.

Ключові слова: втрати електричної енергії, електричний апарат, електрична дуга, контактна система, електромагнітний пускач, екологічно-безпечний композиційний матеріал, металокерамічний контакт

Актуальність. Електрична енергія W , яка виділяється в комутуючих пристроях при комутації, перетворюється в теплову Q . Частина її (Q_1) витрачається на нагрівання маси металу контакт-деталі нерухомої та рухомої до температури плавлення і частково на плавлення металу на робочій поверхні контакт-деталі; інша частина (Q_2) – на нагрівання маси розплавленого металу до температури кипіння й на випаровування частини металу. З іншого боку, ця енергія W має дві складові: одну – прямо пропорційну часу горіння дуги t_0 і яка зумовлюється активним навантаженням кола – WR , та другу – постійну – WL , яка дорівнює

енергії магнітного поля, накопиченої в індуктивностях електричного кола і витрачається в комутуючих пристроях при комутації.

Тому, розглядаючи теплові й електромагнітні процеси для одного полюса реле або пускача, можна записати [1]:

$$W = Q = Q_1 + Q_2 = W_R + W_L. \quad (1)$$

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За формою більшість контакт-деталей електричних апаратів виготовляються круглого перерізу з плоскою або сферичною робочою поверхнею, причому величина діаметра d значно перевищує висоту l контакт-деталі (рис. 1) [1]. Тому при однократній комутації контакт-деталей будемо вважати, що тепловіддача здійснюється з протилежного боку робочої поверхні (з боку прикріплення до контактотримача) у навколишнє середовище, а з бічних поверхонь тепловіддача відсутня і що тепло до контакт-деталі надходить імпульсами протягом часу t_0 , крізь всю його робочу площу поверхнею S . Тепло надходить перпендикулярно до поверхні й теплопровідність у всіх напрямках однакова. Тривалість імпульсів тепла Q_1 дорівнює часу горіння електричної дуги між електродами t_0 ($\approx$ часу однократного замикання або розмикання контакт-деталей). Кількість тепла Q_1 – це тепло, необхідне для нагрівання контакт-деталі до температури плавлення.

Граничні умови [3]:

- $T(x,0)=0$; (перепад температур контакт-деталі та навколишнього середовища в початковий момент дорівнює нулю);

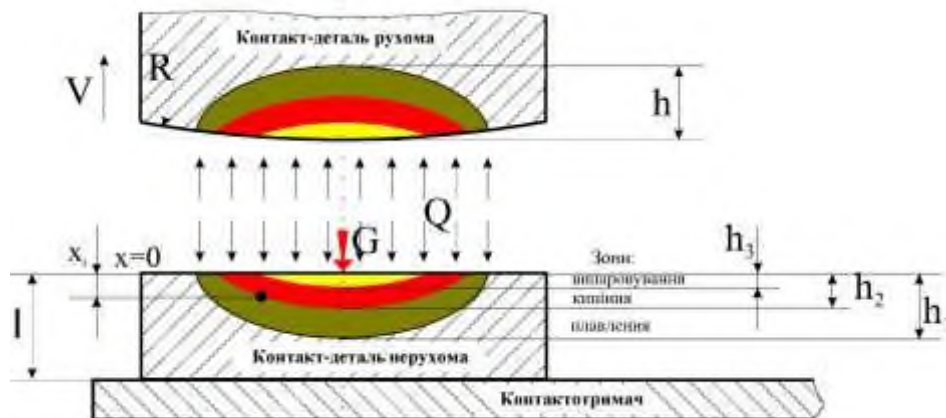


Рис. 1. Схематичне зображення контакт-деталей пускача при однократній комутації струму

- $T(l, t)=0$; (температура точок протилежного боку деталі при $x=l$ також дорівнює температурі середовища і вона стала величиною).

Мета дослідження – встановлення взаємозв'язку між теплофізичними характеристиками контактного матеріалу, параметрами електричної мережі та величиною енергетичних витрат при комутації дуги.

Матеріали і методи дослідження. Об'єктами експериментального дослідження були контакт-деталі, виготовлені із серійного (CrM0,2+M1) та дослідного (81,3%Cu+10%Cr+2,0%TiB₂+3,0%Nb+2,0%C+0,7%Zr) контактних матеріалів. Вони використовувалися в електромагнітних пускачах ПМЛ – 1100.

Визначені параметри комутації (час горіння дуги і середнє значення струму в дузі) фіксувалося за допомогою осцилограм струму та напруги. Величина струму визначається за спадом напруги на шунті 75ШСМ3-25-05. Осцилограми струму і напруги отримують за допомогою універсального двопробеневого запам'ятовуючого осцилографа С8-14. Похибка виміряних величин не перевищує 5%. Схема приєднання осцилографа до випробувального електричного кола наведена на рис. 2.

Опрацювання результатів дослідження здійснювалося методами математичної статистики з використанням пакета прикладних програм «Statistika» (версія 10.0).

Результати досліджень та їх обговорення. Рівняння теплопровідності для нашого випадку (стаціонарний неоднорідний одновимірний процес) запишеться у вигляді [1]:

$$\frac{dT(x,t)}{dt} = a \cdot \frac{d^2T(x,t)}{dx^2}, \quad (t > 0; 0 < x < \infty), \quad (2)$$

де $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

c – питома теплоємність матеріалу контакт-деталі (ізохорна), Дж/кг·К;

γ – густина контактного матеріалу, кг/м³;

t – час надходження тепла до контакт-деталі, с.

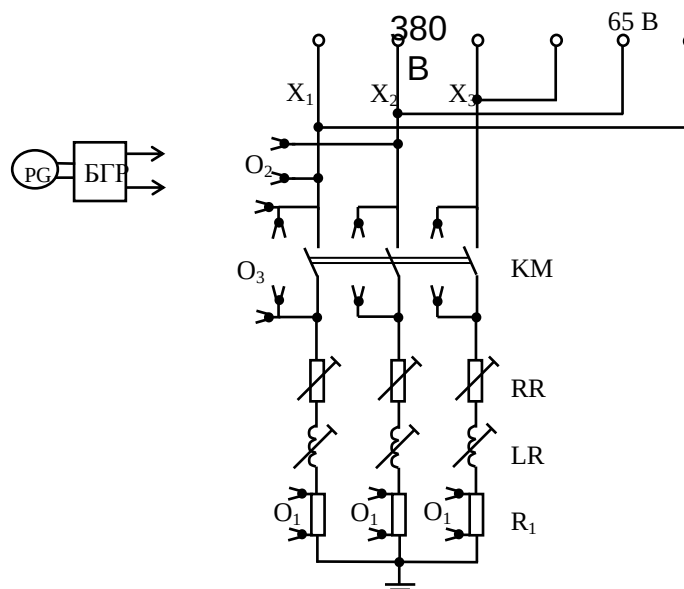


Рис. 2. Схема приєднання осцилографа С8-14 до випробувального електричного кола:

O_1 – канал осцилографа для запису струму; O_2, O_3 – канали осцилографа для запису напруги; PG – осцилограф; R_1 – шунт; RR – регульовальні резистори; LR – регульовальні котушки індуктивності; БГР – блок гальванічної розв'язки

Розв'язок рівняння (2) дає можливість визначити температуру в будь-якій точці контакт-деталі вздовж осі x (поздовжня вісь) у кожний визначений момент часу t , включаючи й точки, які знаходяться на робочій поверхні ($x=0$) у кінці проміжку комутації ($t=t_0$) (рис.1).

Рівняння тепловіддачі з протилежного боку контакт-деталі [1]:

$$\frac{dT(l,t)}{dx} - H \cdot T(l,t) = 0, \quad (3)$$

де $H = \frac{\alpha}{\lambda}$ – відносний коефіцієнт теплообміну, m^{-1} ;

α – коефіцієнт теплообміну, $Вт/м^2 \cdot К$.

Якщо виконується друга гранична умова в процесі комутації (відбувається нормальний процес охолодження), то це відповідає випадку, коли $H \rightarrow \infty$.

Температура T (або перевищення над температурою навколишнього середовища) у будь-якому перерізі контакт-деталі x по його висоті і в кожний момент часу t після надходження імпульсу тепла Q_1 у масу контакт-деталі, визначається зі спільного розв'язку рівнянь (2) та (3) [1]. Вважаємо, що температура на поверхні контакт-деталі досягає температури плавлення металу ($T=T_{пл}$) за відрізок часу $t=t_0$ (при $x=0$), тобто $T(0; t_0)=T_{пл}$:

$$T_{пл} = \frac{Q_1}{2 \cdot c \gamma S \cdot \sqrt{\pi a t_0}} \cdot \left(1 + e^{-\frac{l^2}{a t_0}} \right), \quad (4)$$

де S – площа робочої поверхні контакт-деталі, $м^2$;

t_0 – часу горіння дуги, $с$.

З формули (4) можна визначити кількість тепла Q_1 , яке надійшло до контакту за час t_0 і витрачене на нагрівання контакт-деталі до стану плавлення, якщо відома температура плавлення матеріалу контакту $T_{пл}$. Крім температури плавлення $T_{пл}$ і площі робочої поверхні S , кількість тепла Q_1 , яка йде на нагрівання контакт-деталі, пропорційна квадрату кореню від добутку величини коефіцієнтів теплопровідності λ , теплоємності c та густини матеріалу γ . Якщо всі ці величини для даного контактного матеріалу постійні, то кількість тепла Q_1 , залежно від часу горіння дуги t_0 , буде дорівнювати:

$$Q_1 = D \cdot \frac{\sqrt{t_0}}{\beta} \cdot T_{пл}, \quad (5)$$

де $D = \sqrt{\pi c \lambda \gamma} \cdot S = 3,55 \sqrt{c \lambda \gamma} \cdot S$ – стала величина, яка залежить від теплофізичних властивостей матеріалу і площі робочої поверхні контакт-

деталі S , $\frac{Вт \cdot c^{\frac{1}{2}}}{К}$; (6)

$\beta = 1 + e^{-\frac{\sigma}{t_0}}$ – коефіцієнт, який враховує вплив поздовжніх розмірів контакт-деталі на кількість тепла Q_1 , що поглинається масою m_1 ; (7)

де $\sigma = \frac{l^2}{a} = \frac{l^2}{\lambda} \cdot c\gamma$ – коефіцієнт, який залежить від розмірів контакт-деталі і теплофізичних параметрів контактного матеріалу (8)

Значення величини $e^{-\frac{\sigma}{t_0}}$ може змінюватися тільки за різних розмірів контактів ($0 \leq e^{-\frac{\sigma}{t_0}} \leq 1$). Тому знаменник у формулі (5) не може бути більше, ніж 2 (при $l=0$) і менше 1 (при $l=\infty$), тобто: $1 < \beta < 2$. Оскільки практично t_0 величина досить мала (мс), то значення $\beta \approx 1$. Отже, кількість тепла Q_1 , яка витрачається на нагрівання, можна вважати пропорційна величині кореня квадратного від часу горіння дуги. Збільшення значення коефіцієнта теплопровідності λ , коефіцієнта теплоємності c та питомої густини γ матеріалу контакт-деталей пускача збільшує постійну D і тим самим збільшується складова Q_1 .

Час горіння дуги визначається за осцилограмами (рис. 3).

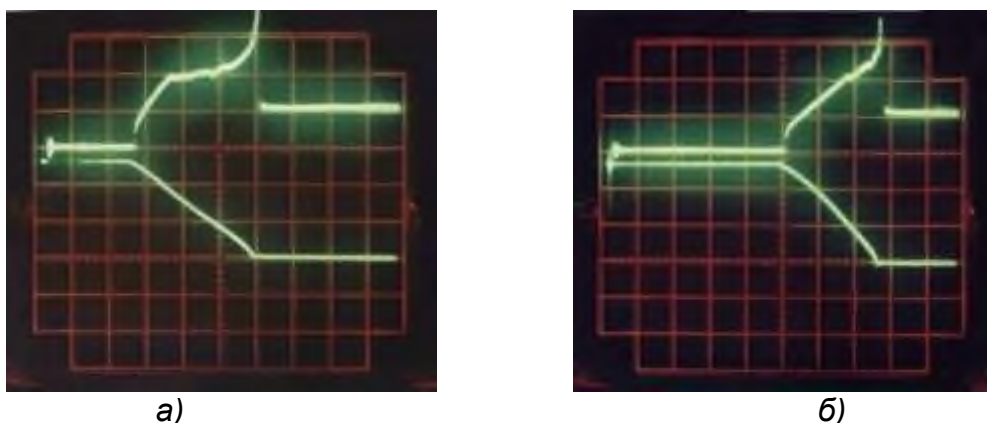


Рис. 3. Осцилограми електричної дуги розмикання в електромагнітних пускачах ПМЛ–1100:

а) матеріал $\text{CrMn}_{0,2}\text{Mn}_1$;

б) матеріал $81,3\%\text{Cu}+10\%\text{Cr}+2,0\%\text{TiB}_2+3,0\%\text{Nb}+2,0\%\text{C}+0,7\%\text{Zr}$;

параметри $U=65\text{В}$; $I=10\text{А}$; $\tau=40\text{мс}$; $L=240\text{мГн}$ ($m_t=10\text{ мс/под.}$; $m_u=50\text{В/под.}$; $m_i=0,05\text{В/под.}$)

Визначимо складові енергії електричного кола W_R , та W_L :

$$W_R = U_0 I_0 t_0 \cdot \frac{1}{6} \left(1 + 2 \frac{U_1}{U_0} \right) = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_R = P_{\text{сеп}} \cdot t_0, \quad (9)$$

де U_0 – напруга мережі (джерела живлення), В;

I_0 – струм навантаження, А;

U_1 – спад напруги на опорі контакту кола, В.

$$U_1 = I_0 \cdot R_{\text{конт}} = U_0 \cdot \frac{t}{t_0} \cdot A, \quad (10)$$

де A – коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження (R_0 і L) і від величини часу t_0 ;

$$A = \frac{\left(\frac{t_0 - 1}{t_0}\right)^{\alpha-1} - \alpha}{1 - \alpha}, \quad \alpha = \frac{R_0 t_0}{L} = \frac{t_0}{\tau}, \quad (11)$$

де α – параметр, який показує відношення активної енергії W_R , до енергії W_L , яка накопичена в індуктивностях кола L ;

$\tau = L/R_0$ – постійна часу (для електричних кіл з постійним струмом), мс;

$$P_{\text{сер}} = \frac{1}{6} U_0 I_0 \left(1 + 2 \frac{U_1}{U_0}\right) - \text{середня потужність у контакт-деталях, яка}$$

визначається активною складовою навантаження R_0 , Вт; (12)

$\omega_R = \frac{1}{6} \left(1 + 2 \frac{U_1}{U_0}\right)$ – коефіцієнт, який показує відношення напруг U_1 і U_0 ;

$$W_L = \frac{1}{2} L I_0^2 k = \frac{1}{2} U_0 I_0 t_0 \frac{k}{\alpha} = U_0 I_0 t_0 \frac{k}{2\alpha} = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_L, \quad (13)$$

де $k = 0,6 \div 0,8$ – коефіцієнт, який враховує характер навантаження; при чистоіндуктивному навантаженні $k=1,0$; при чисто активному – $k = 0$ [2];

$\omega_L = \frac{k}{2\alpha}$ – коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола;

$$U_0 = I_0 R_0 \text{ і } R_0 t_0 = \alpha L \text{ (формула (11))}.$$

Тоді рівняння (1) можна записати:

$$W = W_R + W_L = P_{\text{сер}} \cdot t_0 + W_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_R + U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega, \quad (14)$$

де ω – коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола і показує долю енергії магнітного поля W_L , яка витрачається власне в контакт-деталях при їх розмиканні [2].

При чисто індуктивному навантаженні ($W_R=0$, $P_{\text{сер}}=0$) час розмикання контакт-деталей повинен бути більший, ніж:

$$t_1 = \left(\frac{\beta W_L}{DT_{\text{пл}}} \right)^2. \quad (15)$$

Тоді не буде відбуватися плавлення робочої поверхні, і все тепло, яке виділяється в контакті під час комутації, буде витрачатися тільки на нагрівання:

$$W = Q = Q_1.$$

Отже, підбираючи час горіння дуги t_0 і враховуючи властивості дослідних матеріалів ($T_{пл}$, λ , γ , c), плавлення контакт-деталей і, власне кажучи, їх ерозію, можна зробити мінімальними.

Якщо відома кількість тепла Q , яка виділяється під час комутації, а також оптимальний час горіння дуги t_0 , можна визначити втрати електричної енергії та величину електричної ерозії контакт-деталей виготовлених із різних матеріалів, залежно від параметрів електричного кола й характеру навантаження.

Величина електричної енергії W_1 , W_2 , яка виділяється в головному колі пускачів при розмиканні, визначається згідно з формулою (14). Розрахунок проводиться для одного пускача на один цикл комутації, дані для розрахунку використовуємо з осцилограм. Величина електричної енергії, яка виділяється в одному контакті пускача:

- для серійного пускача:

$$W_1 = U_0 I_0 t_{01} \cdot \omega_1 = 0,065 \text{ кВ} \cdot 10 \text{ А} \cdot 9,44 \cdot 10^{-6} \text{ год} \cdot 0,705 = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

- для пускача з дослідними контакт-деталлями:

$$W_2 = U_0 I_0 t_{02} \cdot \omega_2 = 0,065 \text{ кВ} \cdot 10 \text{ А} \cdot 6,44 \cdot 10^{-6} \text{ год} \cdot 0,908 = 4,09 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Зниження втрат електричної енергії для трьох полюсів головного кола пускачів із контактами мостикового типу становить:

$$\Delta W = 6 \cdot (W_1 - W_2) = 6 \cdot (4,33 - 4,09) \cdot 10^{-6} = 1,44 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Тобто, при використанні пускачів із розробленими композиційними матеріалами, економія витрат електроенергії становить майже 6%.

Висновки і перспективи.

1. Енергія дуги є функцією часу її горіння, який залежить від теплофізичних параметрів матеріалу контактів. Приблизно 20–35% теплової енергії дуги, яка виділяється в контактах, витрачається на плавлення матеріалу контактів, решта – на кипіння.

2. Зменшення часу горіння електричної дуги при комутації струму можна досягти за рахунок введення в композицію таких складових С, Мо, МоОЗ, Сг.

3. Враховуючи характер зміни електроерозійного зносу контактів можна визначити термін служби пускачів та прогнозувати його комутаційну зносостійкість. Термін служби пускачів визначається, у першу чергу, величиною електроерозійного зносу рухомих контакт-деталей.

4. Економічна ефективність застосування пускачів ПМЛ–1100 з дослідними контактами досягається за рахунок значно меншої вартості контакт-деталей (приблизно в 22–25 разів) Для споживача забезпечується зниження втрат на 6% електричної енергії, яка виділяється при комутації струму в контактах.

Список літератури

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : ГИТЛ, 1967. – 303 с.
2. Тoman А. С. Электроэнергетические показатели разрывных контактов / А. С. Тoman, М. Ф. Сагач, С. П. Кохановский // Электрификация сельскохозяйственного производства. Научные труды УСХА. – К. : УСХА. – 1975. – Вып. №110, т. II. – С. 61–71.
3. Коробський В. В. Визначення величини ерозії контактів електромагнітних пускатрів та реле / В. В. Коробський, А. М. Мрачковський // Вісник ХНТУ сільського господарства. – Х. : ХНТУ, 2012. – Вип. № 130. – С. 125–128.

References

1. Lyikov, A. V. (1967). Teoriya teploprovodnosti [Theory of heat conductivity]. Moscow: GITL, 303.
2. Toman, A. S., Sagach, M. F., Kohanovskiy, S. P. (1975). Elektroenergeticheskie pokazateli razryivnyih kontaktov [Electricity indicators of breaking contacts]. Nauchnyie trudyi USHA. A series of "Elektrifikatsiya selskohozyaystvennogo proizvodstva."– K.: USHA, 110, II, 61–71.
3. Korobskyy, V. V. Mrachkovskyy, A. M. (2012). Vyznachennia velychyny erozii kontaktiv elektromahnitnykh puskachiv ta rele [Determination of the size of erosion contacts of electromagnetic starters and relays]. Visnyk KhNTU silskoho hospodarstva. – Kharkiv: KhNTU. – Vol. 130, 125–128.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

**В. В. Коробский,
А. С. Сироштан**

Аннотация. Предложена формула для определения величины электрической энергии, которая выделяется за один цикл коммутации в одном контакте и рассчитаны потери электроэнергии при однократной коммутации дуги электромагнитным пускателем с серийными и исследовательскими контактными материалами.

Целью исследования является установление взаимосвязи между теплофизическими характеристиками контактного материала, параметрам электрической сети и величиной энергетических потерь при коммутации дуги.

Объектами экспериментального исследования выступали контакт-детали, изготовленные из серийного (CrM 0,2 + M1) и исследовательского (81,3% Cu + 10% Cr + 2,0% TiB₂ + 3,0% Nb + 2,0% C + 0,7% Zr) контактных материалов. Они использовались в электромагнитных пускателях ПМЛ–1100.

Осциллограммы тока и напряжения получаются с помощью универсального двухлучевого запоминающего осциллографа С8-14.

Уменьшения времени горения электрической дуги при коммутации тока можно достичь за счет введения в композицию следующих составляющих С, Мо, МоО₃, Cr. Экономическая

эффективность применения пускателей ПМЛ–1100 с опытными контактами достигается за счет значительно меньшей стоимости контакт-деталей (примерно в 22–25 раз) Для потребителя обеспечивается снижение потерь на 6% электрической энергии, которая выделяется при коммутации тока в контактах.

Ключевые слова: *потери электроэнергии, электрический аппарат, электрическая дуга, контактная система, электромагнитный пускатель, экологически безопасный композиционный материал, металлокерамический контакт*

ENERGY LOSSES IN COMMUTATION ELECTRIC ARC

V. Korobskyy,
A. Siroshstan

Abstract. *The proposed formula for determining the amount of electrical energy that is allocated per one switching cycle in one contact and calculated the loss of electricity for a single switching of the arc by an electromagnetic starter with serial and research contact materials.*

The aim of the work is to establish the relationship between the thermophysical characteristics of the contact material, the parameters of the electrical network and the magnitude of the energy losses during arc commutation.

The objects of the experimental study were contact-parts manufactured from serial (CpM 0.2 + M1) and research (81.3% Cu + 10% Cr + 2.0% TiB₂ + 3.0% + Nb + 2.0% C + 0,7% Zr) of contact materials. They were used in electromagnetic starters PML–1100.

Oscillograms of current and voltage are obtained using a universal two-beam storage oscilloscope C8-14.

Reduction of the burning time of the electric arc during commutation of the current can be achieved by introducing into the composition the following components C, Mo, MoO₃, Cr. The economical efficiency of the application of the PML-1100 starters with experienced contacts is achieved due to the significantly lower cost of contact parts (approximately 22 to 25 times). The consumer is provided with a 6 % loss of electrical energy, which is released when switching the current in the contacts.

Keywords: *electric power losses, electric apparatus, electric arc, contact system, electromagnetic starter, environmentally safe composite material, metal-ceramic contact*

**МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
З ВИПАДКОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ
ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ОДНОФАЗНОЇ МЕРЕЖІ**

Ю. В. ШУРУБ, кандидат технічних наук, доцент
А. О. ДУДНИК, кандидат технічних наук, доцент
Д. С. ЛАВІНСЬКИЙ, асистент
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: dudnikalla@nubip.edu.ua

Анотація. *Режими роботи багатьох електроприводів, що використовуються в механізмах сільськогосподарського виробництва та комунального господарства, характеризуються випадковою зміною моменту навантаження в широкому діапазоні. Це стосується й електроприводів на базі трифазного асинхронного двигуна, що живляться від однофазної мережі – трифазно-однофазних електроприводів з регульованими фазозміщуючими модулями.*

Інтенсивний стохастичний характер зміни збурень таких механізмів суттєво погіршує показники роботи їх електроприводів: вимагає завищення встановленої потужності електродвигуна, викликає удари в механічних частинах, кидки струму в двигуні та в мережі, що знижує якість споживаної енергії та збільшує втрати потужності. Підвищити ефективність та надійність їх роботи можливо шляхом збільшення перевантажувальної здатності електропривода в динамічних режимах для подолання викидів випадкових збурень.

Запропоновано спосіб подолання викидів стохастичного моменту навантаження у трифазно-однофазних асинхронних електроприводах за рахунок застосування дискретно регульованого фазозміщуючого модуля зі статистично оптимальним фільтром. Розроблено методику проектування трифазно-однофазного асинхронного електропривода з регульованим фазозміщуючим модулем, що дозволяє отримати симетричний режим у широкому діапазоні зміни навантаження при її випадковому характері. Використання алгоритму оптимальної фільтрації в замкнених системах однофазних асинхронних електроприводів дозволяє забезпечити мінімальну дисперсію коефіцієнта несиметрії та отримати ККД, близький до ККД двигуна при трифазному живленні, при інтенсивній зміні стохастичних навантажень.

Ключові слова: *асинхронний електропривод, фазозміщуючий модуль, стохастичне навантаження*

Актуальність. Асинхронний електропривод значної частини механізмів сільськогосподарського та комунального призначення має

навантаження, що змінюється за випадковим законом. У багатьох випадках живлення трифазних двигунів відбувається від однофазної мережі, а як фазозміщуючі елементи використовуються конденсатори з постійною чи регульованою ємністю. Відзначимо, що якість напруги мережі живлення часто не відповідає нормі, і коливання напруги в загальному випадку також мають стохастичний характер. При випадковому характері змін навантаження електродвигуна і напруги живлення вибір параметрів фазозміщуючих елементів являє собою складну задачу, і його доцільно проводити з урахуванням ймовірнісних характеристик збурень електропривода.

Вибір параметрів фазозміщуючих елементів базується на мінімізації дисперсії струму зворотної послідовності. Якщо зміна навантаження характеризується як випадковий стаціонарний процес, то процес зміни величин симетричних складових також можна описати стаціонарними випадковими функціями. Таким чином, задача зводиться до визначення чисельних характеристик випадкових величин, що мають функціональну залежність від іншої випадкової величини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Однофазне живлення асинхронних електроприводів дозволяє зменшити вартість електромережі та може застосовуватися при ускладнених умовах електропостачання, наприклад, у системах водопостачання та трубопровідного транспорту, у побуті та комунальному господарстві [1], у системах регулювання мікроклімату віддалених сільськогосподарських споживачів [2]. У однофазних дискретно регульованих електромеханічних системах актуальною є проблема уникнення частих перемикачів між елементами фазозміщуючого модуля при інтенсивній зміні навантаження [3].

Мета дослідження – розробка методики проектування асинхронного електропривода, що живиться від однофазної мережі, з дискретно регульованими фазозміщуючими елементами при врахуванні випадкового характеру зміни навантаження.

Матеріали і методи дослідження. При незмінній напрузі мережі живлення і постійних параметрах фазозміщуючих елементів величини струмів і напруг прямої та зворотної послідовностей визначаються однозначно через параметри двигуна при симетричному живленні. Знаючи закон розподілення випадкової величини – лінійного струму $I(t)$, можливо визначити числові характеристики випадкових величин – струмів прямої і зворотної послідовностей $I_1 = \varphi_1(I)$, $I_2 = \varphi_2(I)$. Так, математичне сподівання та дисперсія струму прямої послідовності визначаються виразами :

$$m_{I_1} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(I) f(I) dI ; \quad (1)$$

$$\sigma_{I_1}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1^2(I) f(I) dI - m_{I_1}^2, \quad (2)$$

де $f(I)$ – густина розподілення ймовірності лінійного струму $I(t)$.

Якщо функція $I_1 = \varphi_1(I)$ достатньо близька до лінійної в області практично можливих значень випадкових навантажень, то наближені значення оцінок математичного сподівання і дисперсії виражаються елементарними формулами.

Для лінійної функції вигляду $I_1 = b + aI$, що підпорядкована нормальному закону розподілення, математичне сподівання й середньоквадратичне відхилення визначаються виразами:

$$m_{I_1} = am_I + b; \quad (3)$$

$$\sigma_{I_1} = a^2 \sigma_I. \quad (4)$$

Якщо ж ці функції значно відрізняються від лінійних, то формули (3) і (4) можуть бути застосовані тільки при малих дисперсіях випадкових навантажень.

За запропонованою методикою проведено вибір параметрів фазозсуваючих елементів електропривода прямої дробарки зерна.

Визначені стохастичні оцінки процесу зміни навантаження як у статистичній (математичне сподівання, дисперсія), так і в динамічній (кореляційна функція, спектральна густина).

Кореляційна функція і спектральна густина даних процесів добре апроксимуються виразами вигляду:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau, \quad (5)$$

$$S(\omega) = \frac{\sigma^2}{\pi} \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2} \right], \quad (6)$$

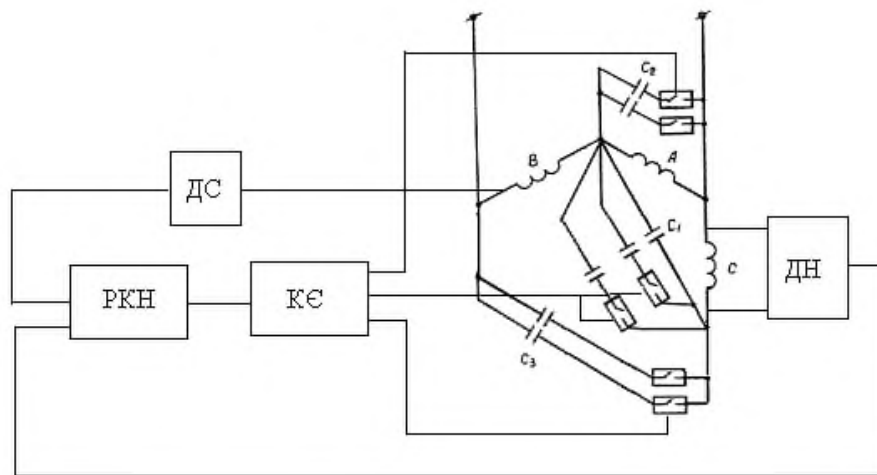
де α – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність згасання кореляційної функції;

β – коефіцієнт, що визначає кутову частоту коливань.

У цьому разі коефіцієнти α і β характеризують технологічний процес, що виконується електроприводом, а форма й вигляд кореляційної функції – стаціонарність та ергодичність процесу зміни навантаження.

Промодельовавши роботу електропривода спільно з навантаженням, що має характеристики (5) – (6), за допомогою формуючого фільтра, можливо визначити параметри фазозміщуючих елементів, що мінімізують дисперсію струму зворотної послідовності. Надалі, за ступенем розкиду навантаження і за характером згасання кореляційної функції, проводиться коректування параметрів фазозміщуючих елементів залежно від зміни продуктивності привода.

Результати досліджень та їх обговорення. У [4] запропонована схема трифазно-однофазного електропривода з триелементним фазозміщуючим модулем із дискретним триступеневим регулюванням ємностей конденсаторів (див. рисунок).



Функціональна схема трифазно-однофазного електропривода з триелементним фазозміщуючим модулем

Регульованим параметром у даній схемі є коефіцієнт несиметрії, який визначається непрямо через момент навантаження, що, у свою чергу, контролюється за допомогою датчиків електричних величин – фазних напруг та струмів. Перемикання ступенів відбувається за допомогою керуючого пристрою, що включає в себе датчики тих фазних напруг і струмів (ДН та ДС), що є найбільш чутливими до зміни навантаження, мікропроцесорний регулятор коефіцієнта несиметрії (РКН), що визначає за показами датчиків необхідний ступінь фазозміщуючого модуля, та напівпровідникових комутаторів ємностей (КЄ).

При застосуванні даної схеми ККД АД в діапазоні 20–120 % від номінального навантаження не знижується більше, ніж на 3% від ККД того самого АД при симетричному навантаженні, а в трьох точках режим роботи АД є повністю симетричним.

Запропонована замкнена система керування може забезпечити симетричний режим роботи асинхронного двигуна в широкому діапазоні зміни навантаження і, відповідно, знизити його енергоспоживання та підвищити надійність його роботи. Але, оскільки розглядаються режими навантаження електроприводів, що мають різко змінний випадковий характер, система керування через наявність електромагнітної та механічної інерційності в замкненому контурі не дозволяє отримати оптимальний режим без відповідної фільтрації випадкової складової навантаження.

Отже, керуючий мікропроцесорний пристрій для врахування стохастичного характеру зміни навантаження повинен бути доповнений фільтром випадкової величини, який може бути поданий як статистично оптимальний регулятор [5]. Для розробки алгоритму оптимальної фільтрації використано критерій мінімуму середньоквадратичної похибки відтворення корисного сигналу. Тоді частотна передаточна функція фільтра визначається за формулою:

$$W(j\omega) = \frac{1}{\Psi(j\omega)} \left[\frac{S(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right]^+, \quad (7)$$

де $S(\omega) = \Psi(j\omega) \cdot \Psi(-j\omega)$ – спектральна густина навантаження;

$\left[\frac{S(\omega)}{\Psi(-j\omega)} \right]^+$ – частина передаточної функції фільтра, що має полюси та нулі в правій напівплощині комплексної змінної $j\omega$ і може бути фізично реалізована з точки зору стійкої роботи фільтра.

Загальна модель електропривода та навантаження дозволяє визначити структуру системи керування трифазно-однофазних електроприводів в умовах дії стохастичних збурень з метою мінімізації струмів зворотної послідовності.

Розрахунки показали, що при навантаженні, яке має експоненціальну кореляційну функцію, передаточною функцією оптимального регулятора буде інерційна ланка, а при навантаженні з експоненціально-косинусною кореляційною функцією – послідовне з'єднання аперіодичної ланки другого порядку та форсуючої ланки.

Висновки і перспективи. Запропонована система керування трифазно-однофазним ЕП з триелементним дискретно регульованим фазозміщуючим модулем, де для забезпечення мінімальної дисперсії струму зворотної послідовності при стохастичній зміні навантаження в системі керування застосовано алгоритм оптимальної фільтрації, що дозволяє отримати в однофазному режимі ККД АД близький до ККД того самого АД при симетричному живленні при роботі в динамічному режимі зміни навантаження за випадковими законами, а також зменшити кількість перемикачів комутатора ємностей, що збільшує в цілому надійність запропонованої системи.

Список літератури

1. Malyar V., Hamola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply / Proceedings of 2016 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2016). Sandomierz, Poland, 14–17th September, 2016. – P. 1–4.
2. Хижняк Т. А. Дистанційне керування електротехнічними пристроями в системах регулювання мікроклімату / Т. А. Хижняк, О. О. Гусев, І. С. Ліпінський // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 32–34.
3. Mazurenko L. I., Dzhura O. V., Shevchuk S. P. Transients in a Transistor-Switched Capacitor Regulator of a Stand-Alone Induction Generator Supplying a Single-Phase Load / Proceedings of 2017 International conference on modern electrical and energy systems (MEES). Kremenchuk, November 15–17, 2017. – P. 244–247.
4. Шуруб Ю. В. Трифазно-однофазний асинхронний електропривод з багатоелементним ємнісним фазозміщуючим модулем / Ю. В. Шуруб // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 3. – С. 49–50.
5. Шуруб Ю. В. Багатокритеріальний синтез регульованих за напругою асинхронних електроприводів із стохастичним навантаженням / Ю. В. Шуруб, А. О. Дудник // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2016. – Вип. 252. – С. 204–209.

References

1. Malyar, V., Hamola, O., Maday, V. (2016). Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. Proceedings of 2016 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2016). Sandomierz, Poland, 14–17th September, 1–4.
2. Hizhniak, T. A., Gusev, O. O., Lipins'kiy, I. S. (2016). Distantciine keruvannia elektrotehnichnimi pristroiami v sistemah reguliuvannia mikroklimatu [Remote control of electrical devices in microclimate control systems]. Tehnichna elektrodinamika, 5, 32–34.
3. Mazurenko, L. I., Dzhura, O. V., Shevchuk, S. P. (2017). Transients in a Transistor-Switched Capacitor Regulator of a Stand-Alone Induction Generator Supplying a Single-Phase Load. Proceedings of 2017 International conference on modern electrical and energy systems (MEES). Kremenchuk, November 15–17, 2017, 244–247.
4. Shurub, Yu. V. (2011). Trifazno-odnofazniy asinhronniy elektroprivod z bagatoelementnim emnisnim fazozmishchuuchim modulem [Three-single-phase asynchronous electric drive with multi-element capacitive phase-shift module]. Electrotehnika i elektromehanika, 3, 49–50.
5. Shurub, Yu. V., Dudnyk, A. O. (2016). Bagatokriterialniy sintez reguliovanih za naprugoiu asinhronnih elektroprivodiv iz stohastichnim navantazhenniam [Multicriterion synthesis of voltage regulated induction electric drives with stochastic loads] . Naukovi visnik NUBiP Ukrainy, 252. – P. 204–209.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СО СЛУЧАЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

**Ю. В. Шуруб,
А. А. Дудник,
Д. С. Лавинский**

Аннотация. Режимы работы многих электроприводов, используемых в механизмах сельскохозяйственного производства и коммунального хозяйства, характеризуются случайным изменением момента нагрузки в широком диапазоне. Это касается и электроприводов на базе трехфазного асинхронного двигателя, питающихся от однофазной сети – трехфазно-однофазных электроприводов с регулируемыми фазосмещающими модулями.

Интенсивный стохастический характер изменения возмущений таких механизмов существенно ухудшает показатели работы их электроприводов: требует завышения установленной мощности электродвигателя, вызывает удары в механических частях, броски тока в двигателе и в сети, снижает качество потребляемой энергии и увеличивает потери мощности. Повысить эффективность и надежность их работы возможно путем увеличения перегрузочной способности электропривода в динамических режимах для преодоления выбросов случайных возмущений.

Предложен способ преодоления выбросов стохастического момента нагрузки в трехфазно-однофазных асинхронных электроприводах за счет

применения дискретно регулируемого фазосмещающего модуля со статистически оптимальным фильтром. Разработана методика проектирования трехфазно-однофазного асинхронного электропривода с регулируемым фазосмещающим модулем, позволяющим получить симметричный режим в широком диапазоне изменения нагрузки при ее случайном характере. Использование алгоритма оптимальной фильтрации в замкнутых системах однофазных асинхронных электроприводов позволяет обеспечить минимальную дисперсию коэффициента несимметрии и получить КПД, близкий к КПД двигателя при трехфазном питании, при интенсивной смене стохастических нагрузок.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, фазосмещающий модуль, стохастические нагрузки

METHOD OF DESIGNING AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH RANDOM LOADING POWERED FROM A SINGLE-PHASE NETWORK

Yu. Shurub,
A. Dudnyk,
D. Lavinskiy

Abstract. *The operating modes of many electric drives used in the mechanisms of agricultural production are characterized by a random load moment change in a wide range. This also applies to electric drives based on a three-phase asynchronous drives powered by a single-phase network - three-phase single-phase electric drives with adjustable phase-shift modules.*

The intensive stochastic nature of the perturbation changes significantly decrease the electric drives operation quality: requires excessive installed drive capacity, causes the blows in mechanical parts, engine and network current throws, reduces the quality of consumed energy and increases power losses. It is possible to increase the efficiency and reliability of their work by increasing the overload ability of the electric drive in dynamic modes to overcome the release of random perturbations.

The method of overcoming stochastic load torque emissions in three-phase single-phase asynchronous electric drives is proposed due to the use of a discretely adjustable phase-displacement module with a statistically optimal filter. The technique of designing a three-phase one-phase asynchronous electric drive with an adjustable phase separating module is developed, which allows to obtain a symmetric mode in a wide range of load variations with its random nature. Using the algorithm for optimal filtration in closed systems of single-phase asynchronous electric drives allows to provide a minimum dispersion of the asymmetry coefficient and obtain an efficiency close to the efficiency of the engine with three-phase power supply, with intense change of stochastic loads.

Keywords: asynchronous electric drive, phase- shift module, stochastic load

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НВЧ-УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ КУКУРУДЗИ

А. І. ЧМІЛЬ, доктор технічних наук, професор

К. О. ЛАЗАРЮК, аспірант*

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: kostiantynlazariuk@gmail.com

Анотація. В основу роботи сучасних генераторів і підсилювачів НВЧ покладено принцип взаємодії струмів носіїв зарядів з НВЧ-поллями. У таких приладах управління здійснюється за допомогою елементів хвилеводних трактів: резонаторів та уповільнюючих систем. Усі НВЧ-прилади можна розділити на дві категорії: вакуумні й твердотілі. До першої належить магнетрон, у якому між катодом і анодом, за рахунок зовнішнього джерела постійної напруги, виникають схрещені статичні електричні і магнітне поля. Частота НВЧ-коливань і геометричні розміри резонаторів тісно пов'язані один із одним. Очевидно, що частота генерації залежить і від напруженості магнітного поля. Обертаючись круговими орбітами, електрони багаторазово віддають свою енергію НВЧ-полю, так що $\text{ККД}_{\text{ген}} \sim 90\%$.

Сконструйований нами хвилевід можна розглядати як систему плоских дзеркал, що утворюють замкнену порожнину. При цьому на одній зі стінок хвилеводу знаходиться штировий випромінювач-антена. Форма генеруючої ним хвилі достатньо складна й подібна до поля випромінювання диполя в ближній зоні, але вона може розглядатися як сума плоских хвиль, що поширюються у різних напрямках, крім напрямків уздовж осі випромінювача. Оскільки струми НВЧ поширюються поверхнею провідника, внутрішня поверхня хвилеводу повинна бути ідеально гладкою, без подряпин, кратерів і наростів. Дефекти поверхні хвилеводу є серйозною перешкодою для струмів НВЧ.

Ключові слова: електромагнітне поле високої частоти, НВЧ-установка, хвилевід, магнетрон

Актуальність. Питанню передпосівної обробки сільськогосподарської продукції приділяється значна увага, особливо останніми роками, коли постійно зростає собівартість аграрного виробництва.

Однією з найважливіших сільськогосподарських культур є кукурудза. Однак потенційні можливості цієї культури використовуються далеко не повністю. Основні причини, що стримують підвищення врожайності, є низька схожість, висока чутливість сортів до захворювань і шкідників,

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор А. І. Чміль

© А. І. Чміль, К. О. Лазарюк, 2018

слабка енергія проростання насіння. Не менш значною проблемою є збереження вирощеного продукту, тому що його втрати в процесі зберігання через вплив грибкових, вірусних, бактеріальних та інших захворювань можуть досягати більш ніж 20%.

Відомо, що особливості процесу проростання насіння і подальшого розвитку рослини зумовлені епігенетичними механізмами клітинної активації, які «запускають» складні багатоетапні біохімічні реакції. Зокрема, існують чинники, які визначають повноту реалізації генетичного потенціалу насіння, збільшують їх стійкість до несприятливих умов навколишнього середовища, підвищують імунітет до вірусних, бактеріальних і грибкових захворювань. Програма розвитку насіння, «запущена» при його проростанні, викликає безліч послідовних біохімічних реакцій в онтогенезі, у результаті чого, може покращитися стійкість рослин до несприятливих факторів розвитку та підвищення врожайності.

Для успішного подолання зазначених проблем необхідно використовувати сучасні високоефективні технології передпосівної обробки насіння, які дадуть змогу отримати екологічно чистий та екологічно безпечний продукт, стійкий до стресових факторів проростання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В основу роботи сучасних генераторів і підсилювачів НВЧ покладено принцип взаємодії струмів носіїв зарядів з НВЧ-полями. У таких приладах управління здійснюється за допомогою елементів хвилеводних трактів: резонаторів і уповільнюючих систем.

Усі НВЧ-прилади можна розділити на дві категорії: вакуумні й твердотілі. До першої належить магнетрон (рис.1)[1], у якому між катодом і анодом, за рахунок зовнішнього джерела постійної напруги, виникають схрещені статичні електричні та магнітне поля. Електрони в таких схрещених полях рухаються з певною середньою швидкістю по замкнених кругових орбітах. Якщо ця швидкість дорівнює середній швидкості НВЧ-хвилі, тобто виконується умова синхронізму електронів і хвиль, то НВЧ-поле, наведене електронами в резонаторах, проникає зі щілин резонаторів у проміжок анод-катод з певною просторовою періодичністю, гальмує ці електрони, формуючи з них так звані спиці просторових зарядів. При цьому гальмуванні, кінетична енергія електронів перетворюється на енергію НВЧ-поля. Для повної передачі енергії від електронів полю необхідно, щоб електрони переміщувалися від резонатора до резонатора за час

$$t_{\text{пр}} = 1/2 T_{\text{НВЧкол}}, \quad (1)$$

де $t_{\text{пр}}$ – час руху електронів між резонаторами;

$T_{\text{НВЧкол}}$ – період НВЧ-коливання.

Таким чином, частота НВЧ-коливань і геометричні розміри резонаторів тісно пов'язані один із одним. Очевидно, що частота генерації залежить і від напруженості магнітного поля. Обертаючись круговими орбітами, електрони багаторазово віддають свою енергію НВЧ-полю, так що $\text{ККД}_{\text{ген}} \sim 90\%$.

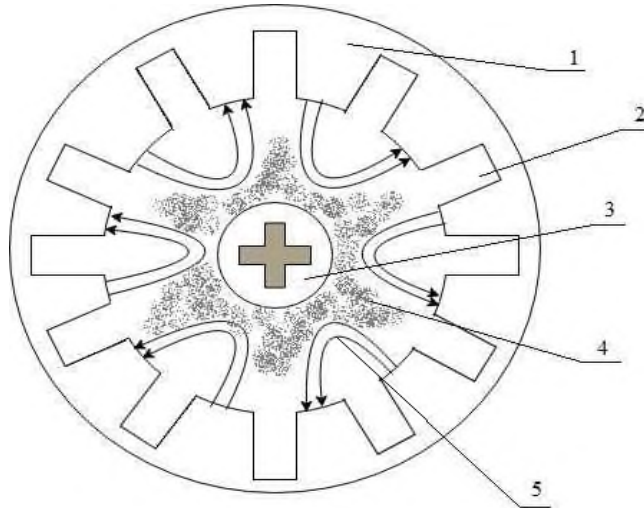


Рис. 1. Антена магнетрона:

1 – катод; 2 – резонаторна камера; 3 – анод; 4 – заряд; 5 – силові лінії НВЧ

Хвилевід являє собою порожню металеву трубу з добре провідними стінками, у межах якої можуть розповсюджуватися електромагнітні хвилі.

НВЧ-струм, протікає поверхнею провідника й тому велика площа хвилеводу відіграє позитивну роль, забезпечуючи малі струмові втрати. Крім того, хвилевід, є резонансним пристроєм. Завдяки розрахунку його геометричних розмірів, у ньому виникають хвилі лише потрібної нам частоти. Магнетрон, під час роботи, крім хвиль основної – потрібної частоти, випромінює весь спектр побічних частот – гармонік, які мають негативний вплив на роботу магнетрона і всієї системи в цілому [2].

Мета дослідження – аналіз та обґрунтування конструктивних елементів НВЧ установки для передпосівної обробки насіння кукурудзи.

Матеріали і методи дослідження. Сконструйований нами хвилевід можна розглядати як систему плоских дзеркал, що утворюють замкнену порожнину (рис. 2). При цьому на одній зі стінок хвилеводу знаходиться штировий випромінювач-антена. Форма генеруючої ним хвилі достатньо складна і подібна до поля випромінювання диполя в ближній зоні, але вона може розглядатися як сума плоских хвиль, що поширюються у різних напрямках, крім напрямків уздовж осі випромінювача. Хвилі, хвильові вектори яких лежать у площині поперечного перерізу, падають на вузькі стінки хвилеводу, відбиваються, але, оскільки їх хвильовий вектор залишається лежати в тій самій площині, вони не беруть участі в перенесенні енергії вздовж хвилеводу, а утворюють, у результаті взаємного впливу, стоячу хвилю. Кучність цієї хвилі повинна знаходитися в місці розташування випромінювача. Звідси випливає, що відстань від випромінювача до кожної з бічних стінок повинна бути

$$H=\lambda/4, \quad (2)$$

де H – відстань від антени магнетрона до бічних стінок хвилевода;
 λ – довжина хвилі НВЧ поля;
 відстань між цими стінками

$$L = \lambda/2, \quad (3)$$

а співвідношення сторін

$$a/b \leq 0.5. \quad (4)$$

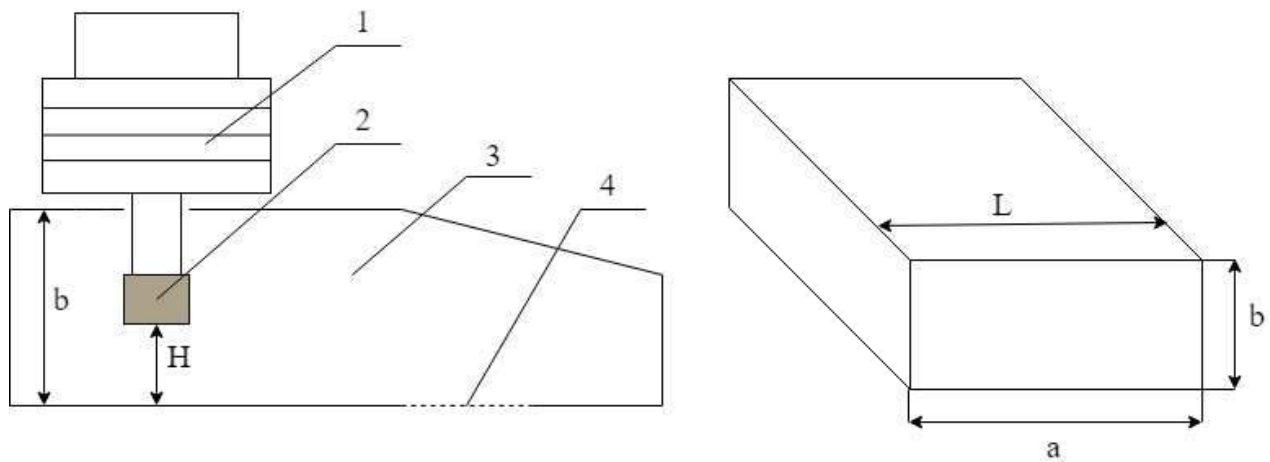


Рис. 2. Геометричні параметри хвилеводу:

1 – магнетрон; 2 – антена магнетрона; 3 – порожнина хвилеводу;
 4 – вихід хвилеводу в камеру

Це дає змогу генерувати в ньому мікрохвилі тієї частоти, яка необхідна. Хвилі побічних – паразитних частот, завдяки багаторазовому відбиттю від стінки хвилеводу, або взаємознищуються або згасають.

Відомо, що всі резонансні пристрої, у тому числі й магнетрон, здатні не тільки випромінювати хвилі, але й приймати їх. Коли магнетрон випромінює увесь спектр коливань безпосередньо в камеру для обробки матеріалу, без хвилеводу, то через нерівномірність навантаження в камері, певна частина спектру після відбивання від її стіни, обов'язково повернеться назад до магнетрона, що призведе до втрати потужності і перегріву магнетрона. Тому наявність хвилеводу, дозволяє узгодити генератор з навантаженням і тим самим виключити це явище.

Висновки та перспективи. Аналіз проведених досліджень свідчить про те, що хвилевід магнетрона має відповідати певним геометричним параметрам для коректної роботи всієї установки. Сконструйований нами хвилевід можна розглядати як систему плоских дзеркал, що утворюють замкнену порожнину. При цьому на одній зі стінок хвилеводу знаходиться штировий випромінювач-антена. Оскільки довжина генеруючої хвилі магнетрона $\lambda = 12$ см, то ми отримали, що відстань від випромінювача до кожної з бічних стінок $H = 3$ см, а відстань між цими стінками $L = 6$ см.

Список літератури

1. Електротехнології обробки сільськогосподарської продукції : навч. посіб. / Г. Б. Іноземцев, О. М. Берека, О. В. Окушко, С. М. Усенко ; за ред. Г. Б. Іноземцева. – К. : КОМПРИНТ, 2015. – 306 с.
2. Шибков А. Н. Направляемые волны и направляющие системы : учеб. пособие / А. Н. Шибков. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2013. – 63 с.

References

1. Inozemtsev, G.B., Berka, O. M., Okushko, O. V, Usenko, S. M. (2015). Elektrotekhnologii obrobky silskohospodarskoi produktsii [Electrotechnology of processing of agricultural products]. – Kyiv: KOMPRYNT, 306.
2. Shibkov, A. N. (2013). Napravlyayemyye volny i napravlyayushchiye sistemy: uchebnoye posobiye [Guided Waves and Guiding Systems]. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 63.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН КУКУРУЗЫ

**А. И. Чмиль,
К. А. Лазарюк**

Аннотация. В основу работы современных генераторов и усилителей СВЧ положен принцип взаимодействия токов носителей зарядов с СВЧ-полями. В таких приборах управление осуществляется с помощью элементов волноводных трактов: резонаторов и замедляющих систем. Все СВЧ-приборы можно разделить на две категории: вакуумные и твердотельные. К первой относится магнетрон, в котором между катодом и анодом, за счет внешнего источника постоянного напряжения, возникают скрещенные статические электрические и магнитное поля. Частота СВЧ-колебаний и геометрические размеры резонаторов тесно связаны друг с другом. Очевидно, что частота генерации зависит и от напряженности магнитного поля. Вращаясь по круговым орбитам электроны многократно отдают свою энергию СВЧ-полю, так что ККДген ~ 90%.

Сконструированный нами волновод можно рассматривать как систему плоских зеркал, образующих замкнутую полость. При этом на одной из стенок волновода находится штыревой излучатель-антенна. Форма генерирующей ним волны достаточно сложная и подобна полю излучения диполя в ближней зоне, но она может рассматриваться как сумма плоских волн, распространяющихся в различных направлениях, кроме направления вдоль оси излучателя. Так как токи СВЧ распространяются по поверхности проводника, внутренняя поверхность волновода должна быть идеально гладкой, без царапин, кратеров и наростов. Дефекты поверхности волновода являются серьезным препятствием для токов СВЧ.

Ключевые слова: электромагнитное поле высокой частоты, СВЧ-установка, волновод, магнетрон

THE SUBSTANTIATION OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE MICROWAVE INSTALLATION FOR THE INTERMEDIATE PROCESSING OF CORN SEEDS

A. Chmil,
K. Lazariuk

Abstract. *The principle of interaction of charge carrier currents with microwave fields is based on the work of modern generators and microwave amplifiers. In such devices, control is carried out with the help of elements of waveguide paths: resonators and remote-control systems. All microwave devices can be divided into two categories: vacuum and solid-state. The first is the magnetron. In which between the cathode and the anode due to an external source of constant voltage arise crossed static electric and magnetic fields. The frequency of microwave oscillations and the geometric dimensions of the resonators are closely related to each other. It is obvious that the generation frequency depends on the intensity of the magnetic field. Rotating in circular orbits, electrons repeatedly give their energy to the microwave field, so that the KKDgen is 90%.*

The waveguide constructed by us can be regarded as a system of plane mirrors forming a closed cavity. At the same time on one of the walls of the waveguide there is a whip radiator-antenna. The shape of the generating wave is quite complex and similar to the dipole radiation field in the near zone, but it can be considered as the sum of plane waves propagating in different directions except for the direction along the axis of the radiator. Since microwave currents propagate along the surface of the conductor, the inner surface of the waveguide must be perfectly smooth, without scratches, craters and outgrowths. Defects of the surface of the waveguide - is a serious obstacle to microwave currents.

Keywords: *high-frequency electromagnetic field, microwave installation, waveguide, magnetron*

**НЕЛИНЕЙНОЕ КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЛЕНТОЧНЫМ КОНВЕЙЕРОМ КОМПЛЕКСА
НАПОЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ ЗЕРНА**

И. М. ГОЛОДНЫЙ, кандидат технических наук, доцент
*Национальный университет биоресурсов
и природопользования Украины*

А. В. ТОРОПОВ, кандидат технических наук, доцент

Л. В. ТОРОПОВА, ассистент

*Национальный технический университет Украины
"КПИ им. И. Сикорского"*

E-mail: golodnyi@ukr.net, toropovtosha@ukr.net, liliaya@ukr.net

Аннотация. В настоящее время все большее распространение получают комплексы напольного хранения зерна. Одним из наиболее энергоёмких узлов является ленточный конвейер для равномерного распределения зерна по всей длине комплекса. Наиболее энергоэффективным режимом работы такого конвейера является режим стабилизации производительности.

В то же время, практическая реализация систем управления для стабилизации количества зерна является относительно сложной задачей. Датчики для непосредственного измерения объема сыпучих грузов требуют значительных капиталовложений и в сельскохозяйственных комплексах применяются крайне редко. Другой проблемой, препятствующей использованию данного оборудования, является сложность разработки самого алгоритма управления загрузкой конвейера вследствие наличия звена чистого запаздывания в контуре регулирования.

Целью исследования является разработка близкой к оптимальной системы управления производительностью ленточного конвейера, обеспечивающей снижение энергопотребления комплекса. При этом, для получения алгоритма управления использован метод Беллмана–Ляпунова с использованием концепции метода «погружения». Исходная задача синтеза для нелинейного объекта представлена в виде семейства линейных задач аналитического конструирования.

Далее осуществлено «сшивание» полученных решений на основе закона оптимального изменения коэффициентов обратных связей. В результате, для контура стабилизации производительности конвейера полученный регулятор описывается

нелинейной зависимостью от переменных состояния. Преимущество использования синтезированного регулятора подтверждается результатами цифрового моделирования конвейера транспортировки зерна.

Ключевые слова: *ленточный конвейер, метод Беллмана–Ляпунова, метод «погружения», стабилизация производительности, напольное хранение зерна*

Актуальность. В настоящее время все большее распространение получают комплексы напольного хранения зерна. В них применяется автоматизированная загрузка/выгрузка зерна, при этом обеспечивается хорошая наполняемость пространства зернохранилища [1]. Одним из перспективных направлений в развитии средств автоматизации для перемещения зерна является применение регулируемого электропривода для изменения скорости конвейеров и механизмов перемещения распределительных узлов. Они позволяют обеспечить надежную защиту двигателей от перегрева, перегрузок, пониженного напряжения, плавный разгон и замедление механизма без существенных рывков ленты. Также можно добиться существенного снижения энергопотребления при использовании регулируемого электропривода с целью обеспечения стабилизации количества транспортируемого зерна. Такие системы управления производительностью рекомендованы к использованию на больших складах напольного хранения, где длина конвейера достигает 150–200 метров, а подача зерна непостоянна.

В то же время, практическая реализация систем стабилизации количества зерна является относительно сложной задачей. Датчики для непосредственного измерения объема сыпучих грузов требуют значительных капиталовложений и в сельскохозяйственных комплексах применяются крайне редко. Поэтому, в качестве обратной связи по количеству зерна используется сигнал с преобразователя частоты по моменту нагрузки, позволяющий оценить массу транспортируемого груза с достаточно высокой точностью.

Другой проблемой является сложность разработки самого алгоритма управления загрузкой конвейера вследствие наличия звена чистого запаздывания в контуре регулирования. Для компенсации запаздывания в конвейерных системах небольшой длины используются линейные регуляторы с дифференциальной составляющей. При увеличении времени запаздывания применение таких регуляторов становится неэффективным и качество переходных процессов далеко от оптимального.

Анализ последних исследований и публикаций. Задача регулирования загрузки систем непрерывного транспорта широко рассматривается в работах [3, 4]. В них решается задача синтеза линейно-квадратичных регуляторов загрузки, в которой существующие нелинейности рассматриваются как минимизируемые управляющие воздействия. Внешние возмущения, действующие на контур, также принимаются минимизируемыми по квадратичному критерию оптимальности. В этом

случае, при решении задачи поиска оптимального регулятора обеспечивается минимум функционала качества лишь при минимальном влиянии возмущений и нелинейностей [5]. Следовательно, полученные ранее решения задачи аналитического конструирования регуляторов дают наилучший результат лишь при незначительных колебаниях количества подаваемого зерна с нории.

Цель исследования – снижение энергопотребления за счет оптимизации системы управления производительностью оборудования.

Материалы и методы исследования. Синтез квазиоптимального регулятора проводился методом Беллмана-Ляпунова с использованием концепции метода «погружения». Исследования переходных процессов электропривода конвейера проводились с помощью статических методов обработки результатов исследований компьютерной модели в системе MatLab.

Результаты исследований и их обсуждение. Одним из наиболее популярных подходов синтеза оптимальных регуляторов для непрерывных технологических процессов для систем с чистым запаздыванием является процедура аналитического конструирования [6]. При этом осуществляется минимизация функционала качества для объекта, описываемого системой дифференциальных уравнений. С точки зрения повышения надежности и энергоэффективности конвейерной системы в качестве минимизируемого функционала целесообразно использовать критерии динамической точности и минимума энергетических затрат на управление.

Контур стабилизации загрузки ленточного конвейера с учетом чистого запаздывания перемещения имеет вид, представленный на рис.1.

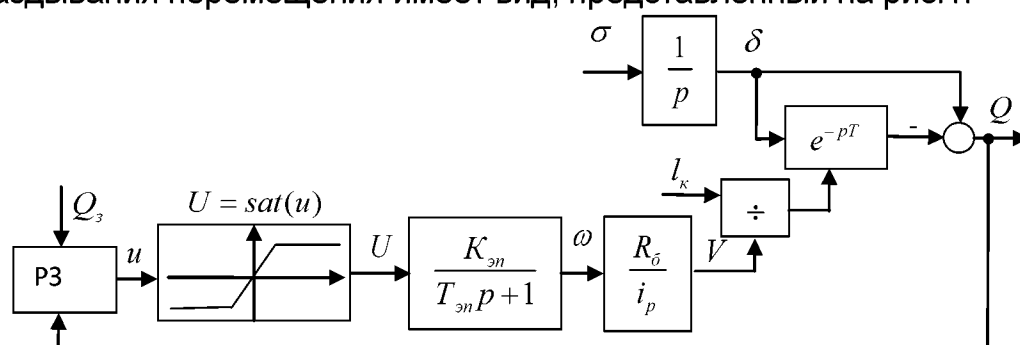


Рис. 1. Схема контура стабилизации загрузки ленточного конвейера комплекса напольного хранения зерна:

Q_3, Q – заданное и текущее количество зерна на конвейере; δ – количество зерна, погруженного на конвейер; σ – мгновенное количество зерна, подаваемого с нории на конвейер; l_k – длина конвейера; R_b – радиус приводного барабана; i_p – передаточное число редуктора; $K_{эп}, T_{эп}$ – коэффициент усиления и постоянная времени электропривода, настроенного на апериодический характер переходного процесса; V – линейная скорость ленты; ω – скорость вращения двигателя приводного барабана; $U = sat(u)$ – управляющее воздействие на выходе блока типа «ограничение», u – выходное воздействие регулятора загрузки.

Аналитическое конструирование регуляторов широко распространено для линейных систем и квадратичных функционалов качества [7]. В случае существования нелинейных некомпенсируемых зависимостей в модели объекта, задача синтеза оптимального управления существенно усложняется. Поэтому, для использования вышеуказанного подхода необходимо получить линеаризованную с достаточной точностью математическую модель объекта, а также выбрать общий вид минимизируемого функционала качества.

Зависимость текущей загрузки конвейерной ленты от мгновенного количества зерна, поступающего с нории, определяется выражением:

$$Q = (1 - e^{-pT})\delta. \quad (1)$$

Раскладываем составляющую e^{-pT} в ряд Тейлора, при этом ограничимся ее первыми двумя составляющими. При учете интегральной составляющей загрузки получим:

$$Q = (1 - e^{-pT})\delta = (1 - \frac{1}{e^{pT}})\delta = (\frac{e^{pT} - 1}{e^{pT}})\delta \approx (\frac{1 + pT - 1}{1 + pT})\delta = \frac{T}{Tp + 1} \sigma. \quad (2)$$

Время чистого запаздывания является величиной, обратно пропорциональной скорости $T = l_k i_p R_0^{-1} \omega^{-1}$. Поэтому, запишем дифференциальное уравнение, описывающее инерционность процесса загрузки зерна в нормальной форме Коши:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{R_0}{l_k i_p} \omega Q + \sigma \quad (3)$$

При апериодическом характере изменения скорости конвейера от управляющего сигнала, получим:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{эн}}} \omega + \frac{K_{\text{эн}}}{T_{\text{эн}}} \text{sat}(u). \quad (4)$$

Система дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, описывающая поведение ленточного конвейера для непрерывной транспортировки зерна запишется:

$$\left. \begin{aligned} x_1' &= -a_1 x_1 x_2 + \sigma; \\ x_2' &= -a_3 x_2 + \text{sat}(u), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $x_1 = Q$, $x_2 = \omega$, $a_1 = l_k^{-1} R_0 i_p^{-1}$, $a_3 = T_{\text{эн}}^{-1}$, $b = K_{\text{эн}} T_{\text{эн}}^{-1}$.

Минимизируемый функционал качества, обеспечивающий динамическую точность и минимум энергетических затрат на управление:

$$\min_u J = \int_0^{\infty} (\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + cu^2) dt, \quad (6)$$

где α_1 , α_2 , c – весовые коэффициенты, определяющие ограничения на переменные состояния и управление, соответственно.

Далее осуществим линеаризацию составляющей x_1x_2 , входящей в первое дифференциальное уравнение системы, а также нелинейности типа «насыщение». Для первой нелинейности осуществляется линеаризация «в точке» [8], например, в точке номинального режима работы конвейера. При этом, $x_1x_2 = a_1(x_1, x_2)x_1 + a_2(x_1, x_2)x_2$, где $a_1(x_1, x_2)$, $a_2(x_1, x_2)$ – коэффициенты линеаризации «в точке». Для задачи максимизации загрузки конвейера второй подход является более предпочтительным. В случае наличия нелинейности типа «ограничение», целесообразно осуществлять линеаризацию нелинейности методом «секущих» [9]. При этом можно записать, что $\text{sat}(u) = b(u)u$, где $b(u)$ – коэффициент линеаризации, зависящий от управляющего воздействия. Система линеаризованных дифференциальных уравнений, описывающая динамику конвейера с учетом чистого запаздывания перемещения зерна, запишется:

$$\left. \begin{aligned} x_1' &= -a_1(x_1, x_2)x_1 - a_2(x_1, x_2)x_2 + \sigma; \\ x_2' &= -a_3x_2 + b(u)u. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Величина σ является возмущающим воздействием и при осуществлении процедуры синтеза не учитывается. В соответствии с методикой, изложенной в [10], процедуру синтеза с использованием метода «погружения» можно представить в виде следующей последовательности этапов.

Первый этап. Осуществляется решение задачи аналитического конструирования для линеаризованной системы (7) и квадратичного функционала при $a_1(x_1, x_2) = a_{1M}$, $a_2(x_1, x_2) = a_{2M}$, $b(u) = b_M$ для решения задачи «в малом» и $a_1(x_1, x_2) = a_{1B}$, $a_2(x_1, x_2) = a_{2B}$, $b(u) = b_B$ для решения задачи «в большом». При этом решается классическая задача А. М. Летова и находится алгоритм оптимального управления. Уравнения регулятора при решении задачи в «малом» и «в большом» запишутся в виде

$$u_M = K_{1M}x_1 - K_{2M}x_2; \quad (8)$$

$$u_B = K_{1B}x_1 - K_{2B}x_2, \quad (9)$$

где K_{1M} , K_{2M} , K_{1B} , K_{2B} – коэффициенты обратных связей.

Далее определяются новые допустимые управления и осуществляется сшивание «мгновенных значений» управляющих воздействий u_M и u_B , справедливых для различных областей фазового пространства. Коэффициенты регулятора K_1, K_2 являются функциями переменных состояния, поэтому управляющими воздействиями полагаем вариации $\Delta K_1, \Delta K_2$. Тогда управление «в большом» принимает вид:

$$u_B = K_{1M}x_1 - K_{2M}x_2 + \Delta K_1x_1 - \Delta K_2x_2. \quad (10)$$

Минимизируемый неклассический функционал (критерий обобщенной работы Красовского) [11], используемый для ограничения вариаций коэффициентов обратных связей, имеет вид:

$$\min_{\Delta K_1, \Delta K_2} J = \int_0^{\infty} \left[\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + c_1 \Delta K_1^2 + c_2 \Delta K_2^2 + \frac{x_1^2}{4c_1} \left(b_B \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{x_2^2}{4c_2} \left(b_B \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^2 \right] dt. \quad (11)$$

Подставляя (10) в (8) и (9), получим:

$$\left. \begin{aligned} x_1' &= -a_{1B}x_1 - a_{2B}x_2; \\ x_2' &= -a_3x_2 - b_B(K_{1M}x_1 - R_{2M}x_2 + \Delta K_1x_1 - \Delta K_2x_2). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Для системы уравнений (12) и минимизируемого функционала (11) составим функциональное уравнение Беллмана:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta K_1, \Delta K_2} [& \alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + c_1 \Delta K_1^2 + c_2 \Delta K_2^2 + \frac{x_1^2}{4c_1} \left(b_B \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{x_2^2}{4c_2} \left(b_B \frac{\partial V}{\partial x_2} \right)^2 + \\ & + \frac{\partial V}{\partial x_1} \cdot (-a_{1B}x_1 - a_{2B}x_2) + \frac{\partial V}{\partial x_2} \cdot (-a_3x_2 - b_B(K_{1M}x_1 - K_{2M}x_2 + \Delta K_1x_1 - \Delta K_2x_2))] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Реализуя процедуру минимизации, получим:

$$\Delta K_1 = \frac{b_B}{2c_1} \cdot \frac{\partial V}{\partial x_2} \cdot x_1, \Delta K_2 = -\frac{b_B}{2c_2} \cdot \frac{\partial V}{\partial x_2} \cdot x_2. \quad (14)$$

Подставляем уравнения (14) в (13) и получаем модификацию уравнения Гамильтона – Якоби – Беллмана в замкнутой форме.

$$\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} \cdot (-a_{1B}x_1 - a_{2B}x_2) + \frac{\partial V}{\partial x_2} \cdot (-a_3x_2 - b_B(K_{1M}x_1 - K_{2M}x_2)) = 0 \quad (15)$$

Решение уравнения (15) будем искать в виде квадратичной формы

$$V(x_1, x_2) = K_{11}x_1^2 + 2K_{12}x_1x_2 + K_{22}x_2^2. \quad (16)$$

Подставляем производные от квадратичной формы в уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана (15), находим коэффициенты квадратичной формы и подставляем их в уравнение регулятора.

Уравнение регулятора в общем виде примет вид:

$$u = K_1x_1 - K_2x_2 + \left(\frac{b_B}{c_1}x_1^2 + \frac{b_B}{c_2}x_2^2 \right) (K_{1C}x_1 - K_{2C}x_2), \quad (17)$$

где K_{1C} , K_{2C} – коэффициенты квадратичной формы, полученные при «сшивании» решений.

Исследование динамических характеристик системы с синтезированным регулятором проводилось методом цифрового моделирования с применением пакета MATLAB. На рис. 2 представлен график процесса работы конвейера при запуске без нагрузки при использовании ПИД-регулятора количества зерна. При этом в системе имеет место перерегулирование, которое может компенсироваться лишь существенным затягиванием переходного процесса. Параметры ПИД-регулятора определялись с помощью блока автоматической настройки параметров Signal Constraint при реакции на ступенчатое изменение задания, реализованного в MATLAB. Использование нелинейного квазиоптимального регулятора позволило существенно улучшить качество переходного процесса, практически исключить перерегулирование.

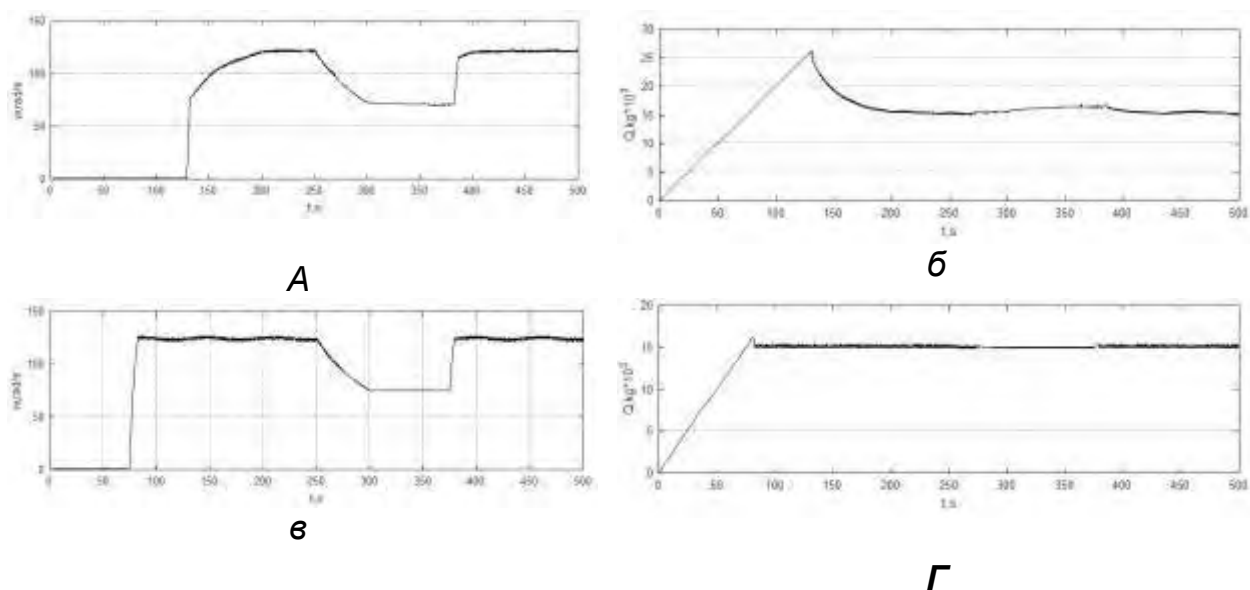


Рис. 2. Графики переходных процессов при заполнении пустого конвейера:

а – по скорости при использовании ПИД-регулятора; б – по нагрузке при использовании ПИД-регулятора; в – по скорости при использовании нелинейного регулятора; г – по нагрузке при использовании нелинейного регулятора

Выводы и перспективы. Применение линеаризации «в точке» и методом «секущих» позволило применить для контура регулирования загрузки конвейера процедуру аналитического конструирования оптимального регулятора. В результате синтеза регулятора для линеаризованной системы получен закон нелинейного квазиоптимального управления, включающий сигнал по нагрузке и скорости электродвигателя конвейера, достаточно просто реализуемый на современных программируемых контроллерах, управляющего всем комплексом хранения зерна. Качество переходных процессов в контуре при использовании нелинейного квазиоптимального регулятора существенно выше, чем при использовании классического ПИД-регулятора. Дальнейшее улучшение динамических показателей системы возможно при использовании более полной математической модели конвейера и синтеза регулятора с учетом упругости ленты.

Список литературы

1. Склад напольного хранения на наклонном днище [Электронный ресурс]. – URL: <http://zeo.ua/katalog-oborudovaniya/hranenie-zerna/sklad-napolnogo-hraneniya-zeo-fs>
2. Инструкция по эксплуатации преобразователя частоты SMVector [Электронный ресурс]. – URL : http://www.lenze.org.ua/pdf/manual_smvector_rus.pdf
3. Дмитриева В. В. Автоматическая стабилизация погонной нагрузки ленточного конвейера / В. В. Дмитриева, Л. Д. Певзнер. – М. : Препринт, 2004. – 25 с.
4. Боровикова А. П. Разработка и исследование системы автоматического управления загрузкой магистральной конвейерной линии / А. П. Боровикова, А. Е. Ткаченко, К. Н. Маренич // Автоматизация

технологических объектов и процессов. Поиск молодых : сборник научных трудов XVII научно-технической конференции аспирантов и студентов, г. Донецк, 24–25 мая 2017 г. – Донецк : ДонНТУ, 2017. – 409 с.

5. Печеник М. В. Дослідження втрат енергії в електромеханічній системі конвеєра при плавній зміні навантаження / М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, Л. М. Наумчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2015. – Вип. 2. – С. 67–73.

6. Колесников А. А. Новые нелинейные методы управления полетом / А. А. Колесников. – М. : Физматлит, 2013. – 196 с.

7. Летов А. М. Динамика полета и управление / А. М. Летов. – М. : Наука, 1969. – 359 с.

8. Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Ю. В. Петраков. – К. : УкрНДІАТ, 2003. – 383 с.

9. Гельднер К. Нелинейные системы управления / К. Гельднер, С. Кубик. – М. : Мир, 1987. – 368 с.

10. Kudin V. Synthesis of suboptimal nonlinear regulator by immersion method / V. Kudin, J. Kolacny // J. Electrical engineering, Bratislava, Slovakia. – 1998, № 49. – P. 1–2, 11–15.

11. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.

References

1. Sklad napol'nogo khraneniya na naklonnom dnishche [Floor storage warehouse on an inclined bottom]. Available at: <http://zeo.ua/katalog-oborudovaniya/hranenie-zerna/sklad-napolnogo-hraneniya-zeo-fs> Date of access 21.03.2018.

2. Instruksiya po ekspluatatsii preobrazovatelya chastoty SMVector [SMVector frequency converter operating instruction]: Available at: http://www.lenze.org.ua/pdf/manual_smvector_eng.pdf Date of access 21.03.2018.

3. Dmitrieva, V. V., Pevzner, L. D. (2004). Avtomaticheskaya stabilizatsiya pogonnoy nagruzki lentochnogo konveyera [Automatic stabilization of the loading of a belt conveyor]. Moscow: Preprint, 25.

4. Borovikova, A. P., Tkachenko, A. E., Marenich, K. N. (2017). Razrabotka i issledovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya zagruzkoj magistralnoy konveyernoy linii [Development and investigation of the automatic control system of loading of the main conveyor line]. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh ob"yektov i protsessov. Poisk molodykh: sbornik nauchnykh trudov KHVII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii aspirantov i studentov, g. Donetsk, 24–25 maya 2017 g. Donetsk : DonNTU, 409.

5. Pechenik, M. V., Bur'yan, S. O., , Naumchuk, L. M. (2015). Dosliddzhennya vtrat energiyi v elektromehanichnly sisteml konveera pri plavnlly zmlnl navantazhennya [Investigation of energy losses in the electromechanical system of the conveyor with smooth load change]. Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy, 2, 67–73.

6. Kolesnikov, A. A. (2013). Novyie nelineynnye metody upravleniya poletom [New nonlinear methods of flight control]. Moscow: Fizmatlit, 196.

7. Letov, A. M. (1969). Dinamika poleta i upravlenie [Flight dynamics and control]. Moscow: Nauka, 359.

8. Petrakov, Yu. V. (2003). Avtomatichne upravlinnya protsesami obrobki materlallv rlyzannyam [Automatic control of the processing of materials by cutting]. Kyiv: UkrNIAT, 383.

9. Geldner, K., Kubik, S. (1987). Nelineynyie sistemyi upravleniya [Nonlinear control systems]. Moskow: Mir, 368.

10. Kudin, V., Kolacny, J. (1998). Synthesis of suboptimal non-linear regulator by immersion method. J. Electrical engineering, Bratislava, Slovakia, 49 (1–2), 11–15.

11. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya (1987). [Handbook on the theory of automatic control]. Edited by A. A. Krasovsky. Moscow: Nauka, 712.

НЕЛІНІЙНЕ КВАЗІОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СТІЧКОВИМ КОНВЕЄРОМ КОМПЛЕКСУ ПІДЛОГОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА

**І. М. Голодний,
А. В. Торопов,
Л. В. Торопова**

Анотація. Нині дедалі більшого поширення набувають комплекси підлогового зберігання зерна. Одним із найбільш енергоємних вузлів є стрічковий конвеєр для рівномірного розподілу зерна по всій довжині комплексу. Найбільш енергоефективним режимом роботи такого конвеєра є режим стабілізації продуктивності. Водночас, практична реалізація систем управління для стабілізації кількості зерна є відносно складним завданням. Датчики для безпосереднього вимірювання об'єму сипучих вантажів потребують значних капіталовкладень і на сільськогосподарських комплексах застосовуються вкрай рідко. Іншою проблемою щодо використання даного обладнання є складність розробки самого алгоритму управління завантаженням конвеєра через наявність ланки чистого запізнювання в контурі регулювання.

Метою дослідження є розробка близької до оптимальної системи управління продуктивністю стрічкового конвеєра, що забезпечує зниження енергоспоживання комплексу. При цьому для отримання алгоритму управління використаний метод Беллмана-Ляпунова з використанням концепції методу «занурення». Вихідну задачу синтезу для нелінійного об'єкта подано у вигляді сімейства лінійних задач аналітичного конструювання.

Далі здійснено «зшивання» отриманих рішень на основі закону оптимальної зміни коефіцієнтів зворотних зв'язків. У результаті, для контуру стабілізації продуктивності конвеєра отриманий регулятор, який описується нелінійною залежністю від змінних стану. Перевага використання синтезованого регулятора підтверджується результатами цифрового моделювання конвеєра транспортування зерна.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, метод Беллмана-Ляпунова, метод «занурення», стабілізація продуктивності, підлогове зберігання зерна

NON-LINEAR QUASI-OPTIMAL CONTROL OF THE BELT CONVEYOR OF THE GRAIN STORAGE COMPLEX

I. Golodnyi,
A. Toropov,
L. Toropova

Abstract. *At present, the floor grain storage complexes are increasingly distributed. One of the most power-consuming units is a conveyor belt for uniform grain distribution throughout the length of the complex. The most energy efficient mode of operation of such a conveyor is productivity stabilization mode. At the same time, the practical implementation of control systems to stabilize the amount of grain is a relatively difficult task. Sensors for the direct measurement of the volume of bulk cargo require significant investment and in agricultural complexes are used extremely rarely. Another problem hindering the use of this equipment is the design complexity of the control algorithm conveyor loading due to the presence of pure delay link in the control loop.*

The aim of the research is developing of the optimal control system for the productivity of the belt conveyor, which ensures a reduction in the energy consumption of the complex. In this case, the Bellman-Lyapunov method to obtain the control algorithm using the concept of the immersion method was used. The initial synthesis problem for a nonlinear object in the form of a family of linear tasks of analytical construction is represented.

At the final stage of the regulator construction, "sewing" of the solutions on the basis of the law of optimal change of the feedback coefficients was carried out.

As a result, for the conveyor productivity stabilizing loop, obtained regulator by a nonlinear law on the state variables is described.

The advantage of using a synthesized regulator by the results of a numerical simulation of a grain conveyor is confirmed.

Keywords: *belt conveyor, grain storage, Bellman-Lyapunov method, "immersion" method, stabilization of productivity*

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ Й КІЛЬКОСТІ КАТОДНИХ СТАНЦІЙ ТА ЇХ ЗАХИСНОЇ ЗОНИ

В. Є. ВАСИЛЕНКОВ, кандидат технічних наук, доцент

Д. В. ТОПАЛОВ, студент магістратури

Національний університет біоресурсів

і природокористування України

E-mail: wasil14 @ ukr. net

Анотація. Вплив навколишнього середовища призводить до корозійних пошкоджень трубопроводів. Щоб запобігти цим пошкодженням, потрібно вчасно і у відповідних місцях налагоджувати протикорозійний захист.

Мета дослідження – захистити підземні трубопроводи в системах водопостачання на тваринницьких комплексах і тим самим продовжити ресурс їх використання за рахунок визначення потужності й кількості катодних станцій та їх захисної зони.

Теоретична та експериментальна складова досліджень активного захисту трубопроводів на тваринницьких комплексах здійснювалася на основі принципової схеми будови катодних станцій і розрахунку електрохімічного захисту підземних споруд із визначенням потужності, кількості катодних станцій та їх захисної зони на території тваринницького комплексу в дослідному господарстві Ворзель Київської області.

Встановлено, що для загальної довжини трубопроводів 1722 м достатньо однієї катодної станції потужністю 600 Вт, що має забезпечити підвищення економічної ефективності системи водопостачання на 10–15 % і продовжити термін її експлуатації.

Ключові слова: рух рідини, катодна станція, електрохімічний захист, підземні трубопроводи, експлуатація

Актуальність. Забезпечення надійності роботи систем трубопровідного транспорту є однією з першочергових задач для народного господарства. Одним із основних шляхів її вирішення є розробка й удосконалення моделей і методів прийняття рішень за умов невизначеності корозійних процесів в агресивному середовищі. Візуальний огляд уражених поверхонь експериментальних зразків свідчить про локальний характер корозійних уражень і можливість утворення наскрізних корозійних пошкоджень, що становить найбільшу небезпеку для трубопроводів. Тому розрахунок електрохімічного захисту підземних трубопроводів, які знаходяться в агресивному середовищі на території тваринницьких ферм, є важливою технологічною операцією в

системі водопостачання сільськогосподарських об'єктів і є актуальною задачею [2–4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Підземні металеві споруди (системи водопостачання на тваринницьких комплексах, кабелі з металевою бронею), які розташовані на території тваринницьких комплексів зазнають впливу як ґрунтової корозії, зумовленої впливом ґрунтових хімічних сполук, так і електрохімічної корозії. Для надійного функціонування та подовження термінів експлуатації сталевих підземних трубопроводів необхідний належний антикорозійний захист, який передбачає захисні ізоляційні покриття і катодно-поляризаційний електрохімічний захист.

Низька якість проектних і будівельно-монтажних робіт системи водопостачання призводить до перевитрати електроенергії та капіталовкладень на 20–30%. Неправильний підбір і установка насосного обладнання призводять до перевитрати електроенергії до 30 %, скорочення терміну служби насосів в 1,5–2 рази. Відсутність технологій і технічних засобів управління та захисту машинних систем для видобутку й транспортування вод, відсутність обліку та контролю подачі й споживання води – до втрат понад 30% води і перевитрати електроенергії. [1]. Тому розробка практичної технології катодного управління і захисту підземних трубопроводів, які працюють в агресивному середовищі, являє собою одну з головних задач при розрахунку систем водопостачання.

Мета дослідження – захистити підземні трубопроводи в системах водопостачання на тваринницьких комплексах і тим самим подовжити ресурс їх використання за рахунок визначення потужності, кількості катодних станцій та їх захисної зони.

Матеріали і методи дослідження. Теоретична й експериментальна складова досліджень активного захисту трубопроводів на тваринницьких комплексах здійснювалася на основі принципового устрою катодних станцій і розрахунку електрохімічного захисту підземних споруд із визначенням потужності й кількості катодних станцій та їх захисної зони.

Результати досліджень та їх обговорення. Схема процесу ґрунтової корозії подана на рис. 1. Як відомо, кожен метал має нормальний електродний потенціал, і при з'єднанні двох різних металів створюється гальванічна пара з різницею потенціалів, що викликає електричний струм.

Для вимірювання електродних потенціалів застосовуються неполяризовані електроди порівняння: водневий, мідно-сульфатний або свинцевий. У техніці електричного захисту переважно використовується мідно-сульфатний електрод порівняння. Відповідно до нього, метали мають потенціали: сталь – 0,76 В, свинець – 0,45 В, а алюміній – 1,99 В. [5].

Якщо в землі лежить сталева труба, то вона має негативний потенціал – 0,76 В. При потраплянні в верхній шар металу сторонні речовини (шлаки і т. д.) утворюють елемент з більш високим потенціалом. В результаті виникає гальванічна пара з різницею потенціалів; при

вологому ґрунті, який є електролітом, з'явиться струм, що йде від вищого потенціалу (анод) до нижчого (катод). Анодом буде місце домішки, а катодом – вся чиста поверхня металу. Вихід струму з металу через електроліт, згідно із законом Фарадея, супроводжується перенесенням в електроліт (руйнуванням) металу.

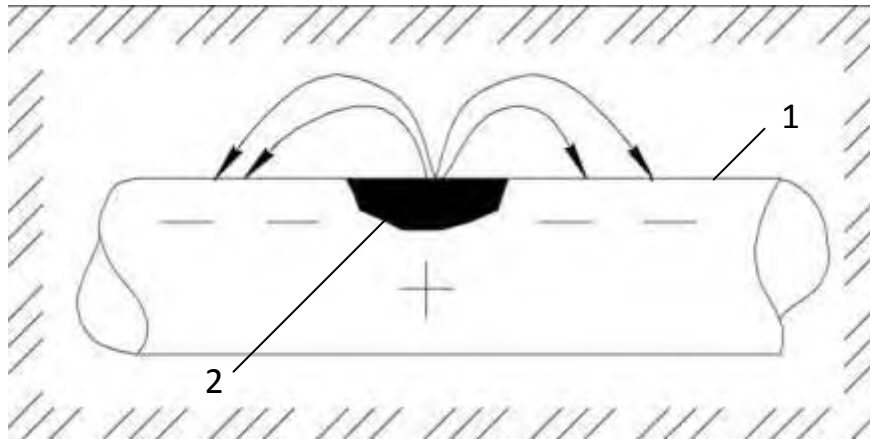


Рис. 1. Схема ґрунтової корозії:

1 – сталева труба (катод); 2 – утворення шлаків (анод)

При корозії підземних споруд від блукаючих струмів трансформаторних підстанцій, розташованих на території тваринницьких комплексів, кількісно ефект руйнування металу набагато перевищує ефект ґрунтової корозії.

Для захисту від ґрунтової корозії та електрокорозії застосовується один із заходів, а саме: катодний захист. На рис. 2 зображена принципова схема катодного захисту, прокладеного в землі трубопроводу.

Встановлена на землі катодна станція 1 (джерело струму) з'єднується негативним полюсом (катодом) з трубопроводом 3, металевим провідником з позитивним полюсом зі спеціально покладеним в землі металевим електродом – анодом 2. Під дією напруги катодної станції постійний струм проходить по колу анод-ґрунт-трубопровід і повертається по провіднику на катодну станцію. При цьому анод руйнується, а трубопровід зберігається. Для подолання власного потенціалу сталі – 0,76 В необхідна мінімальна величина захисного потенціалу – 0,87 В (для свинцю – 0,52 В і алюмінію – 1,0 В) [5].

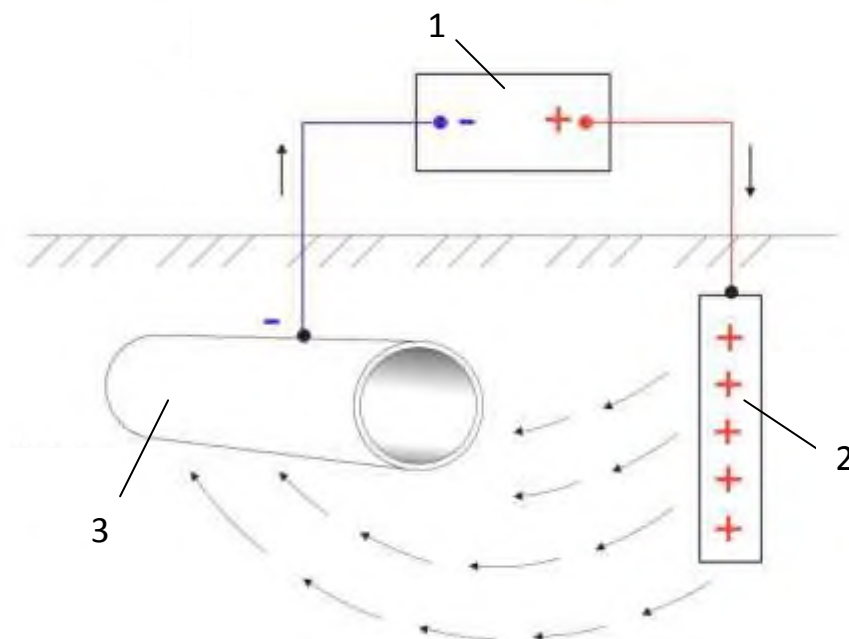


Рис. 2. Принципова схема катодного захисту:

1 – катодна станція (джерело струму); 2 – анодний електрод; 3 – трубопровід

Пристрій катодної станції типу ОПС та її функціонально-технологічна схема наведена на рис. 3.

Щоб уникнути відшарування захисного покриття, величина максимального захисного потенціалу не повинна перевищувати для сталі з антикорозійним покриттям – 1,22 В і з частково пошкодженим покриттям – 1,52 В [5].

Експериментальні проектні дослідження проводилися на території тваринницького комплексу навчально-дослідного господарства «Ворзель» у Київській області. Вихідними даними для розрахунку катодного захисту є: питомий електричний опір ґрунту; генеральний план місцевості з нанесенням споруд, які підлягають захисту; діаметри трубопроводів: 10, 20, 32, 40, 75 мм; довжина трубопроводів: 10 мм – 139 м; 20 мм – 248 м; 32 мм – 124 м; 40 мм – 92 м; 75 мм – 1119 м; матеріал труб – сталь. Розрахунок катодного захисту включав у себе визначення наступних параметрів: захисної зони установки катодного захисту; необхідну кількість катодних установок; захисний струм установки катодного захисту; вихідної напруги та потужності установок катодного захисту.

Необхідна кількість катодних установок розраховується за формулою:

$$n_K = K_E \cdot \frac{L_\Gamma}{l_K}, \quad (1)$$

де n – необхідна кількість катодних установок, шт.;

K – коефіцієнт екранування. Оскільки господарство знаходиться за межами смт Ворзель, то приймаємо $K_E = 1,4$; L_T – загальна довжина трубопроводу, м;

l_K – захисна зона катодної установки, м;

Захисна зона установки катодного захисту визначається за формулою

$$l_K = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \Delta U_3}{\pi \cdot d_R \cdot J_S \cdot r_T}}. \quad (2)$$

Результати досліджень та їх обговорення. У результаті дослідницьких проектних робіт визначено: захисну зону підземних трубопроводів з діаметрами труб і кількість катодних станцій (див. таблицю).

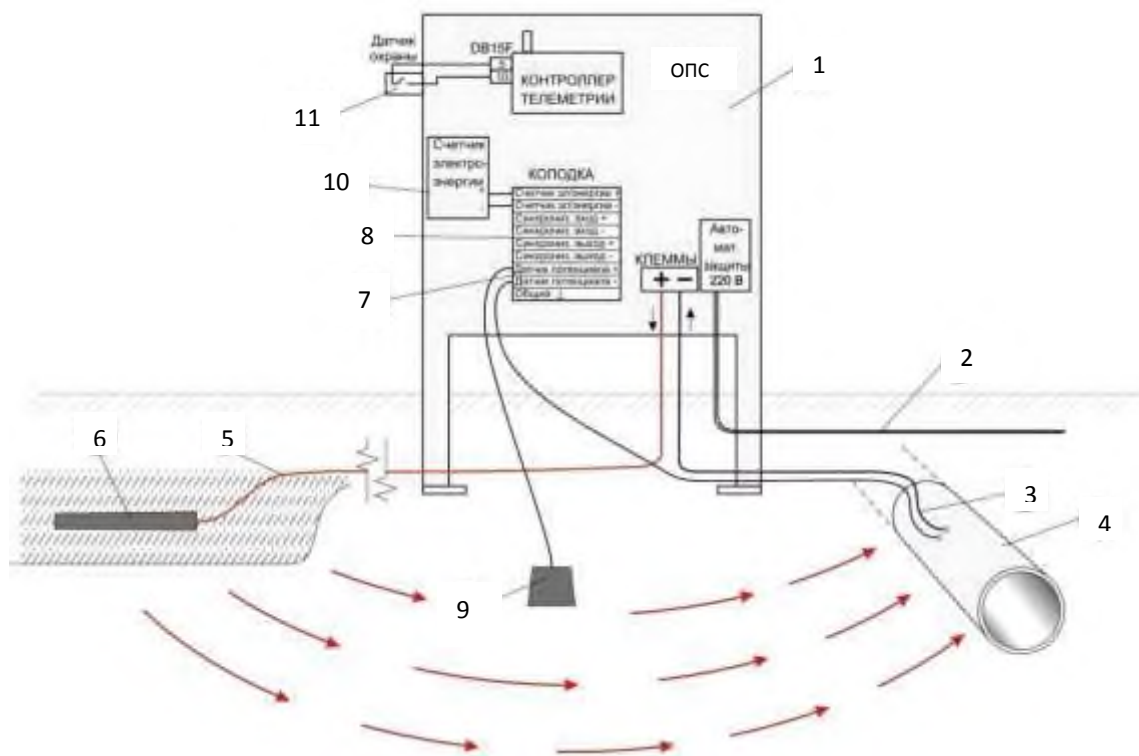


Рис. 3. Пристрій і функціонально-технологічна схема катодної станції типу ОПС:

1 – пристрій ОПС-25-24 У1; 2 – потужноструміві під'єднання 220 В; 3 – підведення захисного струму (мінус); 4 – трубопровід, який захищається; 5 – анодний кабель; 6 – анодний заземлювач; 7 – підключення датчика потенціалу; 8 – синхронізація приладів; 9 – мідно-сульфатний електрод рівняння; 10 – лічильник електроенергії з імпульсним виходом; 11 датчик охорони.

На підставі розрахунків вибрано одну катодну станцію ОПС 25-24 У1, захисний струм якої становить 12,5 А, вихідна напруга – 48 В і потужність 600 Вт. Кількість встановлених анодів – 15 шт., вагою 16,1 кг, що представляє собою чавунні труби завдовжки 2 м і діаметром 114 мм, розташовані рівномірно уздовж траси трубопроводу.

Значення розрахунку катодного захисту трубопроводів

Діаметр, мм	10	20	32	40	75
L_{Γ} , м	139	248	124	92	1119
l_K , м	3256	2302	1820	1628	1405
n_K	0,06	0,149	0,096	0,079	1,11

Висновки і перспективи. На основі експериментальних досліджень встановлено, що питомий електричний опір становить 12 Ом·м і це відповідає підвищеній агресивності ґрунту на території тваринницького комплексу в підземних металевих спорудах (систем водопостачання). Також встановлено, що для загальної довжини трубопроводів 1722 м достатньо однієї катодної станції потужністю 600 Вт.

Список літератури

1. Гришин А. П. Создание технических систем управляемого водопользования в сельском хозяйстве : автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра техн. наук / А. П. Гришин. – М., 2011. – 47 с.
2. ВСН 214-82 Сборник инструкций по защите от коррозии – М., Минмонтажспецстрой, ПИ Проектхимзащита, 1982. – 102 с.
3. Катодная защита от коррозии. Принцип действия, основные понятия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mypractic.ru/katodnaya-zashhita-ot-korrozii.html>
4. Гулько Т. В. Газификация и газоснабжение сельского хозяйства / Гулько Т. В., Драганов Б. Х., Шишко Г. Г. – М. : Фермер, 1994. – 319 с.
5. Притула В. А. Защита заводских подземных трубопроводов от коррозии / В. А. Притула. – М. : Metallurgizdat, 1961. – 385 с.

References

1. Grishin, A. P. (2011). Sozdaniye tekhnicheskikh sistem upravlyayemogo vodopol'zovaniya v sel'skom khozyaystve [Creation of technical systems for managed water use in agriculture]. Moscow: avtoref. dis. doctor, 47.
2. VSN 214-82. (1982). Sbornik instruktsiy po zashchite ot korrozii [Collection of instructions for corrosion protection]. Moscow: Minmontazhspestroy, PI Proyeektkhimzashchita, 102.
3. Katodnaya zashchita ot korrozii. Printsip deystviya, osnovnyye ponyatiya [Cathodic corrosion protection. Principle of operation, basic concepts]. Available at: mypractic.ru/katodnaya-zashhita-ot-korrozii.html.
4. Gulko, T. V. (1994). Gazifikatsiya i gazosnabzheniye sel'skogo khozyaystva [Gasification and gas supply of agriculture]. Moscow: Fermer, 319.
5. Pritula, V. A. (1961). Zashchita zavodskikh podzemnykh truboprovodov ot korrozii [Protection of factory underground pipelines against corrosion]. Moscow: Metallurgizdat, 385.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ И КОЛИЧЕСТВА КАТОДНЫХ СТАНЦИЙ И ИХ ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ

**В. Е. Василенков,
Д. В. Топалов**

Аннотация. Влияние окружающей среды приводит к коррозионным повреждениям трубопроводов. Чтобы предотвратить эти повреждения, нужно вовремя и в соответствующих местах налаживать противокоррозионную защиту.

Цель исследования – защитить подземные трубопроводы в системах водоснабжения на животноводческих комплексах и тем самым продлить ресурс их использования за счет определения мощности и количества катодных станций и их защитной зоны. Теоретическая и экспериментальная составляющая исследований активной защиты трубопроводов на животноводческих комплексах осуществлялась на основе принципиальной схемы устройства катодных станций и расчета электрохимической защиты подземных сооружений с определением мощности, количества катодных станций и их защитной зоны на территории животноводческого комплекса в опытном хозяйстве Ворзель Киевской области.

Установлено, что для общей длины трубопроводов 1722 м достаточно одной катодной станции мощностью 600 Вт, что должно обеспечить повышение экономической эффективности системы водоснабжения на 10–15 % и продлить срок ее эксплуатации.

Ключевые слова: движение жидкости, катодная станция, электрохимическая защита, подземные трубопроводы, эксплуатация

DETERMINATION OF POWER AND QUANTITY OF CATHODE STATIONS AND THEIR PROTECTIVE ZONE

V. Vasilenkov,
D. Topalov

Abstract. The influence of the environment leads to corrosion damage to pipelines. To prevent these damages, it is necessary to establish an anti-corrosion protection on time and in appropriate places.

The purpose of the work is to protect underground pipelines in water supply systems at livestock complexes and thereby prolong the resource of their use by determining the capacity and number of cathodic stations and their protective zone. The theoretical and experimental component of research on the active protection of pipelines on livestock breeding complexes was carried out on the basis of the fundamental oyster of cathodic stations and the calculation of the electrochemical protection of underground structures with the determination of the capacity, the number of cathodic stations and their protective zone on the territory of the livestock complex in the experimental farm of Vorzel in the Kiev region.

It is established that for a total length of 1,722 m, one cathode station with a capacity of 600 W is sufficient. That should ensure an increase in the economic efficiency of the water supply system by 10–15 % and prolong the period of its operation.

Keywords: fluid motion, cathodic station, electrochemical protection, underground pipelines, operation

**НАНОРОЗМІРНІ ВУГЛЕЦЕВІ МАТЕРІАЛИ
ЯК АДСОРБЕРИ ШКІДЛИВИХ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ
НЕОРГАНІЧНИХ ОКСИДНИХ СПОЛУК**

В. В. БОЙКО, кандидат фізико-математичних наук, доцент
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**

E-mail: boyko_v@nubip.edu.ua

С. Г. НЕДІЛЬКО, доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

E-mail: SNedilko@univ.kiev.ua

В. І. БОРИСЮК, аспірант

E-mail: borysyukviktor@gmail.com

Ю. А. ХИЖНИЙ, кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

E-mail: hizhnyi@univ.kiev.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Анотація. *Методом теоретичного моделювання проаналізовано взаємодію між вуглецевими нанотрубками (ВНТ) конфігурації (3,3) і (5,5) та молекулами двох типів: лінійні двоатомні молекули галогенідів водню $HX = HF, HCl, HBr$ і молекулярні хроматні оксианіони CrO_4^{2-} . Подібний теоретичний прогноз має важливе практичне значення, оскільки дає змогу оцінити перспективи використання вуглецевих нанотрубок для видалення зазначених молекул із газового середовища і очистки, тим самим, довкілля, забрудненого промисловими відходами.*

Розрахунки проводилися за допомогою програмного пакета «Gaussian 03» із використанням теорії функціоналу густини за базисних наборів cc-pVDZ (для атомів хрому та кисню) та 6-31G (для решти атомів) із нелокальним кореляційним функціоналом B3LYP.*

Результати розрахунків свідчать про досить низькі значення енергій зв'язку між адсорбованими молекулами HX ($X = F, Cl, Br$) та нелегованими ВНТ, у межах від -0.07 до -0.2 еВ, тоді як легування бором дозволяє посилити зв'язок до значень -2,13 еВ (система $VNT(3,3)-B-HBr$).

Дослідження взаємодії молекулярного аніона CrO_4^{2-} із ВНТ обох типів показали, що легування бором не сприяє зміцненню адсорбції молекул. Вплив домішок азоту, навпаки, є позитивним і призводить до зростання енергії зв'язку (у середньому на -3,6 еВ) порівняно з нелегованими системами $VNT-CrO_4^{2-}$.

Одержані дані сприяють розумінню механізмів адсорбції молекул поверхнею вуглецевих нанотрубок та свідчать про можливість практичного використання останніх для очистки матеріалів та відходів промислового виробництва від шкідливих для людини

забруднень, якими є галогеніди водню та сполуки, що містять шестивалентний хром.

Ключові слова: вуглець, нанотрубка, адсорбція

Актуальність. Вуглецеві нанотрубки – це протяжні циліндричні структури діаметром від одного до декількох десятків нанометрів, утворені гексагональними кільцями атомів вуглецю. Їх довжина значно перевищує діаметр і може бути в межах від мікрона до декількох сантиметрів. Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) можна розглядати як такі, що утворені однією або кількома, згорнутими в трубку, графітовими площинами. Зазвичай, ВНТ є відкритим тільки з одного кінця, а на іншому вони закінчуються напівсферичною голівкою.

Згадані структура і морфологія ВНТ зумовлюють їх унікальні фізичні властивості та можливості різнопланового застосування. Зокрема, можна зазначити такі: у механіці (надміцні композиційні нитки); у мікроелектроніці (транзистори, нанодроти, провідні поверхні); у капілярній техніці паливні елементи (капсули для активних молекул, металів і газів); сенсори молекул, атомів та іонів у газовому середовищі.

Вуглецеві матеріали, і серед них ВНТ, використовуються і як сорбенти для вирішення різноманітних енергетичних та екологічних питань. У цьому напрямі досліджень ВНТ привертають особливу увагу завдяки їх пористій структурі та високій питомій поверхні, що досягає 2000 м²/г. Зокрема, ефективна сорбція водню поверхнею ВНТ сприяє активній розробці на них водневих паливних елементів. Як гарний сорбент, ВНТ здатні адсорбувати різноманітні шкідливі забруднення довкілля – із повітря та води, а також із промислових газоподібних та рідких відходів. Отже, завдяки адсорбційним властивостям, ВНТ можна використовувати у промисловому масштабі для видалення небажаних компонентів та очищення матеріалів.

Вивченню механізмів і характеристик адсорбції молекулярних речовин поверхнею ВНТ присвячено значну кількість робіт, причому, як експериментального, так і технологічного плану. Разом із тим, теоретичні дослідження умов і механізмів сорбції різних сполук поверхнею ВНТ є також важливими, адже їх результати дають змогу прогнозувати не тільки характеристики, але й саму можливість адсорбції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогодні виконано значну кількість теоретичних досліджень адсорбції молекул та молекулярних радикалів поверхнею ВНТ. Значну увагу в таких дослідженнях було приділено дослідженням ВНТ, легованих атомами бору або ж азоту, адже було з'ясовано, що така модифікація підвищує здатність ВНТ адсорбувати молекули газів [1, 2].

Мета дослідження. Для перевірки та підтвердження згаданих вище теоретичних передбачень у цій роботі ми провели теоретичне моделювання адсорбції на поверхні ВНТ молекул двох типів різної конфігурації та заряду, а саме: нейтральних двоатомних молекул HX , де $X = F, Cl, Br$, та двозарядних п'ятиатомних молекулярних аніонів CrO_4^{2-} .

Галогеніди водню, HX ($X = F, Cl, Br$) широко використовуються у промисловості як реагенти або ж як побічні продукти. Водночас, гази цих сполук є дуже токсичними і шкідливими для біологічних організмів, навіть за їх низьких концентрацій [3, 4].

Видалення молекул, які містять катіони хрому, Cr^{6+} , також є важливою задачею, оскільки вони є складовими різноманітних матеріалів, що широко використовуються у промислових технологіях, а отже, завжди існує загроза забруднення ними довкілля. ВНТ, як адсорбери Cr^{6+} -сполук, уже досліджувалися протягом останнього десятиліття і було показано ефективність такого використання [5, 6]. Однак, за значної кількості експериментальних досліджень, механізм адсорбції в системі «ВНТ – (Cr^{6+} -молекула)», де кривизна поверхні нанотрубки відіграє не останню роль, як правило, залишається нез'ясованим. Ця наша робота мала на меті певним чином наблизитися до висвітлення згаданих питань.

Матеріали і методи дослідження. Вуглецеві нанотрубки в розрахунках моделювалися, як молекулярні кластери, що складаються з 78 та 130 атомів вуглецю для ВНТ (3,3) та ВНТ (5,5), відповідно. Для того, щоб компенсувати обірвані $C - C$ зв'язки, 12/20 (ВНТ(3,3) / ВНТ(5,3)) крайніх атомів вуглецю заміщені в кластері атомами водню. Тому остаточна формула кластерів виглядає як $C_{66}H_{12}/C_{110}H_{20}$. Подібне моделювання обірваних зв'язків широко використовується в розрахунках при моделюванні ВНТ з молекулярними кластерами [7].

Для моделювання домішкових систем один атом вуглецю в центральному вуглецевому «кільці» кластера замінювали на атом бору або ж азоту.

Геометрична оптимізація починалася з позиції, коли молекули HX ($X = F, Cl, Br$) розташовувалися на відстані 1.5 Å від поверхні ВНТ, зв'язок $H - X$ було зорієнтовано паралельно до вісі ВНТ та найближче до атома бору або азоту.

Перед геометричною оптимізацією молекулярного аніона CrO_4^{2-} відстань між ним та поверхнею ВНТ становила 1,8 Å у безпосередній близькості від атомів бору або ж азоту.

Енергії зв'язку системи «ВНТ-молекула» обчислювалися згідно з виразом:

$$E_b = E_{B(N)-\text{ВНТ-Mol}} - E_{B(N)-\text{ВНТ}} - E_{\text{Mol}}.$$

Очевидно, що стабільній конфігурації системи, тобто випадку адсорбції молекули на поверхні ВНТ, відповідає від'ємне значення E_b .

Зміну заряду адсорбованих молекул, Δq , розраховували як різницю їх зарядів у «вільному»: 0 та -2 для молекул HX та CrO_4^{2-} , відповідно, та адсорбованому стані: q . Останній отримували як алгебраїчну суму зарядів атомів молекул: H і X ($q_b = q_H + q_X$) та CrO_4^{2-} ($q = q_{O_1} + q_{O_2} + q_{O_3} + q_{O_4} + q_{Cr}$) за Маллікеном. Негативне значення заряду різниці заряду для адсорбату означає передачу негативного електричного заряду (електронів) від ВНТ до молекули.

Просторові розподіли хвильових функцій розраховані для молекулярних орбіталей (МО), що були обраними як найвищі заповнені (НОМО) для кластерів ВНТ (3,3) і НОМО-1 для ВНТ (5,5).

При розрахунках домішкових кластерів до системи «кластер ВНТ + адсорбат» «вносилися» додаткові заряди: $-1e$ та $1e$, відповідно, для випадку домішки бору та азоту. Таким додаванням заряду до кластера було змодельовано локальну компенсацію недостачі (надлишку) заряду одного електрона, що виникає при неізовалентному заміщенні атома вуглецю атомами бору та азоту, відповідно.

Загальний заряд системи «нелегований кластер ВНТ + аніон CrO_4^{2-} » покладался в розрахунках таким, що дорівнює $-2e$, оскільки нелегована ВНТ вважається зарядово-нейтральною. Водночас, додаткові заряди, $-3e$ та $-1e$ були присвоєні в розрахунках системам, до складу яких входять ВНТ, леговані бором та азотом, відповідно.

Довжина реальних нанотрубок, як правило, перевищує їхній діаметр на декілька порядків і вплив бічних поверхонь на властивості переважаючої частини поверхні ВНТ, очевидно, має бути несуттєвим. Звідси впливає очевидна вимога щодо мінімальної довжини кластерів: кластер, який моделює в розрахунках реальну ВНТ, повинен бути достатньо довгим, щоб вплив крайніх частин на центральну частину ВНТ, де розташовані домішки бору (азоту) та адсорбати НХ, був малим. Для перевірки цього критерію, у нашому випадку, було проведено додаткові геометрично-оптимізовані розрахунки нелегованих кластерів ВНТ (3,3) та ВНТ (5,5) (рис. 1).

Як свідчать ці додаткові розрахунки, додавання ще двох «кілець» вуглецю до обох сторін кластерів ВНТ(3,3) та ВНТ(5,5) несуттєво (в межах $\sim 0,8\%$ від величини) змінює відстань C—C зв'язків у центральній області кластерів.

Геометрично-оптимізовані розрахунки проводилися за допомогою програмного пакета «Gaussian 03» з використанням DFT (теорії функціоналу густини) [8] за базисних наборів cc-pVDZ (для атомів хрому та кисню) та 6-31G* (для решти атомів) із нелокальним кореляційним функціоналом B3LYP. При розрахунках використовувався базисний набір та наближення для обмінно-кореляційного потенціалу, які є типовими для розрахункових досліджень адсорбції молекул на поверхні ВНТ, що проводилися впродовж останніх років [7].

Результати дослідження та їх обговорення. Для всіх розглянутих випадків адсорбції на поверхні нелегованих кластерів, "вісь" молекули НХ займає положення практично перпендикулярне вуглецевій поверхні (рис. 2).

Наші розрахунки свідчать про відносно низькі значення енергій зв'язку, E_b , між адсорбованими молекулами НХ ($X = F, Cl, Br$) та нелегованими ВНТ: у межах від -0.07 до -0.2 еВ. Найбільшим значенням величини E_b характеризується система CNT (3,3) - HF ($E_b = 0,2eV$) за заряду адсорбату $q_b = 0,038e$. Водночас, найбільшим зміщенням заряду до адсорбату, $q_b = 0,078e$, характеризується система CNT (3,3)-HCl, тоді як енергія зв'язку тут є нижчою: $E_b = -0,14eV$. Із порівняння цих даних можемо зробити висновок, що міцніший зв'язок (більше від значення енергії зв'язку) зумовлений характером електронних орбіталей, а не кулонівською взаємодією молекули із вуглецевою нанотрубкою. Зазначене підтверджує нижченаведений на рис. 2а

розподіл електронних хвильових функцій для цих випадків, порівняно з таким самим розподілом для ВНТ (3,3) (CNT (3,3)).

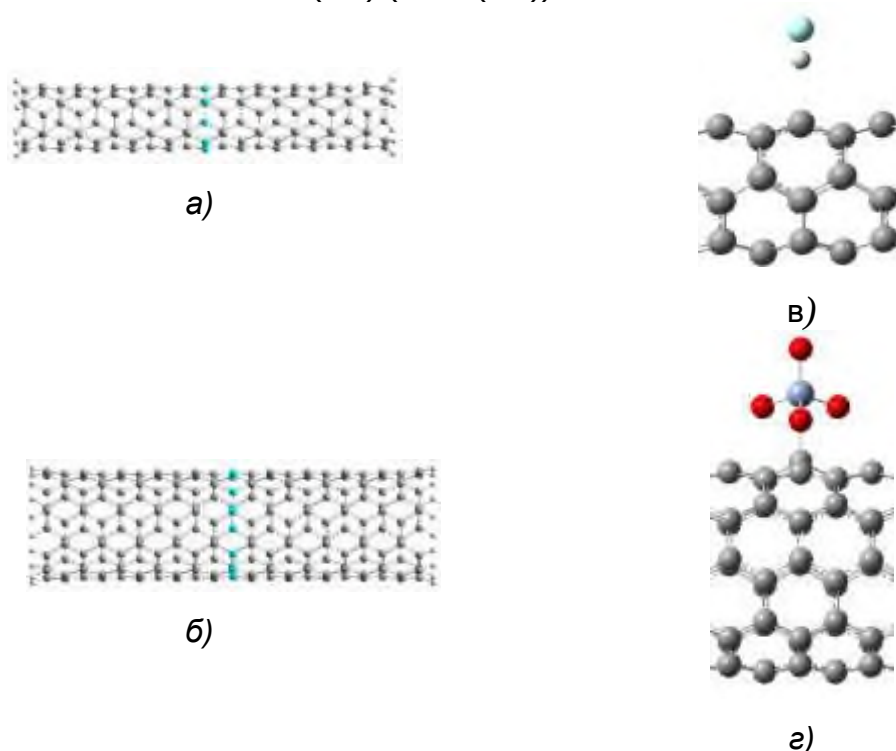


Рис. 1. Кластери нелегованих ВНТ (3,3) (а) і ВНТ (5,5) (б) за типових положень адсорбованих НХ (в), та CrO_4^{2-} (г) на поверхні ВНТ із геометрично оптимізованими положеннями атомів вуглецю

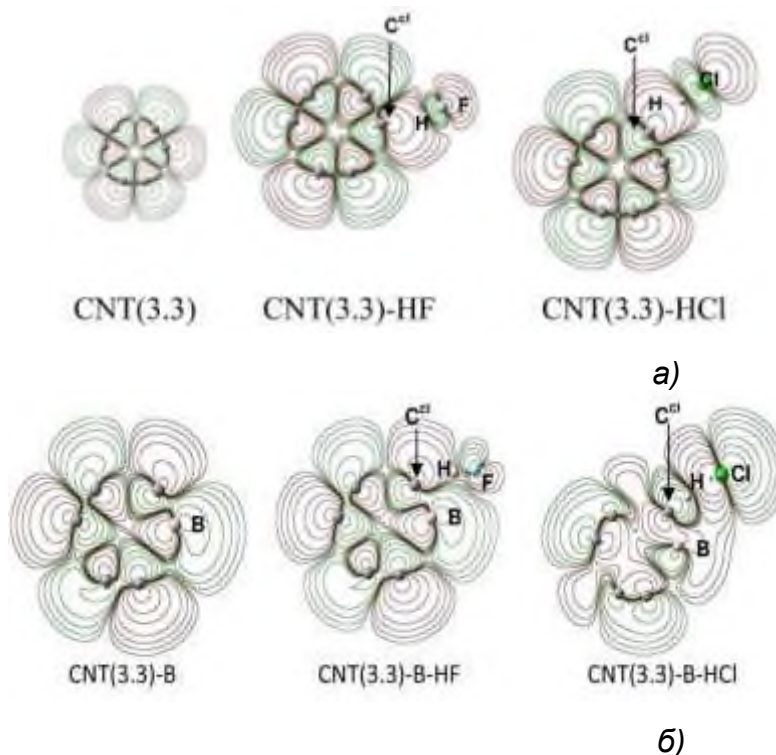


Рис. 2. Просторовий розподіл хвильових функцій для систем CNT (3,3)-HX (а) та CNT (3,3)-B-HX (X=F, Cl) (б)

Як видно з рис. 2а, адсорбовані молекули НХ лише дещо збурюють хвильові функції нелегованих кластерів ВНТ (3,3), контури яких відповідають антизв'язуючим рртп* зв'язкам між атомами вуглецю. Цей результат свідчить про незначну роль ковалентного зв'язку між молекулами НХ та нелегованими ВНТ.

ВНТ, леговані бором та азотом. Результати розрахунків щодо адсорбції молекул НХ на поверхні вуглецевих нанотрубок, легованих бором, ВНТ-В(CNT-B), показують зовсім іншу ситуацію порівняно з нелегованими трубками. Дійсно, енергії зв'язку між ВНТ-В та молекулами адсорбату знаходяться в межах від -0,14 до -2,13eV (випадок ВНТ-В-HBr), і ці значення є набагато вищими, ніж відповідні енергії зв'язку між молекулами НХ та нелегованими ВНТ.

В усіх розглянутих випадках адсорбції НХ на поверхні легованих бором ВНТ атом Н молекули адсорбату розташовується ближче до одного з атомів С нанотрубки, ніж до домішкового атому бору. Крім того, можна стверджувати, що в цих випадках адсорбції на легованих бором ВНТ між атомами вуглецю нанотрубки та Н – атомами адсорбату утворюються достатньо міцні ковалентні зв'язки.

Аналогічні розрахунки для ВНТ (3,3) та ВНТ (5,5), легованих азотом, показали що, розраховані значення енергії зв'язку є відносно малими (не перевищують -0,41 eV). Відносно малими також є заряди на адсорбатах (не перевищують |0,05| e). Хоча для деяких випадків (ВНТ (3,3) -N-HF, ВНТ (5,5)-N-HF, та ВНТ (5,5)-N-HBr) значення E_b потрапляють до діапазону енергій низького рівня водневого зв'язку, в усіх інших випадках адсорбції енергії зв'язку є типовими для Ван-дер-Ваальсівської взаємодії (енергія зв'язку в проміжку від -0,01 до -0,1 eV), тобто зв'язок молекули із ВНТ є слабким.

Таким чином, ми маємо підстави вважати, що розглянуті вуглецеві матеріали, леговані бором, можуть утворювати достатньо стійкі хімічні зв'язки з молекулами HCl та HBr.

Залежність енергії зв'язку між адсорбентом та ВНТ від типу легування, бор чи азот, спостерігається і для випадку молекули CrO_4^{2-} . Тут розрахунки показали зниження енергії зв'язку (у середньому на $\sim -2,1$ eV) для конфігурацій, легованих бором, та збільшення енергії зв'язку (у середньому на $\sim -3,6$ eV) для конфігурацій, легованих азотом, порівняно з нелегованими конфігураціями. Так, розраховані значення енергії зв'язку між ВНТ та молекулами хроматного аніона знаходяться в межах від -1,77 до -2,74 eV або ж у межах від -7,12 до -7,85 eV для випадків ВНТ-В та ВНТ-N, відповідно. Самі ж значення енергії зв'язку є типовими для ковалентних зв'язків.

Висновки і перспективи. Виконані теоретичні дослідження взаємодії молекул НХ ($X = F, Cl, Br$) та CrO_4^{2-} із поверхнею вуглецевих нанотрубок ВНТ (3,3), ВНТ (5,5), як нелегованих, так і легованих бором, В, або ж азотом, N, дають змогу оцінити характеристики адсорбції і прогнозувати утворення стійких зв'язків між зазначеними молекулами та вуглецевими нанотрубками в певних випадках.

Так, лінійні двоатомні молекули НХ ($X = F, Cl, Br$) утворюють відносно міцні зв'язки із нанотрубками конфігурації (3,3), легованими

бором. Найбільш сильним зв'язком із енергією зв'язку $E_b = -2,13\text{eV}$ характеризується система ВНТ (3,3)-В-НВr.

Нелеговані або ж леговані азотом вуглецеві наноструктури не є привабливими для їх використання як адсорберів молекул галогенідів водню, тоді як ВНТ леговані азотом, навпаки, найкращим чином мають ув'язувати молекулярні аніони CrO_4^{2-} .

Одержані результати підтверджують раніше отримані дані щодо перспективності легування вуглецевих нанотрубок бором або ж азотом з метою покращення їх адсорбційних властивостей щодо нейтральних та заряджених молекул. Разом із тим, результати теоретичного моделювання адсорбції молекул галогенідів водню та молекулярних аніонів CrO_4^{2-} потребують експериментального підтвердження в майбутньому.

Список літератури

1. Bai, L., & Zhou, Z. (2007). Computational study of B-or N-doped single-walled carbon nanotubes as NH_3 and NO_2 sensors. *Carbon*, 45 (10), 2105–2110.
2. An, W., & Turner, C. H. (2009). Electronic structure calculations of gas adsorption on boron-doped carbon nanotubes sensitized with tungsten. *Chemical Physics Letters*, 482 (4–6), 274–280.
3. Wexler, P., Anderson, B., Peyster, A., Gad, S.C., Hakkinen, P.J. B., Kamrin, M., Locey, B., Mehendale, H. M., Pope, C., Shugart, L. (2005). *Encyclopedia of Toxicology*, 2nd ed., Oxford, United Kingdom: Academic Press.
4. Karama, J. P. B., Bere, A., Lemonon, J., Daho, T., Disa, A., Rogaume, Y., & Koulidiati, J. (2013). Modeling the emission of hydrogen chloride and free chlorine from the thermal treatment of polyvinyl chloride-(PVC-) based plastic materials. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 101, 209–214.
5. Gupta, V. K., Moradi, O., Tyagi, I., Agarwal, S., Sadegh, H., Shahryari-Ghoshekandi, R, et al. Study on theremoval of heavy metal ions from industry waste by carbon nanotubes: Effect of the surfacemodification: a review. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 2016; 46:93–118.
6. Jung, C., Heo, J., Han, J., Her, N., Lee, S-J, Oh, J., et al. Hexavalent chromium removal by variousadsorbents: Powdered activated carbon, chitosan, and single/multi-walled carbon nanotubes. *Sep. Purif. Technol*. 2013; 106:63–71.
7. Hizhnyi, Y., Nedilko, S., Borysiuk, V., & Shyichuk, A. (2017). Ab Initio Computational Study of Chromate Molecular Anion Adsorption on the Surfaces of Pristine and B-or N-Doped Carbon Nanotubes and Graphene. *Nanoscalere search letters*, 12 (1), 71.
8. Gaussian 03 / M. J. Frisch [et al.], Wallingford, CT: Gaussian, Inc., 2003.

НАНОРАЗМЕРНЫЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ КАК АДсорБЕРЫ ВРЕДНЫХ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. В. Бойко,
С. Г. Недилько
В. И. Борисюк,
Ю. А. Хижный

Аннотация. Методом теоретического моделирования проанализировано взаимодействие между углеродными нанотрубками (УНТ) конфигурации (3,3) и (5,5) и молекулами двух типов: линейными двухатомными молекулами галогенидов водорода $HX=HF$, HCl , HBr и молекулярными хроматными оксианионами CrO_4^{2-} . Подобный теоретический прогноз имеет важное практическое значение, так как позволяет оценить перспективы использования углеродных нанотрубок для удаления указанных молекул с газовой среды и очистки тем самым окружающей среды, загрязненной промышленными отходами.

Расчеты проводились с помощью программного пакета «Gaussian 03» с использованием теории функционала плотности по базисным наборам $ss\text{-}pVDZ$ (для атомов хрома и кислорода) и $6\text{-}31G^*$ (для остальных атомов) с нелокальным корреляционным функционалом $B3LYP$.

Результаты расчетов показали достаточно низкие значения энергии связи между адсорбированными молекулами HX ($X=F$, Cl , Br) и нелегированной УНТ, в пределах от -0.07 до -0.2 эВ, тогда как легирование бором позволяет усилить связь до значений $-2,13$ эВ (система BHT (3,3) - $B\text{-}HBr$).

Исследование взаимодействия молекулярного аниона CrO_4^{2-} с УНТ обоих типов показало, что легирование бором не способствует укреплению адсорбции молекул. Влияние примесей азота, наоборот, является положительным и приводит к росту энергии связи (в среднем на $-3,6$ эВ) по сравнению с нелегированными системами $BHT\text{-}CrO_4^{2-}$.

Полученные данные способствуют пониманию механизмов адсорбции молекул поверхностью углеродных нанотрубок и указывают на возможность практического использования последних для очистки материалов и отходов промышленного производства от вредных для человека загрязнений, таких как галогениды водорода и соединения, содержащие шестивалентный хром.

Ключевые слова: углерод, нанотрубка, адсорбция

NANOSIZE CARBONACEOUS MATERIALS AS ADSORBERS OF INORGANIC OXIDES HARMFUL TO THE ENVIRONMENT

**V. Boyko,
S. Nedilko,
V. Borisyuk,
Y. Khizhny**

Abstract. The interaction between carbon nanotubes (CNT) configurations (3,3) and (5,5) and molecules of two types: linear diatomic molecules of hydrogen halides $HX = HF$, HCl , HBr and molecular chromatin oxyanions CrO_4^{2-} was analyzed by the method of theoretical modeling. Such a theoretical forecast is of great practical importance, since it allows us to evaluate the prospects of using carbon nanotubes to remove these molecules from the gaseous medium and thereby purify the environment contaminated with industrial waste.

The calculations were carried out using the Gaussian 03 software package using the density functional theory for the basis sets cc-pVDZ (for chromium and oxygen atoms) and 6-31G * (for the remaining atoms) with the non-local correlation functional B3LYP.

The results of the calculations showed fairly low values of the binding energy between adsorbed HX molecules ($X = F, Cl, Br$) and unalloyed CNT, in the range from -0.07 to -0.2 eV, while boron doping makes it possible to strengthen the bond to values of 2.13 eV (the BHT system (3,3) -B-HBr).

Investigation of the interaction of the molecular anion CrO_4^{2-} with CNTs of both types has shown that doping with boron does not promote the adsorption of molecules. The influence of nitrogen impurities, on the other hand, is positive and leads to an increase in the binding energy (on average by -3.6 eV) in comparison with undoped systems of BHT- CrO_4^{2-} .

The data obtained help to understand the mechanisms of adsorption of molecules by the surface of carbon nanotubes and indicate the possibility of practical use of the latter for the purification of materials and industrial wastes from harmful contaminants such as hydrogen halides and compounds containing hexavalent chromium.

Keywords: carbon, nanotube, adsorption

УДК 631.544

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ СВІТЛОКУЛЬТУРИ РОСЛИН У СПОРУДАХ ЗАХИЩЕНОГО ҐРУНТУ

Я. М. ЛУЦАК, інженер

Прилуцький агротехнічний коледж

E-mail: ya.lutsak@ua

Анотація. При вирощуванні рослин у середовищі захищеного ґрунту важливим фактором, що впливає на формування якості та врожайності культур, є опромінення, особливо в пори року, коли сонячного світла недостатньо. Тому використання штучного досвічування є необхідним. Світлові прилади, які при цьому використовуються, повинні задовольняти умови якісного росту рослин та формування врожаю, при цьому мати низьке споживання електроенергії та відповідні фотобіологічні характеристики.

Розробка енергоефективних режимів опромінення – один із перспективних напрямів зниження витрат електроенергії у світлокультурі захищеного ґрунту. Існуючий стан проблеми на основі аналізу публікацій щодо біоелектричної активності рослин показує важливий вплив ритмічних змін на фізіологічний стан рослин, тому питання енергозбереження при електроопроміненні овочевих

© Я. М. Луцак, 2018

культур може бути вирішено зокрема імпульсним або періодичним опроміненням рослин у спорудах захищеного ґрунту.

Ключові слова: *рослинництво, режими освітлення, досвічування, теплиці, ефективність, якість урожаю*

Актуальність. Кількість і якість овочів або рослин, що вирощуються в теплицях за інших однакових умов, повністю залежать від мікроклімату: температури повітря, вологості й вмісту вуглекислого газу в приміщенні. При ньому параметри мікроклімату взаємопов'язані: вологість повітря, наприклад, залежить від температури, температуру повітря треба підтримувати залежно від опромінення приміщення, щоб рослини повністю використали світлове випромінювання і т. д.

Основним напрямом підвищення інтенсифікації тепличного розсадництва є перехід до енергозберігаючих технологій виробництва. У цьому плані велике значення надається поліпшенню теплоізоляційних якостей загорожі теплиць за рахунок герметизації, подвійного покриття плівкою, склом; використання нових матеріалів для покриття зимових і плівкових теплиць із підвищеними фізико-механічними властивостями і більш подовженим строком служби; застосування теплоізоляцій екранів, що трансформуються і на 30–50% економлять тепло, а за високої сонячної інсоляції попереджують перегрівання; застосування автоматичних систем забезпечення заданих режимів мікроклімату [1, 2].

Пріоритетним у ресурсозабезпеченні буде вдосконалення конструкцій теплиць щодо підвищення світлопроникності споруд на 20–30%, максимальне використання засобів механізації, зменшення перегрівання рослин, підвищення надійності закріплення країв плівки для заданої вітростійкості за одночасного підвищення продуктивності праці на покритті теплиць плівкою, зменшення та оптимізації несучих конструкцій і теплообміну у робочій зоні.

Сучасна світлокультура рослин, як новий високоінтенсивний тип сільськогосподарського виробництва, являє собою широку комплексну проблему, успішне вирішення якої пов'язано з участю різних спеціалістів – фізіологів рослин і світлотехніків, агрономів і електротехніків.

Розрахунки показують, що витрати електроенергії в оптичних технологіях в аграрному секторі економіки становлять 15–20% від загальних витрат у галузі. Це надає особливої актуальності проблемі енергозбереження в технологіях опромінення, важливе місце серед яких займає вирощування рослин у закритому ґрунті [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існуючий стан проблеми, на основі аналізу публікацій з біоелектричної активності рослин, показує важливий вплив ритмічних змін на фізіологічний стан рослин, тому питання енергозбереження при електроопроміненні овочевих культур може бути вирішено зокрема імпульсним або періодичним опроміненням рослин у спорудах захищеного ґрунту [2, 4].

Аналіз цих питань дав змогу встановити, що зниження енерговитрат при електроопроміненні рослин в умовах захищеного ґрунту можна

забезпечити двома напрямками: максимальним використанням керуючих впливів і оптимізацією енергетичних впливів.

Вивчення можливості максимального використання керуючих впливів дало змогу зробити висновок, що біоелектричні явища відіграють важливу роль у життєдіяльності рослинних організмів. Тканини рослин, що реагують на світловий вплив зміною своїх електричних потенціалів, тісно корегують з основними фізіологічними характеристиками рослинного організму.

Ритмічна подача світла, за певних умов, має керуючий вплив на морфофізіологічний стан рослинного організму. Проте ці умови дуже суперечливі й підлягають детальному вивченню [3].

Мета дослідження – аналіз сучасного стану світлокультури рослин, обґрунтування перспективних шляхів розвитку фотосинтезуючих штучних джерел оптичного випромінювання для рослинництва та їх впровадження у спорудах захищеного ґрунту.

Матеріали і методи дослідження. Сучасні досягнення біологічних наук значною мірою змінили наше ставлення до впливу електромагнітного спектра на процеси, що проходять у рослинах. Так, досліді показали, що окрім видимої частини спектра інтенсивність багатьох фізіологічних процесів, формування всієї рослини, а тобто і їх господарський врожай, значною мірою визначаються отриманням рослинним організмом як довгого ультрафіолетового (300–400 нм), так і короткого інфрачервоного (720–110 нм) опромінення.

Одним із методів підвищення використання рослинами випромінювання штучних джерел є створення спрямованих променевих потоків, що діють на рослини. При цьому потрібно правильно розрахувати систему опромінення рослин у теплиці з метою того, щоб опромінення групою розосереджених потужних світильників забезпечувало ефективне вирощування практично однаково сформованих рослин.

У природних умовах фізіологічно активне опромінення складається з прямої та розсіяної сонячної радіації. Прямою сонячною радіацією називається та частина сонячного випромінювання, яка доходить до поверхні землі у вигляді паралельних променів, що йдуть від сонця. Її інтенсивність опівдні влітку становить $1,37 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{хв}$ або 955 Вт/м^2 . Розсіяною називається та радіація, яка потрапляє на землю після відбивання та розсіювання її молекулами газів повітря, пилинками, краплями води і кристалами льоду, що знаходяться в атмосфері [9].

До сходу сонця на рослини потрапляє тільки розсіяна радіація. Потім, зі збільшенням висоти сонця над горизонтом, складова прямої радіації збільшується. А розсіяної – швидко зменшується.

Варто зазначити, що розсіяна радіація відіграє значну роль у житті рослин. Кількість годин, коли пряме сонячне випромінювання потрапляє на листя рослин, значно менше від загальної тривалості світлої частини доби. Крім того, пряма радіація використовується лише частиною зеленої маси – до листя, що знаходяться всередині крони, і в тіні вона не доходить.

Узимку, внаслідок низького положення сонця над горизонтом і великої хмарності, сумарне опромінення на поверхні землі опівдні на відкритій місцевості досягає лише 4–5 клк, що приблизно в 15 разів менше, ніж у ці самі години влітку. Ще менше променевої енергії взимку потрапляє на землю в ранкові години та після опівдня. Унаслідок відбиття й поглинання випромінювання елементами конструкції і склом, освітленість у теплицях зменшується приблизно вдвічі, порівняно з освітленістю на відкритій місцевості. Якщо ж теплиця має ще й брудне скло, то природне опромінення буде становити лише 1/3 від зовнішнього.

Таким чином, упродовж 4–5 місяців року природне опромінення всередині теплиць недостатнє для вирощування овочів. За вимогою до освітленості, яка зумовлює отримання сільськогосподарської продукції, огірки і томати належать до найбільш вимогливої до високої освітленості групи. Рослини цієї групи неможливо вирощувати без додаткового опромінення в період із жовтня до березня.

Важливе значення для рослин має довжина світлого періоду доби. Вирощувані рослини належать до рослин короткого дня, яким при переході до генеративного розвитку необхідний світлий період не більше, ніж 12 і не менше, ніж 8 годин на добу. Така довжина дня сприяє більш швидкому цвітінню й росту плодів.

Результати дослідження та їх обговорення. Основними факторами, що впливають на розвиток і ріст рослин є режим опромінення, ефективність засвоєння поживних речовин, вплив коливань температури і вологи.

Модель залежності росту рослин від характеристик режиму опромінення та інших головних факторів у загальному вигляді може бути подана у вигляді залежності:

$$\frac{dW}{dt} = g(T, I, P, V) \quad (1)$$

де W – маса, кг;

t – час, хв;

T – температура, $^{\circ}\text{C}$;

I – режим опромінення;

P – засвоєння оптичної енергії зеленою масою рослини;

V – вплив вологи.

Взаємодію рослини і світлового потоку можна показати на формулі:

$$I = I_0 \cdot e^{-kL}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт поглинання потоку випромінювання;

I_0 – густина світлового потоку Вт/м^2 , що падає на поверхню листка;

I – густина світлового потоку Вт/м^2 , що падає на поверхню в рослинному покриві на “глибину” L , причому L за величиною дорівнює індексу площі листків зеленої маси рослини.

Щоб охарактеризувати вплив енергії оптичного випромінювання на зелену масу рослин, на рис. 1 показано схему проникнення світлового

поток в зеленую массу растения та фактори, від яких буде залежати ефективність опромінення (інтенсивність росту).

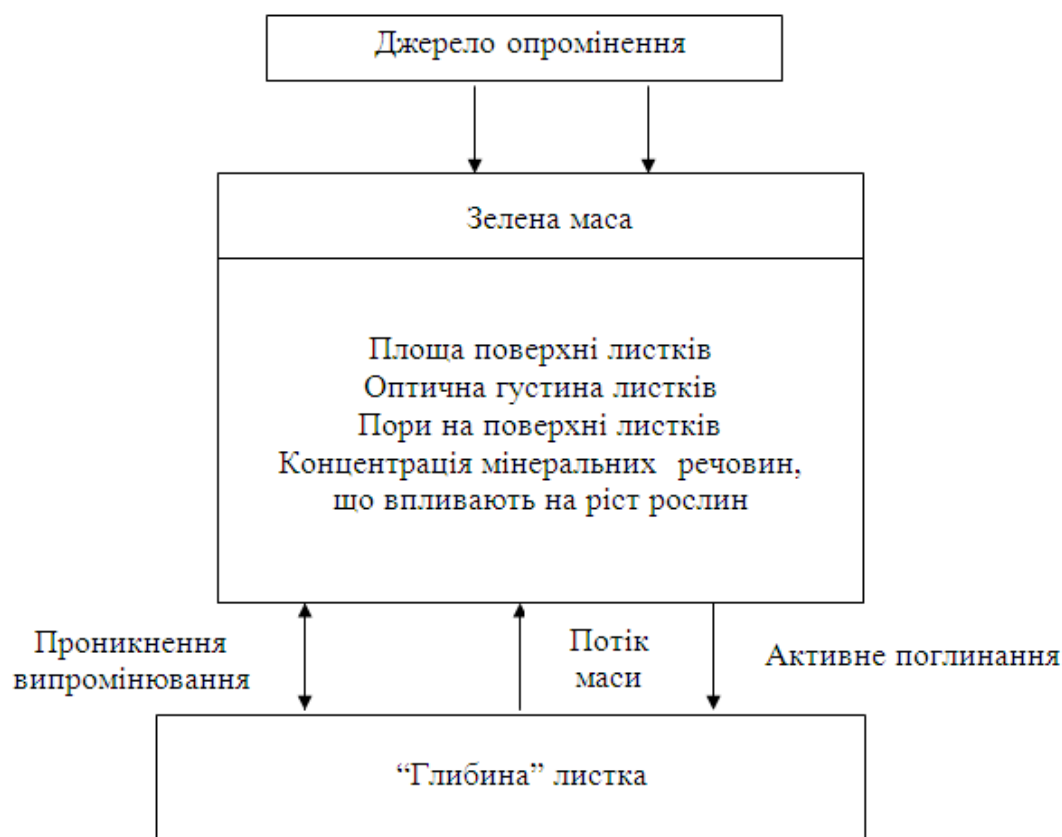


Рис. 1. Схема розподілу оптичної енергії в зелену масу рослини

Під терміном "глибина" листка слід розуміти внутрішній прошарок структур, що знаходяться під сприймаючою поверхнею листка рослини.

Регресійну залежність впливу факторів опромінення в загальному вигляді можна подати виразом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (3)$$

де b_0 – вільний член, що характеризує сталі параметри мікроклімату;

b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти впливу факторів;

x_1, x_2, x_3 – фактори впливу;

x_1 – інтенсивність (доза) випромінювання;

x_2 , час дії опромінення;

x_3 – спектральний склад потоку оптичного випромінювання.

Взаємодію цих факторів характеризують три останні члени рівняння регресії.

Задачею оптимізації у спорудах захищеного ґрунту є такі результати:

- якщо вихідним результатом процесу є збільшення врожайності, то він (результат) повинен прагнути до максимального значення;

- якщо ж вихідним результатом є зменшення собівартості виробленої продукції, то цей результат має прагнути до мінімуму.

Позначимо Q_1 – критерій, що визначає врожайність продукції (томати, огірки, зелень).

Тоді визначаємо основні фактори, що впливають на врожайність об'єктів дослідження:

A_1 – інтенсивність (доза) опромінення, лк;

A_2 – тривалість дії опромінення, хв;

A_3 – спектральний склад світлового потоку штучного джерела світла.

Тоді, відповідно до поставлених задач:

$$Q_1 = f(A_1, A_2, A_3) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Позначимо Q_2 – критерій, що визначає собівартість вирощеної продукції.

При цьому його значення наближатиметься до мінімального значення:

$$Q_2 = f(B_1, B_2) \rightarrow \min, \quad (5)$$

де B_1 – тип світильника, залежно від його вартості, який визначає світлотехнічні характеристики та конструкцію світильника.

Оскільки збільшення врожайності призводить до зменшення собівартості продукції, можна записати:

$$Q_2 = f(B_2) = f(A_1, A_2, A_3). \quad (6)$$

Вирішуючи наведені задачі оптимізації можна знайти найбільш ефективні значення факторів впливу. При цьому можна використовувати різні методи: математичний, експериментальний, метод експертних оцінок Дельфі, тощо.

Розробка енергоефективних режимів опромінення – один із перспективних напрямів зниження витрат електроенергії у світлокультурі захищеного ґрунту.

Оптимальне використання енергетичних впливів можливе при ефективному використанні джерела оптичного випромінювання, що забезпечується правильним вибором режиму опромінення, інтенсивності, періодичності, спектра.

Використання зовнішніх періодичних впливів, перш за все світлових, корегованих з внутрішніми ритмами рослин, що приводять до резонансних ритмів, дає змогу забезпечити керування фізіологічними процесами життєдіяльності рослин.

Експериментальні дослідження, проведені на овочевих культурах, які вирощуються в умовах захищеного ґрунту, включаючи й огірки, показали, що оптимальним, з точки зору резонансної стимуляції, є період слідування світлових циклів близько 30 хвилин. Результати теоретичних та практичних дослідів підтвердили ці дані. Проведеними дослідженнями

було встановлено величину витрат електричної енергії при штучному опроміненні на створення біомаси розсади огірків залежно від скважності світлової фази за періоду 60 хвилин. Визначено, що оптимальною є скважність: $m=0,5$. Отримано також максимальний і мінімальний рівень опроміненості з точки зору підвищення врожайності та мінімізації енерговитрат, який дорівнює 15 Вт/м² і 35 Вт/м², відповідно[5].

Отже, резонансно-періодичне опромінення розсади огірків сприяє формуванню більшої асиміляційної поверхні та зростанню накопичення сухої маси на 30–50% [1, 3].

Резонансно-періодичний режим опромінення характерний високими вимогами до точності задання параметрів опромінення та їх регулювання. Виконання цієї вимоги можна забезпечити за допомогою багатофункціональної системи керування опроміненням DALI.

Новий стандарт (система) DALI протоколу (Digital Addressable Lighting Interface – Цифровий Адресований Інтерфейс Опромінення) визначає цифровий зв'язок між електронними баластами і блоками керування. В основу побудови стандарту покладений принцип системи керування з максимізованими функціональними можливостями, але при цьому створено просту систему з ясно визначеними структурами. DALI призначений для інтелектуального швидкодіючого керування світильниками опромінення в приміщенні. Ці функції можуть звичайно бути об'єднані в систему керування опроміненням будь-якого об'єкта за допомогою різних інтерфейсів.

Щоб гарантувати повну сумісність між DALI компонентами різних виробників, DALI протокол стандартизується глобально відповідно до Стандарту 929 Міжнародної Електротехнічної Комісії (IEC). Це дає можливість маркетингу і використанню DALI компонентів в усьому світі, минаючи визначені національні, або технічні несумісності. Цей стандарт підтримується глобально активними і відомими компаніями.

DALI протокол може використовуватися, для керування і / або стабілізації режимів роботи електронного баласту або лампи.

Включення/виключення лампи проходить в електронному баласті. Це означає, що немає більше потреби використовувати вимикачі для включення ламп у мережу. Опромінення може бути виключене або знижене за допомогою команди через DALI лінію.

До 64 адрес може бути призначено в DALI системі. Це означає, що 64 різних електронних баластів можуть керуватися незалежно один від одного. Адресація повинна бути виконана після того, як система була встановлена. Процедура адресації програмує контролер.

Баласты, до яких адресуються світильники, можуть бути об'єднані в групи. До 16 груп можна підключати для кожної DALI лінії.

Ніяких спеціальних сполучних проводів типу витих пар або спеціальних кабелів не потрібно щоб установити DALI лінію. Уже існуючі проводи контролю (керування) у спорудах можуть також використовуватися як DALI лінії.

Структурна схема створення DALI системи показана на наступному малюнку (рис. 2). Максимальна довжина лінії не повинна перевищувати 300 метрів при спаданні напруги в ній не більш ніж 2 вт.

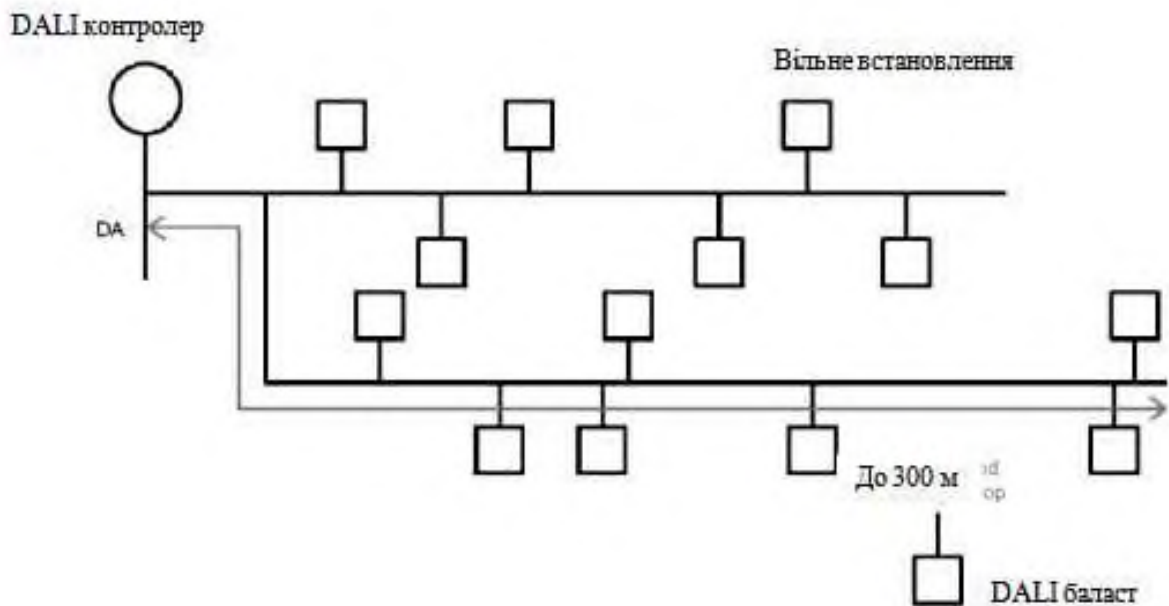


Рис. 2. Структурна схема системи DALI для 2-х ліній ламп

TRIOS DALI центральний пульт контролера, може виконувати наступні функції:

- добове програмування режиму опромінення;
- кероване переключення режиму опромінення (вкл/викл);
- регулювання рівня опромінення через вимикачі або ІЧ дистанційне керування.

Процес автоматичного регулювання інтенсивності світлового потоку установки опромінення відповідно до змінної на впродовж доби величини природного світла призначений, щоб підтримати постійний визначений рівень опромінення в приміщенні. Це досягнуто системою, що робить безперервне порівняння між необхідним рівнем опромінення і загальним рівнем, що складається з природного та штучного світла. Для отримання дійсного рівня інтенсивності опромінення використовуються спеціальні датчики.

На рис. 3 показано операційний принцип автоматичного регулювання інтенсивності опромінення.

Принцип роботи схеми полягає в тому, що безперервно йде порівняння заданого значення освітленості з вихідним значенням, що додатково враховує природне опромінення. За допомогою зворотного зв'язку проходить регулювання заданого значення.

Потрібно враховувати, що для правильного вимірювання загального значення інтенсивності опромінення, світловий датчик повинен бути розташований безпосередньо над поверхнею опромінення (зеленою масою рослини).

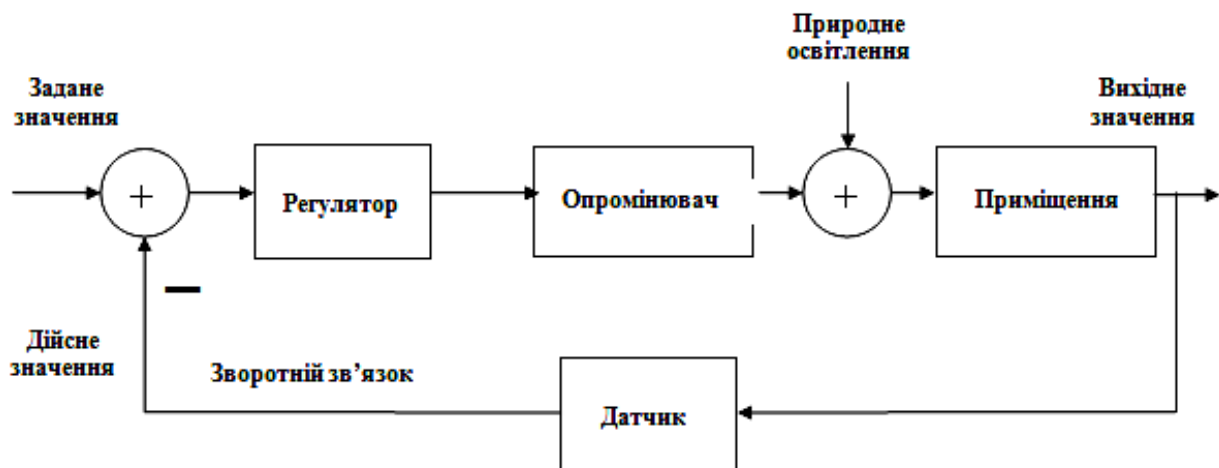


Рис. 3. Схема автоматичного регулювання інтенсивності опромінення пристрою DALI

Процес роботи системи TRIOS DALI в запрограмованому режимі показано нижче на рис.4.

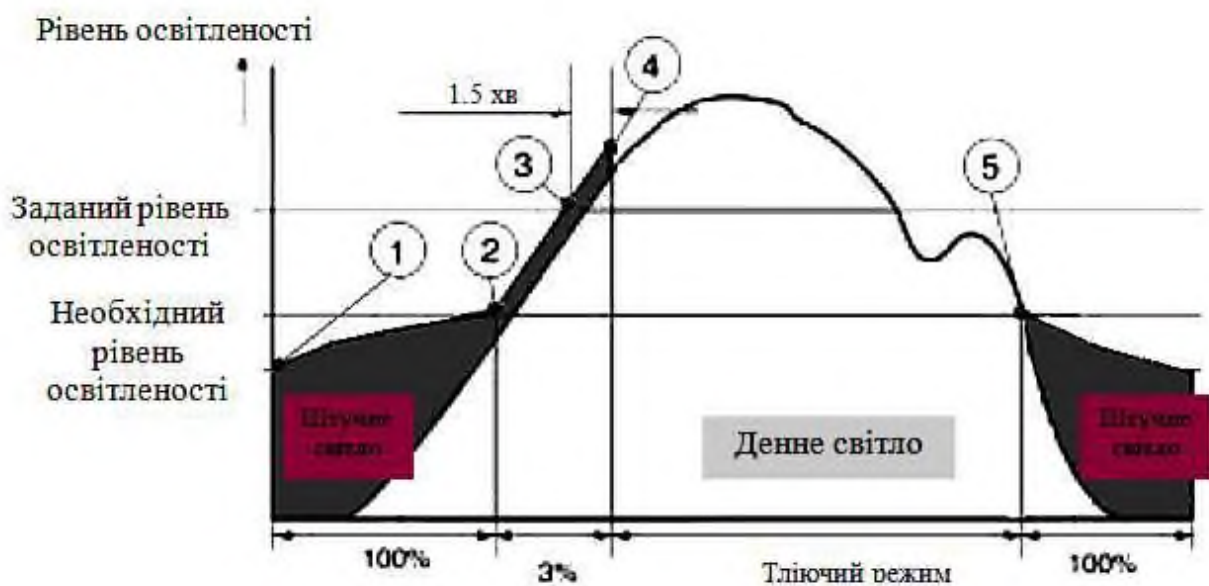


Рис. 4. Процес роботи системи TRIOS DALI в запрограмованому режимі

Зі збільшенням світла, освітленість досягає необхідного рівня, система TRIOS DALI регулює штучне світло безперервно до мінімального рівня сили світла, який гарантує, що досягнутий рівень природного опромінення буде не нижчий від заданого (1). Як тільки загальний рівень освітленості перевищує 1,5 заданого рівня, вмикається 1,5-хвилинна затримка, після якої система вимикає штучне опромінення (2) (переводить лампи в тліючий режим роботи). Ця часова затримка використана з метою видалення впливів тимчасових змін погоди. При зменшенні рівня природної освітленості нижче від заданого значення (3), TRIOS DALI включить опромінювані (4), і процес відбуватиметься у зворотному порядку, гарантуючи необхідний рівень

освітленості балансуванням збільшення штучного опромінення при зменшенні природного рівня. Через 30 хвилин, відповідно до заданого нами резонансно-періодичного режиму опромінення (30 хв опромінення – 30 хв пауза) цикл повторюється (5).

Висновки і перспективи. Підвищення ефективності світлокультури рослин у спорудах захищеного ґрунту неможливе без урахування наявності поживних речовин в ґрунті та температурно-вологісного режиму шляхом моделювання найбільш ефективного процесу вирощування та його подальшої реалізації.

Застосування нового стандарту (системи) DALI протоколу Digital Addressable Lighting Interface – цифрового адресного опромінюваного інтерфейсу, дасть можливість забезпечити найбільш ефективний режим опромінення з урахуванням природних і технологічних факторів впливу на продуктивність рослин.

Список літератури

1. Никифорова Л. Є. Обґрунтування енергозберігаючих режимів електричного опромінення рослин огірка в умовах захищеного ґрунту / Л. Є. Никифорова // Труды Таврической государственной агротехнической академии – 1998. – Вип. 1. Т. 8. – С. 41–46.
2. Вергунов В. А., Основы математического моделирования : для анализа и прогноза агрономич. процессов / Вергунов В. А., Вергунова И. Н., Шкрабак В. С. – СПб. : СПбГАУ, 2003. – 219 с.
3. Червінський Л. С. Математичне моделювання просторової фотосинтезної опроміненості в спорудах захищеного ґрунту / Л. С. Червінський, Я. М. Луцак / Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. – 2016. – Вип. № 4. – С. 53–61.
4. Червинский Л. С. Обоснование влияния спектрального состава источников световой энергии на жизнедеятельность растений в сооружениях закрытого грунта / Л. С. Червинский, Я. Н. Луцак // Теоретический и научно-практический журнал Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства «Инновации в сельском хозяйстве». – 2016. – Вып. № 4 (9) – С. 180–187.
5. Метод визначення просторової фотосинтезної опроміненості / Л. С. Червінський, С. М. Усенко, Т. С. Книжка, Я. М. Луцак // Технічна електродинаміка – 2016. – № 5. – С. 88–90.

References

1. Nikiforova, L. E. (1998). Obgruntuvannya enerhozberihayuchykh rezhymiv elektrychnoho oprominennya ohirkovykh roslin u zakhyshchenykh hruntovykh umovakh [Substantiation of energy-saving modes of electric irradiation of cucumber plants in conditions of protected soil]. Trudy Tavriyskoyi derzhavnoyi ahrotekhnichnoyi akademiyi, 8 (1), 41–46.
2. Verhunov, V. A., Verhunova, I. N., Shkrabak, V. S. (2003). Osnovy matematychnoho modelyuvannya: dlya analizu ta prohnozuvannya ahronoma. protsesy / [Fundamentals of mathematical modeling: for analyzing and forecasting an agronomist. processes]. Sankt-Peterburh: SPbHUU, 219.
3. Chervinsky, L. S., Lutsak, Y. M. (2016). Matematychnе modelyuvannya prostorovoyi fotosynteznoyi oprominenosti v sporudakh zakhyshchenoho hruntu

[Mathematical modeling of spatial photosynthesis irradiation in structures of protected soil]. Visnyk Ukrayins'koho viddilennya Mizhnarodnoyi akademiyi aharnoyi osvity, 4, 53–61.

4. Chervinskyy, L. S., Lutsak, Y. M. (2016). Obosnovanye vlyyannya spektral'noho sostava ystochnykov svetovoy énerhyi na zhyznedeyatel'nost' rastenyy v sooruzhenyakh zakrytoho hrunta [Substantiation of the influence of the spectral composition of light energy sources on the activity of plants in closed-ground facilities]. Teoretycheskyy y nauchno-praktycheskyy zhurnal Vserossyyskoho nauchno-yssledovatel'skoho ynstytuta élektryfikatsyy sel'skoho khozyaystva «Ynnovatsyy v sel'skom khozyaystve», № 4 (9), 180–187.

5. Chervinskyy, L. S., Usenko, S. M., Knyzhka, T. S., Lutsak, Y. M. (2016). Metod vyznachennya prostorovoyi fotosyntezy oprominenosti [Method of determination of spatial photosynthesis irradiance]. Tekhnichna elektrodynamika, 5, 88–90.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СВЕТОКУЛЬТУРЫ РАСТЕНИЙ В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

Я. Н. Луцак

Аннотация. При выращивании растений в среде защищенного грунта важным фактором, влияющим на формирование качества и урожайности культур, является облучение, особенно в поры года, когда солнечного света недостаточно. Поэтому использование искусственного досвечивания необходимо. Световые приборы, которые при этом используются, должны удовлетворять условиям качественного роста растения и формирования урожая, при этом иметь низкое потребление электроэнергии и соответствующие фотобиологические характеристики.

Разработка энергоэффективных режимов облучения – одно из перспективных направлений снижения затрат электроэнергии на светокультуры защищенного грунта. Существующее положение проблемы, на основе анализа публикаций по биоэлектрической активности растений, показывает важное влияние ритмических изменений на физиологическое состояние растений, поэтому вопрос энергосбережения при электрооблучении овощных культур может быть решен, в частности, импульсным или периодическим облучением растений в сооружениях защищенного грунта.

Ключевые слова: растениеводство, режимы освещения, досвечивание, теплицы, эффективность, качество урожая

RESEARCH OF WAYS TO INCREASE THE LIGHT-CULTURE OF PLANTS IN THE FACILITY OF THE PROTECTED GROUND

Yu. Lutsak

Abstract. When growing plants in protected soil, an important factor influencing the formation of quality and yield of crops is irradiation, especially in the seasons when there is not enough sunlight. Therefore, the use of

artificial illumination is necessary. Lighting devices that are used in this way must satisfy the conditions for the qualitative growth of the growths and the formation of the crop, while having low energy consumption and corresponding photobiological characteristics.

The development of energy-efficient irradiation regimes is one of the promising directions of reducing energy consumption in protected crop protection. The existing state of the problem on the basis of the analysis of publications on bioelectric activity of plants shows the important influence of rhythmic changes on the physiological state of plants, therefore the issue of energy saving during electro-irradiation of vegetable crops can be solved, in particular by pulsed or periodic irradiation of plants in structures of protected soil.

Keywords: *plant growing, modes of formation, illumination, greenhouses, efficiency, quality of harvest*

УДК 661.123

МІКРОКРИСТАЛІЧНА ЦЕЛЮЛОЗА І КОМПОЗИТИ НА ЇЇ ОСНОВІ: СТРУКТУРА ТА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

В. В. БОЙКО, кандидат фізико-математичних наук, доцент

В. П. ЧОРНИЙ, кандидат фізико-математичних наук, доцент

**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**

В. А. БАРБАШ, кандидат хімічних наук, доцент

О. В. ЯЩЕНКО, аспірант

**Національний університет «Київський
політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського**

О. М. АЛЕКСЄЄВ, кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Ю. Є. ГРАБОВСЬКИЙ, кандидат фізико-математичних наук, доцент

С. Г. НЕДІЛЬКО, доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Є. О. РЕЗНИЧЕНКО, студент

В. П. ЩЕРБАЦЬКИЙ, провідний інженер

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

М. С. НЕДІЛЬКО, провідний інженер

Інститут електрозварювання ім. О. Є. Патона НАН України

E-mail: vchornii@gmail.com

Анотація. *Наведено дані щодо виготовлення, структури й морфології мікрокристалічної целюлози та композитів на її основі, які містять оксидну компоненту як наповнювач. Показано, що, залежно від*

© В. В. Бойко, В. П. Чорний, В. А. Барбаш, О. В. Ященко, О. М. Алексєєв, Ю. Є. Грабовський, С. Г. Неділько, Є. О. Резниченко, В. П. Щербацький, М. С. Неділько, 2018

походження вихідної сировини та ступеня обробки, зразки целюлози характеризуються різним ступенем кристалічності (у межах 64–77 %). Виготовлені композити мають ще нижчий ступінь кристалічності $\approx 57\%$. Детальний аналіз морфології поверхні, виконаний за допомогою скануючого електронного мікроскопа, показав, що досліджувані зразки целюлози та композитів містять пластини розміром $\sim 20\text{--}50$ мкм, які, у свою чергу, складаються зі щільно спакованих зерен розміром $5\text{--}10$ мкм.

У випадку композитів, крім того, спостерігалися наночастинки (розміром до 200 нм) оксидного компонента, інкорпорованого до зерен мікрокристалічної целюлози. Показано, що дія світла на композит «целюлоза»+« AgNO_3 » веде до відновлення срібла, що відкриває можливості застосування таких композитів, як бактерицидні матеріали.

Ключові слова: мікрокристалічна целюлоза, оксид, рідкісноземельний іон, аргентум нітрат

Актуальність. Целюлоза, як один із найпоширеніших на Землі природних полімерів, широко використовується для виготовлення функціональних, і серед них, нанорозмірних, композиційних фотоелектричних матеріалів та пристроїв на їх основі. Зокрема, це можуть бути датчики, приводи, пристрої гнучкої електроніки тощо [1–3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Целюлоза має ряд особливих властивостей, важливих не тільки для виготовлення з неї виробів практичного використання, але й для вивчення фізичних та хімічних процесів у конденсованій речовині. Серед таких особливостей матеріалів на основі целюлози є, наприклад, її здатність формувати у концентрованих водних розчинах структури рідких кристалів. Подібна рідкокристалічна метафаза формується, зокрема, у розчинах деяких гідропропілцелюлоз [4]. Кристали в цих розчинах є, в основному, ліотропними, але із залишками нематичної фази. Аморфна фаза гідропропілцеллюлози є холестеричною. Присутність декількох структурних фаз є причиною складної і неоднозначної поведінки розчинів целюлози та одержаних із них матеріалів. Так, плівки гідропропілцеллюлози за температур 19 та 80 °C виявляють особливості, пов'язані з утворенням скла [4].

Кристалічна структура целюлози є тим важливим фактором, що значним чином визначає її властивості у випадку, так званої, мікрокристалічної целюлози (МКЦ). Мікрокристалічна целюлоза (cellulosum microcristallinum) – це очищена, частково деполімеризована целюлоза, має вигляд білого, без смаку і запаху кристалічного порошку, що складається з пористих частинок і має адгезивні та адсорбційні властивості, що дає змогу використовувати її як наповнювач, стабілізатор та емульгатор у харчовій, косметичній і фармацевтичній промисловості.

Комерційна МКЦ за своїми властивостями близька до натуральної целюлози; вона нетоксична, а тому зовсім не шкідлива для людини. Порошкоподібна МКЦ може відрізнятися розміром частинок і вмістом вологи, що впливає на її характеристики та можливості застосування. Зрозуміло, що МКЦ, виготовлена в різних дослідних лабораторіях, або ж

МКЦ масового виробництва – комерційна, також, буде мати дещо різні характеристики: структурні, морфологічні тощо [5].

Мета дослідження – розробка та з'ясування структурних характеристик наноструктурованих композитів на основі целюлози як матриці, і деяких складних оксидів як наповнювачів.

У цій праці ми наводимо дані щодо процедури виготовлення та структури целюлози та МКЦ, синтезованих в лабораторних умовах на кафедрі екології та технології рослинних полімерів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Ці дані порівнюються з аналогічними характеристиками комерційної МКЦ та композиційних матеріалів, виготовлених на її основі методом холодного пресування [5, 6].

Щодо можливостей практичного застосування подібних композитів, то одна з них пов'язана з використанням такого оксидного наповнювача як аргентум нітрат, AgNO_3 , а точніше, з наявністю аргентуму у його складі. Дійсно, здавна добре відомо, що матеріали та вироби зі срібла мають антибактеріальні та антимікробні властивості, що пов'язано зі здатністю наночастинок срібла порушувати ферментні системи мікроорганізмів і осаджувати білки. Нині, у промисловому масштабі, за допомогою електролітичних апаратів зі срібними електродами, знезаражують воду; виготовляють медичні препарати, до складу яких додане срібло. Такими препаратами є, наприклад, коларгол, протаргол, нітрат срібла. За незначних поранень та подразнень, синців та опіків застосовують серветки з бактерицидного паперу, що містять сполуки аргентуму. Ці серветки запаковані так, щоб уникнути дії на них відкритого світла.

Перед застосуванням серветку витягують із упаковки і під дією світла на її поверхні відбувається відновлення срібла. Після цього серветку можна застосовувати як лікувальний засіб. Недоліком відомих композиційних «срібних» серветок є їх низька стійкість до дії зовнішнього світла, або ж необхідність попередньої термообробки. Методи ж виготовлення подібних серветок потребують достатньо складних і тривалих хімічних процедур. У праці ми покажемо можливість виготовлення подібного матеріалу: «МКЦ + аргентум нітрат», «сухим» способом – без попередньої хімічної обробки, а також розглянемо люмінесцентний експрес-метод контролю рівня відновлення аргентуму в його складі.

Матеріали і методи дослідження. Було досліджено декілька серій зразків. Серія А, що складалася з 5-ти зразків (А1, А2, ..., А5) – це порошкоподібні матеріали, одержані з однієї рослинної речовини, волокна конопель, на різних стадіях процедури синтезу МКЦ. Серія В, що складалася з 6-ти зразків (В1, В2, ..., В6), – це МКЦ, одержана з різних представників вітчизняних рослин: волокон льону, конопель, кенафу, стебел соломки, кукурудзи і міскантусу. Методику одержання з них МКЦ описано в праці [7]. Для виготовлення зразків серії С та D як стартовий матеріал використовували таблетки комерційної МКЦ, які виробляє фірма ANCYR-B (Україна). Спочатку, таблетки МКЦ було розмелено й дисперговано за допомогою обертально-планетарного млина. Далі, однакові частини одержаного порошку, масою ~ 0,5 г, змішували з певною кількістю попередньо підготовленого порошку

оксиду. Композиційні зразки в серії С містили аргентум нітрат, AgNO_3 . Зразок композиту «МКЦ+ AgNO_3 », де кількість AgNO_3 становила 30 мг, нижче позначено як С/Ag.

Процедура виготовлення зразків серії D дещо відрізнялася від попередньої. Тут суміш диспергованої МКЦ та оксиду розчиняли в 50 мл етанолу високої чистоти й оброблювали ультразвуком (частота, $f = 4,2$ kHz, тривалість обробки, $t = 20$ хв). Після цього, одержану суспензію витримували протягом 30 хвилин, рідину зливали, а видалений осад фільтрували через фільтрувальний папір і осушували в атмосфері оточення за температури 60°C . Порошки сумішей всіх серій пресували в таблетки у вигляді диска діаметром ~ 10 мм і завтовшки ~ 1 мм. При цьому, зразки серій А та В було одержано під тиском $1,8 \cdot 10^4$ кПа/м², а зразки серії С та D – під тиском 580 кПа/м². Зразки, виготовлені з диспергованої МКЦ, які не містять оксиду, позначаються як О/0, а всі інші: D/Назва відповідного оксиду/Вміст оксиду в мг.

Морфологію поверхні виготовлених зразків досліджували за допомогою оптичного мікроскопу OLYMPUS GX51. Детальний вигляд поверхні зразків було одержано із використанням електронного мікроскопа зі скануванням електронного променя (СЕМ) Tescan Mira 3LMU. Під час вимірювань діаметр променя дорівнював 20 нм. Мікроаналіз хімічних елементів у складі зразків було виконано із застосуванням інструментальних можливостей цього самого електронного мікроскопа.

Рентгенівський дифракційний аналіз структури зразків (РДА) виконували із застосуванням порошкового дифрактометра DRON-3М, що працює в Bragg–Brentano ($\theta/2\theta$) геометрії і обладнаний рентгенівською трубкою БСВ-28 (довжина хвилі випромінювання $\lambda_{\text{rad}} = 1.54178$ Å). Спектри розсіяння рентгенівських променів було записано в діапазоні 10 – 70° кутів 2θ із кроком $0,1^\circ$.

Результати досліджень та їх обговорення. Оптичні мікроскопічні зображення показують, що поверхня і, очевидно, об'єм зразків, як «чистих» – без оксидів, так і інкорпорованих ними, є доволі неоднорідними. Різна яскравість частин зображення свідчить, що вони є пластинками (плато), розташованими на різній глибині та під дещо різними кутами до поверхні (рис. 1а). Детальний аналіз поверхні, виконаний за допомогою СЕМ, свідчить, що ці пластини мають розмір ~ 20 – 50 мкм, а самі вони складаються зі щільно спактованих зерен розміром 5 – 10 мкм. Згадані плато можуть бути в деяких випадках розділені помітними тріщинами (рис. 1б).

На додачу до описаних деталей, легко бачити включення іншого типу – вони мають відмінне забарвлення, форму та розмір. Очевидно, що ці включення є частинками оксидних сполук, вмонтованими в матрицю МКЦ. Розміри частинок лежать у межах 10 – 200 нм. Бачимо також, що наночастинки оксидів здатні частково агломеруватися в зерна розміром 2 – 10 мкм. Спостережені особливості морфології зразків дають нам змогу кваліфікувати структуру пресованих зразків як подібну до керамічної [5].

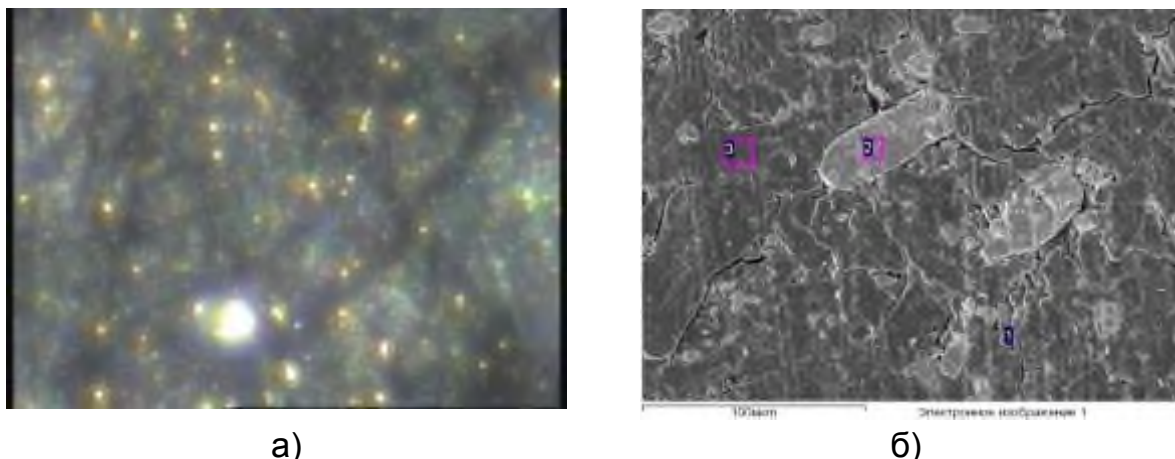


Рис. 1. Оптичне (а) та СЕМ зображення (б) зразка $D/K_2Eu(PO_4)(MoO_4)/100$

Аналіз складу було виконано в різних зонах досліджених зразків. Деякі з них на рис. 1б виділено кольоровими прямокутниками 1–3. Не дивно, що середній вміст атомів вуглецю, С, та кисню, О, для всіх зразків у зонах зазначених вище пластин (зона 1) становить 74–76 та 23–25 %, відповідно. Ці дані підтверджують зроблений вище висновок, що пластини, спостережені в СЕМ зображеннях, є блоками матриці МКЦ. Результати аналізу в області згаданих включень (зерна та їх агломерати) у композиційних зразках свідчать, що вони дійсно належать відповідним оксидам, адже їх склад відповідає хімічному складу використаних оксидів [5].

Аналіз даних рентгенівської дифракції. Спектри рентгенівської дифракції досліджуваних зразків МКЦ в діапазоні $10\text{--}45^\circ$ кутів 2θ демонструють ряд дифракційних ліній, пов'язаних із дифракцією X-променів на целюлозній матриці. Ці, відносно широкі, лінії розташовуються на кутах 2θ приблизно при 16° , $22,5^\circ$ та $34,5^\circ$. Для всіх зразків спостерігаються також лінії та «плечі» меншої інтенсивності (рис. 2).

Для композиційних зразків, окрім зазначених вище ліній, спостерігаються додаткові. Їх набір, положення та розподіл інтенсивності відповідають спектрам рентгенівської дифракції оксидних сполук, інкорпорованих до складу композитів. Із підвищенням вмісту оксидів інтенсивність цих ліній зростає. Таким чином, можна стверджувати, що ці лінії відповідають включенням мікро/наночастинок оксидів до целюлозної матриці, що підтверджується порівнянням характеристик цих ліній (положення та розподіл інтенсивності) із відповідними характеристиками розсіяння для сполук $AgNO_3$, $La_{1-x}RE_xVO_4$ та $K_2Eu(PO_4)(MoO_4)$. (Детальніший опис дифрактограм для композиційних зразків можна знайти у праці [5]).

Спектри дифракції матриці МКЦ, як за кількістю ліній, їх положенням та розподілом інтенсивності, є подібними для всіх досліджених зразків – «чистих» та тих, що містять оксид. Разом із тим, детальніший аналіз показує певні відмінності. Так, по-перше, напівширина ліній дещо залежить від походження зразків: лабораторні (серії А та В) чи комерційні (серії С та D), та від наявності у їх складі оксиду (серії С та D). Ці факти означають, що як процедура видалення кристалічної фази целюлози зі стартового матеріалу, яка є різною для лабораторних та комерційних

зразків, так і тип оксиду та його кількість в матриці, впливають на розподіл нанорозмірних частинок МКЦ за розміром.

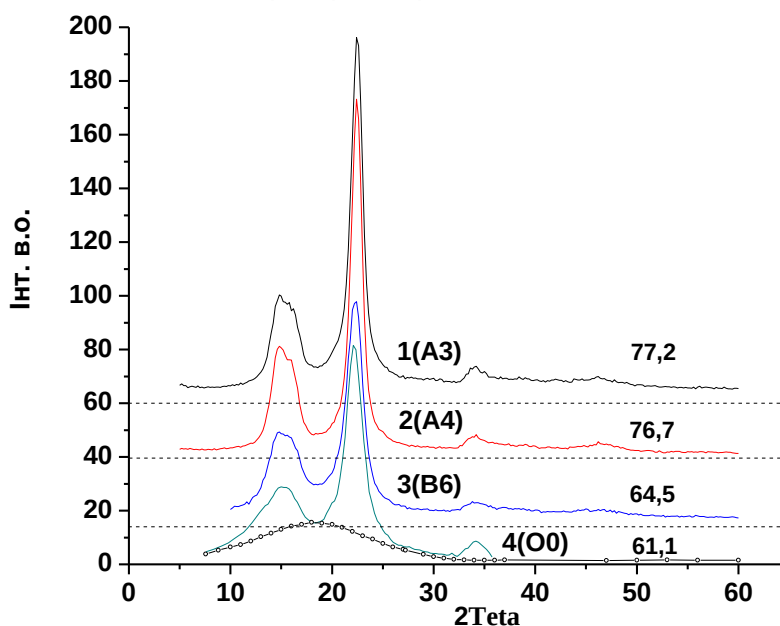


Рис. 2. Спектри рентгенівської дифракції для зразків різної стадії підготування МКЦ (1, 2) та для готової МКЦ (3, 4); 3 – лабораторна, 4 – комерційна МКЦ (номер зразка в серіях та ступінь кристалічності для них зазначено на рисунку)

На основі вимірюваних спектрів рентгенівської дифракції ми також оцінили коефіцієнт кристалічності зразків k , який характеризує відносний вміст кристалічної фази у дослідженому матеріалі. Для цього внесок аморфної фази, (I_{am}), було видалено із загального спектра: ($I_{cryst} + I_{am}$). Тут I_{cr} – це площа в спектрі під лініями, що відповідають дифракції на кристалічній структурі целюлозної матриці, а I_{am} – площа суцільного фону, на якому розташовані згадані лінії, і цей фон зумовлено розсіянням на аморфній складовій матеріалу. Спосіб виділення кристалічної та аморфної компонент у спектрах розсіювання показано на рис. 2. (Детальніше із цією процедурою можна ознайомитися у праці [5].) Отже, ступінь кристалічності k було оцінено за формулою:

$$k = \frac{I_{cr}}{I_{cr} + I_{am}}.$$

Розраховані значення k лежать у межах 64–77 і 61–66 % для «чистих» зразків лабораторної та комерційної МКЦ, відповідно, тоді як для композитів значення кристалічності k є помітно меншими і становлять 57–58 %. Таким чином, дані стосовно кристалічності свідчать, по-перше, про вплив процедури синтезу МКЦ на розподіл кристалічної та аморфної фаз целюлози у готовому продукті – мікроталічна целюлоза, а по-друге, вони показують вплив оксидних частинок на структуру і

морфологію кристалічної фази МКЦ. Роль оксидних мікро/наночастинок, очевидно, виявляється у деякому руйнуванні кристалічної решітки целюлози.

Щодо перспектив використання композитів, то арґентум нітрат, як було зазначено вище, є фотохімічно активним, що, зрозуміло, і визначає фотохімічні характеристики композиту, де ця сполука є у його складі. Фотохімічну дію на композит «МКЦ+AgNO₃» у цій праці ми вивчали шляхом освітлення частини зразка лазерним випромінюванням із довжиною хвилі 405 нм та потужністю 20 мВт. Під впливом лазерного випромінювання має місце відновлення іонів Ag⁺, що знаходяться в зоні дії фотонів світла, до нейтрального стану Ag⁰ із наступним їх об'єднанням у мікро- та наночастинок срібла. Такі частинки, як і макрочастинки срібла, мають срібно-сірий колір, а тому опромінена ділянка зразка набуває подібного забарвлення (рис. 3).



Рис. 3. Зображення поверхні зразка композиту «МКЦ+AgNO₃» після лазерного опромінення (тривалість опромінення зазначено на рисунку)

Результат дії опромінення можна контролювати не тільки «на око». Дійсно, зміна забарвлення частини зразка має призвести до зміни характеристик поглинання та відбивання світла видимого діапазону, що може знайти відгук у зміні люмінесцентних характеристик. З метою перевірки цього передбачення ми дослідили залежності спектрально-люмінесцентних характеристик композиту «МКЦ+AgNO₃» від часу його опромінення. Результати досліджень свідчать, що, зі збільшенням тривалості опромінювання, характер ФЛ (спектр) змінюється незначно, а інтенсивність свічення змінюється обернено пропорційно до часу опромінення, тобто, зі збільшенням тривалості опромінювання інтенсивність люмінесценції зменшується. Описані зміни інтенсивності ФЛ можуть бути використані для експрес-контролю процесу виробництва та якості антибактерицидних серветок, виготовлених на основі мікроцелюлози, активованої нітратом срібла.

Висновки і перспективи. Виготовлені методом холодного пресування композиційні зразки, де матрицею є мікрористалічна целюлоза (МКЦ), а наповнювачем – сполуки складних оксидів AgNO₃, LaVO₄:Sm, Eu та K₂Bi(PO₄)(MoO₄):Eu, мають керамічно-подібну структуру, яку утворено пластинами МКЦ та зернами оксидів.

Хід фотохімічних перетворень Ag⁺→Ag⁰ на поверхні композиційного зразка «МКЦ+ AgNO₃», може бути проконтрольований оптичними, зокрема, люмінесцентними методами.

Список літератури

1. Wang X. et al. Layer-by-Layer assembled hybrid multilayer thin film electrodes based on transparent cellulose nanofibers paper for flexible supercapacitors applications // *Journal of Power Sources*. – 2014. – Vol. 249. – P. 148–155.
2. de Moraes A. C. M. et al. Fabrication of transparent and ultraviolet shielding composite films based on graphene oxide and cellulose acetate // *Carbohydrate polymers*. – 2015. – Vol. 123. – P. 217–227.
3. Wu W. et al. Nanocellulose-based translucent diffuser for optoelectronic device applications with dramatic improvement of light coupling // *ACS applied materials & interfaces*. – 2015. – Vol. 7. – № 48. – P. 26860–26864.
4. Rials T. G., Glasser W. G. Thermal and dynamic mechanical properties of hydroxypropyl cellulose films // *Journal of applied polymer science*. – 1988. – Vol. 36. – № 4. – P. 749–758.
5. Nediello M. et al. Mechanical, dielectric, and spectroscopic characteristics of “micro/nanocellulose+ oxide” composites // *Nanoscale research letters*. – 2017. – Vol. 12. – № 1. – P. 98.
6. Barbash V. A. et al. Development of technology of microcrystalline cellulose from hemp fibres // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 3/6. – P. 51–56.
7. Барбаш В. А. Технологія одержання мікрокристалічної целюлози із недеревної рослинної сировини / В. А. Барбаш, Ю. М. Нагорна // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2015. – № 2. – С. 119–124.

References

1. Wang, X., Gao, K., Shao, Z., Peng, X., Wu, X., & Wang, F. (2014). Layer-by-Layer assembled hybrid multilayer thin film electrodes based on transparent cellulose nanofibers paper for flexible supercapacitors applications. *Journal of Power Sources*, 249, 148–155.
2. De Moraes, A. C. M., Andrade, P. F., de Faria, A. F., Simões, M. B., Salomão, F. C. C. S., Barros, E. B., ... & Alves, O. L. (2015). Fabrication of transparent and ultraviolet shielding composite films based on graphene oxide and cellulose acetate. *Carbohydrate polymers*, 123, 217–227.
3. Wu, W., Tassi, N. G., Zhu, H., Fang, Z., & Hu, L. (2015). Nanocellulose-based translucent diffuser for optoelectronic device applications with dramatic improvement of light coupling. *ACS applied materials & interfaces*, 7 (48), 26860–26864.
4. Rials, T. G., & Glasser, W. G. (1988). Thermal and dynamic mechanical properties of hydroxypropyl cellulose films. *Journal of applied polymer science*, 36 (4), 749–758.
5. Nediello, M., Hamamda, S., Alekseev, O., Chornii, V., Dashevskii, M., Lazarenko, M., ... & Scherbatskyi, V. (2017). Mechanical, dielectric, and spectroscopic characteristics of “micro/nanocellulose+ oxide” composites. *Nanoscale Research Letters*, 12 (1), 98.
6. Barbash, V. A., Karakutsa, M. G., Trembus, I. V., Yaschenko O. V. (2016). Development of technology of microcrystalline cellulose from hemp fibres. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/6, 51–56.
7. Barabash, V. A., Nagorna, Yu. M. (2015). Tekhnolohiia oderzhannia mikrokrystalichnoi tseliulozy iz nederevnoi roslynnoi syrovyny [Technology of microcrystalline cellulose derivation from non-wood plant raw material] / *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 2, 119–124.

МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА И КОМПОЗИТЫ НА ЕЕ ОСНОВЕ: СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В. В. Бойко,
В. П. Чорний,
В. А. Барбаш,
О. В. Яценко,
О. М. Алексеев,
Ю. Е. Грабовский,
С. Г. Неделько,
Е. О. Резниченко,
В. П. Щербацкий,
М. С. Неделько

Аннотация. Представлены данные относительно изготовления, структуры и морфологии микрокристаллической целлюлозы и композитов на ее основе, содержащих оксидный компонент в качестве наполнителя. Показано, что в зависимости от происхождения исходного сырья и степени обработки, образцы целлюлозы характеризуются разной степенью кристалличности (в пределах 64–77 %). Изготовленные композиты имеют еще меньшую степень кристалличности $\approx 57\%$. Детальный анализ морфологии поверхности, проведенный с помощью сканирующего электронного микроскопа, показал, что исследуемые образцы содержат пластины размером $\sim 20\text{--}50$ мкм, которые, в свою очередь состоят из плотно упакованных зерен размером 5–10 мкм.

В случае композитов, кроме того, наблюдались наночастицы (размером до 200 нм) оксидного компонента, инкорпорированного в зерна микрокристаллической целлюлозы. Показано, что действие света на композит «целлюлоза»+« AgNO_3 » ведет к восстановлению серебра, что открывает возможности использования таких композитов в качестве бактерицидных материалов.

Ключевые слова: микрокристаллическая целлюлоза, оксид, редкоземельный ион, аргентум нитрат

MICROCRYSTALLINE CELLULOSE AND CELLULOSE-BASED COMPOSITES: STRUCTURE AND POSSIBILITIES OF APPLICATION

V. Boyko,
V. Chornii,
V. Barbash,
O. Yashchenko,
A. Alekseev,
Yu. Hrabovskyi,
S. Nedilko,
E. Reznichenko,
V. Shcherbatskyi,
M. Nediello

Abstract. The data on preparation, structure and morphology of microcrystalline cellulose and cellulose-based composites, those have oxide component as filler are reported. It is shown that depending on raw materials origin and processing degree cellulose samples reveal various degree of crystallinity (in the range 64–77 %). Obtained composites reveal even lesser crystallinity degree $\approx 57\%$. Detailed analysis of surface morphology was performed with using of scanning electronic microscopy. It was found the studied samples contains plates with sizes $\sim 20\text{--}50\ \mu$ those consist of close-packed grains of $5\text{--}10\ \mu$ size. In the case of composites some oxide nanoparticles (sizes up to 200 nm) were incorporated into grains of microcrystalline cellulose. It was shown that action of light on “cellulose”+“AgNO₃” composite led to reduction of silver. This observation indicates a possibility for using of such composites as bactericide materials.

Keywords: microcrystalline cellulose, oxide, rare-earth ion, argentum nitrate

УДК 621.3:620.96

ПІДВИЩЕННЯ ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ

І. П. РАДЬКО, кандидат технічних наук, доцент
В. А. НАЛИВАЙКО, кандидат технічних наук, доцент
О. В. ОКУШКО, кандидат технічних наук, доцент
А. В. МІЩЕНКО, кандидат технічних наук, доцент
Є. О. АНТИПОВ, кандидат технічних наук, старший викладач

**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: ievgeniy_antypov@ukr.net

Анотація. Метою дослідження був пошук можливих шляхів покращення енергозбереження та визначення напрямів ефективного енерговикористання. Проаналізовано питання стану проблеми економії енергетичних ресурсів у ВНЗ. Для вирішення якої запропоновано ряд основних організаційно-технічних заходів, які сприятимуть підвищенню енергоефективності та енергозбереження у будівлях ВНЗ. Наведено певні результати із впровадження таких заходів.

Ключові слова: енергозбереження, енергоефективність, енергетичні ресурси, енергозберігаюча технологія, заходи

Актуальність. Сучасний розвиток промисловості не може функціонувати без використання електричної і теплової енергії на всіх етапах життєдіяльності людини. Використання цих видів енергії стало

основним фактором розвитку економіки і підвищення добробуту людини. Водночас, унаслідок неефективного використання паливно-енергетичних ресурсів, постала проблема енерго- та ресурсозбереження.

Енергозбереження це процес, унаслідок якого зменшується потреба у використанні різних видів енергії (електрична, теплова) на одиницю кінцевого корисного ефекту від його використання, тобто споживається тільки та частина енергії, яка необхідна для задоволення необхідних потреб людини в її життєдіяльності. Така стратегія використання енергії призводить до необхідності її заощадження і, як наслідок, до забезпечення максимальної ефективності при її використанні [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні стратегічні напрями підвищення енергоефективності та реалізації потенціалу енергозбереження полягають в структурно-технологічній перебудові економіки України, створенні адміністративних, нормативно-правових і економічних механізмів, які сприяють підвищенню енергоефективності та енергозбереженню. Структурно-технологічна перебудова економіки країни в цілому, її окремих галузей, підприємств і технологічних процесів передбачає виведення з роботи морально застарілого та фізично зношеного устаткування, припиненню випуску неенергоефективної продукції, впровадженню у виробництво новітніх технологій, обладнання та побутових приладів. Важливим фактором підвищення енергоефективності є забезпечення інформаційно-аналітичної підтримки всіх суб'єктів економічної діяльності у вирішенні питань оптимізації енергоспоживання та енергозбереження [2].

Важливим елементом державної політики щодо енергозбереження повинен стати відхід, у першу чергу, від адміністративних до ринкових методів регулювання. Першим кроком у цьому напрямі став закон України «Про енергозбереження», який створив правові норми регулювання відносин між різними суб'єктами господарювання (фізичними, юридичними) у т.ч. і їх з державою у сфері енергозбереження. Зокрема, затвердження закону дало поштовх до розробки цілого комплексу законодавчих актів у цій сфері, яких на сьогодні існує близько 250, у т.ч. 11 законів України, 15 Указів Президента України та 170 рішень Уряду.

Така політика держави сприяла розробці комплексних програм з енергозбереження в різних галузях народного господарства, які дали змогу створити певні дієві механізми в напрямі енергозбереження та енергоефективності. Так, наприклад, протягом 1997–2017 років було реалізовано Проекти Агенції міжнародного розвитку США (USAID) «Енергоефективність у промисловості України», «Муніципальна енергетична реформа в Україні», «Енергоефективні студмістечка», «Еколінкс», кілька Проектів за підтримки «Tasis» (адміністративні будівлі, підприємства харчової промисловості) тощо.

Мета дослідження – пошук можливих шляхів покращення енергозбереження та визначення напрямів ефективного енерговикористання.

Матеріали і методи дослідження. Успішне вирішення проблеми економії енергетичних ресурсів можливо лише у тому випадку, якщо переглянути і модернізувати всі етапи споживання енергоносіїв, тобто піти шляхом вдосконалення основних заходів енерговикористання. Такими можуть бути, у першу чергу, організаційно-технічні заходи, пов'язані, в основному, з підвищенням якості технічного обслуговування електротехнічного обладнання і його своєчасного ремонту, пошуку сучасних методів і режимів його експлуатації, розробці ефективних інструментів моніторингу і управління споживання енергетичними ресурсами на підприємствах, а також пошуку механізмів стимулювання заходів з підвищення енергоефективності та енергозбереження. Так, наприклад, за різними оцінками такі заходи можуть дати можливість зменшення використання теплової енергії на опалення приміщення до 30–50 % [3, 4, 5].

Незалежно від обраного напрямку підвищення енергоефективності на підприємстві (об'єкті) доцільною, перш за все, є розробка комплексної програми енергозбереження енергетичних ресурсів на підприємстві. Створення такої програми сприяє проведенню енергетичного обстеження (енергоаудиту) і паспортизації на його основі всього енергетичного господарства підприємства. Проведення такого обстеження має на меті розробку певних організаційно-технічних заходів, спрямованих на підвищення ефективності енерговикористання; визначення потенціалу енергозбереження та розробку економічно обґрунтованих заходів щодо енергозбереження.

Результати досліджень та їх обговорення. Останніми роками ВНЗ зіткнулися із загостренням проблем енергопостачання, яке викликано недостатнім бюджетним фінансуванням та їх низькою енергоефективністю, як споживачів енергоресурсів і енергоносіїв. Ця проблема, стосується, насамперед, ВНЗ із значною кількістю навчальних і житлових будівель і зумовлена факторами, на які ще в недалекому минулому не звертали уваги, а саме: дешевизна енергоресурсів, відсутність дієвих стимулів до енергоощадності та кваліфікація обслуговуючого персоналу.

Враховуючи загострення відповідної проблеми, фахівцями ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України було розроблено «Рекомендації з підвищення якості енергозабезпечення, енергоощадності та енергоефективності в НАУ» [6].

На основі цих рекомендацій в НУБіП України було розроблено відповідну Програму з енергозбереження на період до 2020 року. Пріоритетними напрямками енергозбереження було визначено наступні – зниження втрат у системах опалення шляхом покращення теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій будівель, впровадження теплових екранів радіаторів, а найголовніше – це розробка та впровадження автоматизованих систем обліку і регулювання витрат теплоносія на теплових пунктах. Виконання поставлених задач дає змогу створити центральну диспетчерську службу енергетичної служби, що дасть змогу оптимізувати роботу всіх служб, які задіяні в енергопостачанні університету. Звичайно, це потребуватиме суттєвих капіталовкладень,

але зиск, який буде отримано від впровадження цих енергоефективних заходів може повністю окупитися за декілька років.

Деяку роботу в цьому напрямі було зроблено. На першому етапі виконання Програми відбулося утеплення конструкцій будівель теплоізолюючими матеріалами та встановлення в навчальних корпусах і гуртожитках тепловодолічильників. На другому етапі, який триває донині, відбувається оснащення теплових пунктів вузлами регулювання витрат теплоносія з програмним обмеженням теплоспоживання у нічний час і у вихідні (святкові) дні. Контролем за роботою теплових пунктів разом із відповідною службою Головного механіка НУБіП України займаються фахівці створеного в ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України Центру енергоменеджменту. Поєднання роботи таких різнонаправлених служб і центрів є першим кроком до створення центральної диспетчерської служби університету, що дає змогу підійти до проблеми енергоефективності та енергозбереження не тільки з практичної точки зору, але й наукового підходу.

На рисунку наведено графік споживання теплової енергії за період 2012–2017 років, аналізуючи які можна стверджувати про зменшення споживання енергоресурсів університету після початку дії Програми з енергозбереження – на першому етапі до 10–20 %, а на другому, після встановлення вузлів регулювання теплоносія, ще до 30 %, і це не є межею.



Споживання теплоносія

Отримана економія енергоресурсів дала можливість зменшити платежі за спожиту теплову енергію і зменшити фінансовий тиск з боку держави на університет, що пов'язаний з недостатнім фінансуванням та збільшенням тарифів на енергоносії.

Водночас, для заохочення впровадження енергоефективних заходів обслуговуючим персоналом необхідно впроваджувати заохочувальну систему, фінансування якої можна залучити з отриманих внаслідок впровадження енергоощадних заходів.

Висновки і перспективи. 1. Основні стратегічні напрями підвищення енергоефективності та реалізації потенціалу енергозбереження полягають у необхідності структурно-технологічної перебудови підприємства.

2. Успішне вирішення проблеми економії енергетичних ресурсів можливо лише у випадку модернізації існуючої системи енергопостачання.

Список літератури

1. Правове регулювання енергозбереження в Європейському Союзі та в Україні (порівняльно-правове дослідження) / С. Б. Барбелюк, С. Г. Голікова, В. Г. Дідик [та ін.] ; за ред. В. Г. Дідика // Державний департамент з питань адаптації законодавства. – К., 2007. – 165 с.
2. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України / [А. В. Праховник, В. В. Прокопенко, В. І. Дешко та ін.]. – Луганськ : Місячне сяйво, 2010. – 696 с.
3. Результати спрощеного енергоаудиту об'єктів НУБіП України [Електронний ресурс] / В. В. Козирський, О. М. Берека, О. В. Шеліманова, Є. О. Антипов // Енергетика і автоматика. – 2012. – С. 55–65. – Режим доступу : http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/e-journals/eia/2012_1/12kvvonu.pdf
4. Міщенко А. В. Аналіз теплового комфорту у приміщеннях навчального корпусу № 8 НУБіП України після термомодернізації будівлі / А. В. Міщенко, О. В. Шеліманова, Є. О. Антипов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 194, ч. 1. – С. 119–123.
5. Радько І. П. Температурне поле в композиційних тілах циліндричної форми при наявності внутрішніх джерел / І. П. Радько // Вісник ХНТУСГ ім. В. Василенка. – 2012. – № 129. – С. 45–47.
6. Лут М. Т. Рекомендації з підвищення якості енергозабезпечення, енергоощадності та енергоефективності в Національному аграрному університеті / Лут М. Т., Міщенко А. В., Радько І. П. – К. : НАУ, 2005. – 39 с.

References

1. Barbelyuk, S. B., Golikova, S. G., Didik [et al.] (2007). Pravove rehuliuвання enerhozberezhennia v Yevropeiskomu Soiuzi ta v Ukraini (porivnialno-pravove doslidzhennia) [Legal regulation of energy saving in the European Union and Ukraine (comparative legal study)]. Kyiv, Ukraine, 165.
2. Prakhovnyk, A. V., Prokopenko, V. V., Deshko, V. I. (2010). Praktychnyi posibnyk z enerhozberezhennia dlia ob'iektiv promyslovosti, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [A Practical Guide to Energy Saving for Industrial, Construction, and Housing Of Ukraine]. Kyiv, 696.
3. Kozyrskyi, V. V., Bereka, O. M., Shelimanova, O. V., Antypov, Ie. O. (2012). Rezultaty sproshchenoho enerhoaudytu ob'iektiv NUBiP Ukrainy: [elektronnyi resurs] [Results of simplified energy audit of objects of NUBiP of Ukraine: [electronic resource]]. Enerhetyka i avtomatyka, № 1 (11), 55–63. Available at: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/e-journals/eia/2012_1/12kvvonu.pdf.
4. Mishchenko, A. V., Shelimanova, O. V., Antypov Ie. O. (2014). Analiz teplovoho komfortu u prymyshchenniakh navchalnoho korpusu №8 NUBiP Ukrainy pislia termomodernizatsii budivli [Analysis of thermal comfort in premises of educational building № 8 of NUBiP of Ukraine after thermo-modernization of the building]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy, 194 (1), 119–123.
5. Radko, I. P. (2012). Temperaturne pole v kompozytsiinykh tilakh tsylindrychnoi formy pry naiavnosti vnutrishnikh dzherel [Temperature field in

composite bodies of cylindrical shape in the presence of internal sources]. Visnyk KhNTUSH im. V. Vasylenka, 129, 45–47.

6. Lut, M. T., Mishchenko, A. V., Radko I. P. (2005). Rekomendatsii z pidvyshchennia yakosti enerhozabezpechennia, enerhooshchadnosti ta enerhoefektyvnosti v Natsionalnomu ahrarnomu universyteti [Recommendations on Improving the Quality of Energy Supply, Energy Efficiency and Energy Efficiency at the National Agrarian University]. Kyiv: NAU, 39.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ

**И. П. Радько,
В. А. Наливайко,
А. В. Окушко,
А. В. Мищенко,
Е. А. Антипов**

Аннотация. Целью исследования был поиск возможных путей улучшения энергосбережения и определение направлений эффективного энергопотребления.

Проанализирован вопрос состояния проблемы экономии энергетических ресурсов в вузе. Для решения которой предложен ряд основных организационно-технических мер, способствующих повышению энергоэффективности и энергосбережения в зданиях вузов. Приведены некоторые результаты по внедрению таких мероприятий.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективность, энергетические ресурсы, энергосберегающая технология, мероприятия

ENHANCEMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS IN HIGHER EDUCATIONAL STAFF

**I. Radko,
V. Nalivayko,
O. Okushko,
A. Mischenko,
I. Antipov**

Abstract. The aim of the study was to find possible ways to improve energy conservation and identify areas for effective energy use.

The article analyzes the state of the problem of energy resources saving in universities. For the solution of which a number of basic organizational and technical measures, which will promote energy efficiency and energy saving in the buildings of universities. Some results from the implementation of such activities are presented.

Keywords: energy saving, energy efficiency, energy resources, energy saving technology, measures

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ КАТЕГОРІЙНО-ФУНКТОРНОГО АНАЛІЗУ

М. А. СИЧ, кандидат технічних наук, асистент
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: sm.nuft@gmail.com

Анотація. У сучасних умовах актуальною є розробка теорії керування структурною динамікою складних технологічних систем. Дана теорія дає можливість вирішити проблему багатоструктурного синтезу складних технологічних систем на різних етапах їх життєвого циклу з позиції єдиних управлінських рішень.

Як базові принципи, покладені в основу даної теорії, було обрано принципи полімодельності та багатокритеріальності, що використовувалися під час комплексного опису та дослідження задач аналізу і синтезу інтелектуальних інформаційних технологій моніторингу та керування структурною динамікою складних технологічних систем. Формалізацію даних процесів доцільно здійснювати на основі структурно-математичного і категорійно-функторних підходів, розроблених у сучасній математиці.

На основі категорійно-функторного аналізу досліджено структурні особливості об'єкта в динаміці, які ситуаційно проявляються у взаємозв'язку, структуровані показники та зв'язки між ними, що значно підвищує ефективність прийняття рішень в умовах невизначеності. Розглянуто проблеми формалізації знань в основу яких покладено математичні теорії категорій та функторів для цукрового виробництва. Опис функторів здійснено у вербальній формі, у вигляді продукційних правил. Проведені дослідження в перспективі дають можливість побудувати сценарії керування технологічним комплексом цукрового заводу.

Ключові слова: технологічний комплекс, цукровий завод, категорійно-функторний аналіз, продукційні правила

Актуальність. Технологічні комплекси (ТК) неперервного типу, зокрема ТК цукрового заводу, з точки зору задач керування, відрізняються багатовимірністю. Варто також відзначити, що ТК цукрового заводу наявні всі характерні ознаки складної організаційно-технологічної системи. Такі об'єкти керування являють собою сукупність різних підсистем, зв'язаних між собою процесами інтенсивної взаємодії та обміну енергією, речовиною та інформацією. Ці підсистеми є нелінійними, багатомірними та складнозв'язаними [1].

Враховуючи вищенаведені особливості функціонування ТК цукрового заводу, постає необхідність розгляду структурних особливостей об'єкта в динаміці, що в результаті може становити основу для розробки ефективних стратегій керування цукровим виробництвом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Опис організаційно-технічних систем, які містять множину елементів, включає синтез конструктивної математичної моделі, що дає змогу враховувати множину неформалізованих, випадкових впливів, які, у свою чергу, діють на процес функціонування системи [2, 3]. Категорійно-функторний підхід передбачає проектування системи на деяку сукупність "споріднених" нею систем і за властивостями проекцій дає можливість формулювати внутрішню структуру досліджуваної системи [4]. При цьому необхідно відзначити, що, якщо існує інваріантність способів опису різних об'єктів, результати не залежать від засобів опису, а об'єкт залишається цілісним [5].

Сучасні методи досліджень, такі як, категорійно-функторний аналіз, враховуючи складність технологічних процесів та мінливість досліджуваних параметрів, слід використати для технологічного комплексу цукрового заводу.

Мета дослідження – підвищення якості проходження технологічних процесів на ТК цукрового заводу, шляхом комплексного підходу до керування на основі категорійно-функторного підходу

Матеріали і методи дослідження. Для оцінки ефективності рішень щодо керування ТК доцільним є використання цільового аналізу виробничих ситуацій. У процесі проведення поточного цільового аналізу виробничих ситуацій одночасно вирішуються три задачі: формування класів ситуацій; віднесення поточної ситуації до одного зі сформованих класів; спрямований пошук умов компенсації відхилень за заданими показниками поточної ситуації.

Реалізація першої задачі здійснюється на підставі опрацювання статистичних даних про роботу підприємства за минулий період, які повинні включати інформацію про технічний стан устаткування, технологічні умови роботи і відхилення за експлуатаційними показниками, що характеризує виробничі ситуації.

Під час опрацювання статистики варто також враховувати вплив керуючих рішень на результати роботи підприємства в минулому й взаємозв'язки між виникаючими ситуаціями. Крім статистичних даних, при розрахунках використовуються якісні ознаки, які формулює технолог, виходячи із цілей ситуаційного регламентування [4, 6].

Показники, що характеризують конкретну ситуацію, вимірюються різними чисельними методами і вимірювальними засобами. Результати таких вимірювань становлять суми вигляду:

$$X_{ijk} = a_i + b_{ij} + y_{ijk}, \quad i = I, \dots, J; \quad j = I, \dots, Y; \quad k = I, \dots, K, \quad (1)$$

де y_{ijk} – випадкова помилка k -го вимірювання;

a_i – істинне значення вимірюваної величини;

b_{ij} – систематична помилка при вимірюванні.

Фактори впливу на параметри проблемних ситуацій та їх ефективність можна визначити на основі перевірки гіпотези відсутності впливу параметрів суміжних ситуацій. При цьому критерієм є дисперсійне відношення:

$$F = \sigma_1 / \sigma_2, \quad (2)$$

де σ_1 – дисперсія параметрів ситуацій, одержуваних після реалізації управлінських рішень;

σ_2 – дисперсія параметрів, що характеризують суміжні ситуації.

Якщо F суттєво відрізняється від 1, гіпотеза не підтверджується, тобто параметри і фактори впливу визначені правильно. Точне значення поняття значущої відмінності F від 1 можна сформулювати тільки лише з урахуванням знання закону розподілу випадкових помилок. Запропонований цільовий аналіз виробничих ситуацій дає можливість описати процес прийняття рішень математично, створювати високоадаптивні алгоритми керування, формувати управлінські впливи в стандартних ситуаціях, давати оцінку якості прийнятих рішень і професійних навичок фахівців [5].

Результати досліджень та їх обговорення. Якість роботи дифузійної станції характеризується якісними показниками дифузійного соку та втратами цукру в процесі висолоджування. Якщо доброякісність дифузійного соку не нижче, ніж 88 %, то він вважається нормальної якості. Величина рН дифузійного соку повинна бути в межах 6,0–6,2, а сік повинен містити мінімум пульпи.

Втрати цукру складаються з втрат цукру з жомом і неврахованих втрат. На втрати цукру впливають такі фактори: товщина стружки, поверхня, величина відбору соку, температура і час екстрагування. При правильній роботі апаратів і дотриманні технологічного режиму (температурного, дезінфекції буряка і стружки в апараті), невраховані втрати можна знизити до 0,05 % до маси буряка.

Вищезазначене дає змогу зробити висновок, що якість готового продукту (дифузійний сік), сировини (стружка) та сокостружкової суміші можна розглядати як складну систему за допомогою структурно-алгебраїчних методів, заснованих на категорійно-функторному підході.

Це можна пояснити тим, що в дефініціях "категорія" – "якість" поєднуються властивості системності та інтегрованості. У теорії категорій та функторів визначення властивостей системи здійснюється не на основі розгляду її елементів, а через зовнішні зв'язки, тобто елементи повністю визначаються тільки своїми зв'язками з іншими елементами. Така постановка зумовлена тим, що за допомогою графових конструкцій можна пояснити складні зв'язки окремих показників якості.

На рис. 1 подано процес перетворення функторів для дифузійного відділення.

У категорії множин усі однозначні відображення є морфізмами, і в цьому випадку вони дозволяють порівнювати об'єкти, знаходити в них схожі (ізоморфні) елементи. Об'єктами категорії можуть бути не тільки математичні моделі системи, але й фізичні процеси (виробництво,

проекування і т.д.). У цьому разі, морфізмами будуть реальні відносини між цими об'єктами. Категорія вважається заданою, якщо визначений клас об'єктів представлених структурованими множинами, а також відповідна множина морфізмів між ними.

На рис. 2 представлено процес перетворення функторів для сокоочисного відділення.

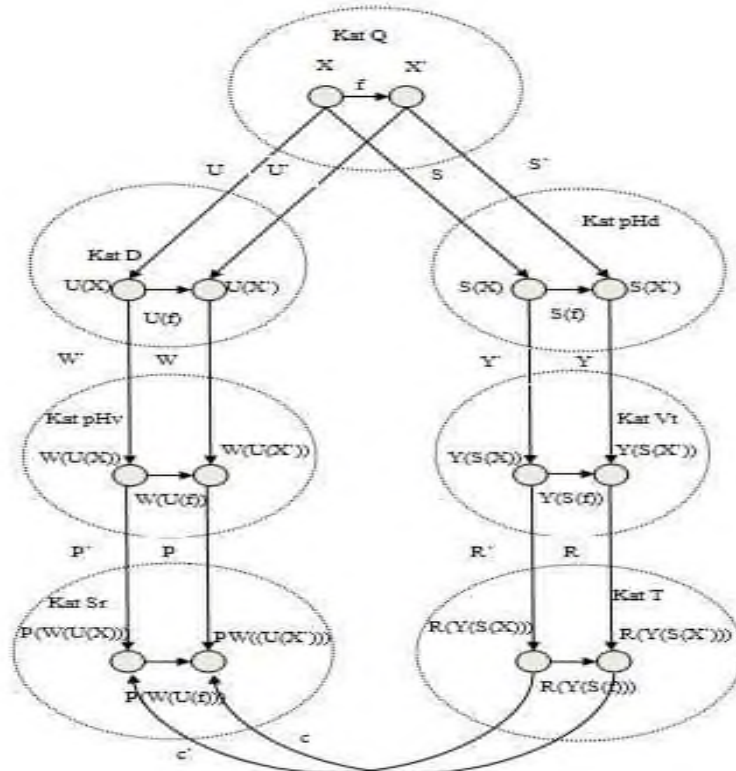


Рис. 1. Процес перетворення функторів для одержання дифузійного соку: Kat Q – категорія «доброякісність дифузійного соку», Kat D – «категорія дигестія»; Kat pHv – категорія «значення pH живильної води»; Kat Sr – категорія «сухі речовини»; Kat pHd – категорія «значення pH дифузійного соку»; Kat Vt – категорія «втрати цукру в жомі»; Kat T – категорія «тривалість процесу екстракції».

S, U – функтори, що відповідають об'єктам X та X' та морфізму f категорії «Kat Q» та зіставляють елементи даної категорії з елементами категорії «Kat D» та категорії «Kat pHd», відповідно; Y, W – функтори, що відповідають об'єктам та морфізмам категорій «Kat D» та категорії «Kat pHd», та зіставляють елементи цих категорій з елементами категорій «Kat pHv» та категорій «Kat Vt», відповідно; R, P – функтори, що відповідають об'єктам та морфізмам категорій «Kat pHv» та «Kat Vt» та зіставляють елементи цих категорій з елементами категорій «Kat Sr» та категорії «Kat T», відповідно; $S(X)$, $S(X')$, $S(f)$ – образи: об'єкти та морфізми категорії «Kat pHd»; $U(X)$, $U(X')$, $U(f)$ – образи: об'єкти та морфізми категорії «Kat D»; $Y(S(X))$, $Y(S(X'))$, $Y(S(f))$ – образи: об'єкти та морфізми категорії «Kat Vt»; $W(U(X))$, $W(U(X'))$, $W(U(f))$ – образи: об'єкти та морфізми категорії «Kat pHv»; $R(Y(S(X)))$, $R(Y(S(X')))$, $R(Y(S(f)))$ – образи: об'єкти та морфізми категорії «Kat T»; $P(W(U(X)))$, $P(W(U(X')))$, $P(W(U(f)))$ – образи: об'єкти та

морфізми категорії «Kat Sr»; c, c' – морфізми, що зв'язують об'єкти $Y(S(X)), Y(S(X'))$ з $W(U(X)), W(U(X'))$, відповідно.

Умова морфізму функторів для c, c' буде виконуватися при:
 $c' \oplus R(Y(S(f))) = P(W(U(f))) \oplus c$.

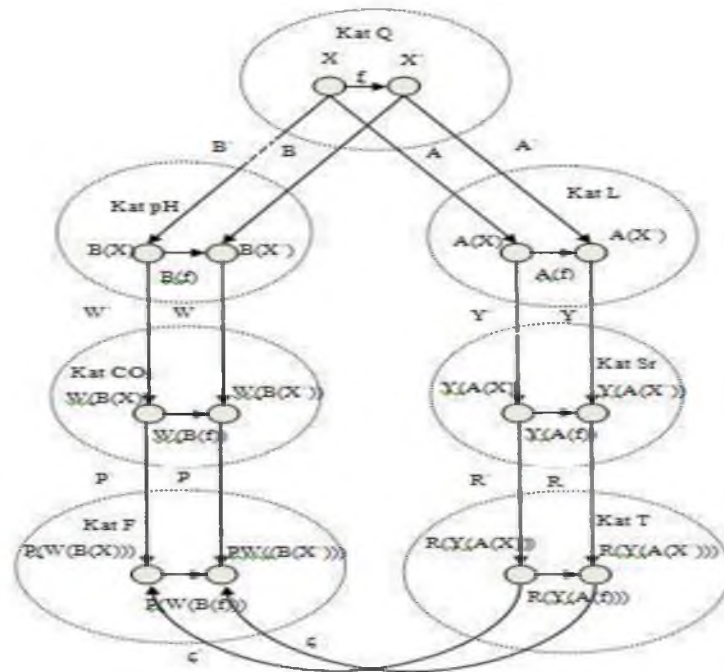


Рис. 2. Процес перетворення функторів для очищення дифузійного соку

У вигляді продукційних правил здійснено опис функторів у вербальній формі (рис. 3). При цьому ситуацію було визначено як :

$$S(t) = J^{(i)}(x^{(i)}(t_i), y^{(i)}(t_i), t_i) \quad 0 \leq t_i \leq t, i = 0, 1, \dots, s; t_0 = 0, \quad (3)$$

де $J = (x(t), y(t), t)$ – очікувана подія;

i – кількість подій, що характеризують дану ситуацію;

t – момент часу, в який визначається ситуація відповідно до продукційних правил вибору $\overline{A}^{(t)}$;

$x(t), y(t)$ – реалізація нечітких значень, відповідно, вхідних та вихідних змінних, отриманих в момент часу t .

- ❖ If (витрата бурякової стружки is норма) and (дигестія is норма) and (температура дифузійного соку is норма) and (витрата дифузійного соку is норма) and (сухі речовини is норма) and (значення рН дифузійного соку is норма) and (доброякісність is норма) (значення рН живильної води is норма) and (тривалість процесу екстракції is норма) then (втрати цукру в жомі is низькі)
- ❖ If (витрата бурякової стружки is норма) and (дигестія is норма) and (температура дифузійного соку is висока) and (витрата дифузійного соку is норма) and (сухі речовини is низькі) and (значення рН дифузійного соку is норма) and (доброякісність is низька) (значення рН живильної води is низьке) and (тривалість процесу екстракції is норма) then (втрати цукру в жомі is високі)
- ❖ If (витрата бурякової стружки is норма) and (дигестія is висока) and (температура дифузійного соку is норма) and (витрата дифузійного соку is висока) and (сухі речовини is норма) and (значення рН дифузійного соку is норма) and (доброякісність is норма) (значення рН живильної води is норма) and (тривалість процесу екстракції is норма) then (втрати цукру в жомі is норма)

Рис. 3. Фрагмент одержаних продукційних правил для ТК цукрового заводу

Стан $I(t)$ у момент часу t є набором ситуацій в поточний момент часу $S(t)$ та квазіінформаційних гіпотез особи, що приймає рішення $\Theta(t)$, для якої сценарій формулюємо як послідовність ситуаційно значущих зон та квазіінформаційних гіпотез особи:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R} (I(t_i), t_i) \quad i = 0, 1, \dots, N, \quad (4)$$

де N – глибина сценарію;

$T = t_N$ – горизонт сценарію;

$\tau_i = t_{i+1} - t_i$ – часовий крок сценарію.

Висновки і перспективи. На основі категорійно-функторного аналізу досліджені структурні особливості виробництва цукру в динаміці, які ситуаційно проявляються у взаємозв'язку, що є необхідним для побудови в перспективі сценаріїв керування ТК цукрового заводу, структуровані показники та зв'язки між ними. У результаті аналізу цукрового виробництва, на засадах теорії категорій та функторів досліджено питання формалізації знань, що дало можливість здійснити опис функторів, а саме: побудувати базу продукційних правил для ТК цукрового заводу.

Список літератури

1. Системний аналіз складних систем управління / [Ладанюк А. П., Смітюх Я. В., Власенко Л. О. та ін.]. – К. : НУХТ, 2013. – 274 с.
2. Цаленко М. Ш. Основы теории категорий / М. Ш. Цаленко, Е. Г. Шульгейфер. – М. : Наука, 1974. – 256 с.
3. Ершов А. В. Элементы теории категорий / А. В. Ершов. – Саратовский государственный университет, 2003. – 63 с.
4. Шрейдер Ю. А. Системы и модели / Ю. А. Шрейдер, А. А. Шаров. – М. : Радио и связь, 1982. – 180 с.

5. Бусленко Н. П. О категорийном представлении динамических систем / Н. П. Бусленко, В. М. Симонов // Программирование. – 1976. – № 5. – С. 65–73.
6. Букур И. Введение в теорию категорий и функторов : пер. с англ. / И. Букур, А. Деляну. – М. : Мир, 1972. – 260 с.

References

1. Ladanyuk, A., Smityuh, Y., Vlasenko, L. et. al. (2013). Systemnyi analiz skladnykh system upravlinnia [System analysis of complex control systems]. Kyiv: NUFT, 274.
2. Tsalenko, M., Shul'geyfer, E. (1974). Osnovy teorii kategoriy [Fundamentals of category theory]. Moscow: Nauka, 256.
3. Ershov, A. (2003). Elementy teorii kategoriy [Elements of category theory]. Saratovskiy gosudarstvennyy universitet, 63.
4. Shreider, Yu., Sharov, A. (1982). Sistemy i modeli [Systems and models]. Moscow: Radio i svyaz', 180.
5. Buslenko, N., Simonov V. (1976). O kategoriynom predstavlennii dinamicheskikh sistem [On the categorical representation of dynamical systems]. Programirovaniye, 5, 65–73.
6. Bucur, I., Delyanu, A. (1972). Vvedeniye v teoriyu kategoriy i funktorov [Introduction to the theory of categories and functors]. Moscow: Mir, 260.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА САХАРНОГО ЗАВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАТЕГОРИЙНО-ФУНКТОРНОГО АНАЛИЗА

М. А. Сыч

Аннотация. В современных условиях актуальной является разработка теории управления структурной динамикой сложных технологических систем. Данная теория дает возможность решить проблему многоструктурного синтеза сложных технологических систем на различных этапах их жизненного цикла с позиции единых управленческих решений.

В качестве базовых принципов, положенных в основу данной теории, были выбраны принципы полимодельности и многокритериальности, которые использовались при комплексном описании, а также исследовании задач анализа и синтеза интеллектуальных информационных технологий мониторинга и управления структурной динамикой сложных технологических систем. Формализацию данных процессов, целесообразно осуществлять на основе структурно-математического и категорийно-функторного подходов, разработанных в современной математике.

На основе категорийно-функторного анализа исследованы структурные особенности объекта в динамике, которые ситуационно проявляются во взаимосвязи, структурированные показатели и связи между ними, что значительно повышает эффективность принятия решений в условиях неопределенности. Рассмотрены проблемы формализации знаний в основу которых положены математические

теории категорий и функторов для сахарного производства. Описание функторов осуществлено в вербальной форме, в виде производственных правил. Проведенные исследования в перспективе дают возможность построить сценарии управления технологическим комплексом сахарного завода.

Ключевые слова: *технологический комплекс, сахарный завод, категориально-функторный анализ, производственные правила*

RESEARCH OF THE TECHNOLOGICAL COMPLEX OF THE SUGAR REFINERY WITH THE USE OF THE CATEGORICAL-FUNCTORIAL ANALYSIS

M. Sych

Abstract. *In modern conditions, the development of a theory of development the structural dynamics of complex technological systems is topical. This theory makes it possible to implement solutions to the problem of multi-structural synthesis of complex technological systems at various stages of their life cycle from the standpoint of unified managerial solution.*

As the basic principles underlying this theory, the principles of multimodality and multicriteriality were chosen, which were used in a comprehensive description, as well as research of problems of analysis and synthesis of intelligent information technologies for monitoring and control the structural dynamics of complex technological systems. The formalization of these processes, it is advisable to implement on the basis of the structural-mathematical and categorical-functorial approaches developed in modern mathematics.

Based on the categorical-functorial analysis, the structural features of the object in the dynamics are studied, which are contextually manifested in the interrelationships, structured indicators and relationships between them, which significantly increases the efficiency of decision-making in the condition of indeterminacy. The problems of formalization of knowledge which is based on the mathematical theory of categories and functors for sugar production. Functors are described in verbal form, in the form of production rules. The carried out researches in the long term give the chance to construct scripts of control of a technological complex of a sugar refinery.

Keywords: *technological complex, sugar refinery, categorical-functorial analysis, production rules*

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННОЇ СИСТЕМИ ПІДВЕДЕННЯ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА ДО РУХОМОГО ПОЛОТНА

О. В. ШЕЛІМАНОВА, кандидат технічних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Анотація. Струминне підведення сушильного агента сприяє суттєвому підвищенню інтенсивності процесу сушіння, проте при цьому зростає і потужність, необхідна для прокачування теплоносія. Метою даного дослідження є визначення геометричних параметрів системи струмин, які забезпечили б найвищу інтенсивність теплообміну при мінімальних гідравлічних втратах. Розрахунки проведено з використанням каналної моделі процесів переносу при обтіканні поверхні системою струмин [2], яку було адаптовано до випадку струминного обтікання поверхні, що рухається [3]. У результаті дослідження встановлено оптимальні параметри струминної системи: 520 отворів перфорації діаметром $d_o = 0,015$ м; розташованих у 5 рядів з рівномірним кроком $S_1 = 0,035$ м. Така конфігурація системи струмин забезпечить підвищення коефіцієнтів тепловіддачі на 40 % при зростанні гідравлічного опору не більше, ніж на 20%.

Ключові слова: *тепломасообмін, гідравлічний опір, струминний обдув, соплова пластина*

Актуальність. Необхідність економії теплової енергії в процесах сушіння сільськогосподарської сировини при одночасному збереженні якості кінцевого продукту спонукає фахівців до пошуків способів інтенсифікації зовнішнього тепломасопереносу, серед яких одним із найефективніших є струминне обдування. Саме цей спосіб запропоновано застосувати в установці для сушіння рухомого полотна матеріалу повітрям.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як свідчать результати досліджень [1, 2] струминне обдування може забезпечити зростання коефіцієнтів тепловіддачі в 3–4 рази порівняно з поздовжнім обтіканням. Однак при цьому зростає гідравлічний опір струминної системи а, відтак, і потужність, що затрачається на прокачування теплоносія. Таким чином, постає задача оптимального вибору параметрів системи струмин.

Запропонована соплова система має дуже короткі канали для відведення повітря ($l/d_{\text{екв}} < 1$) та малу кількість рядів струменів ($n_k \leq 3$) в напрямку відведення потоку [3]. У подібних умовах, автор виконував дослід в ІТТФ НАН України, але для нерухомої теплообмінної поверхні [2]. У праці [3] узагальнюючі залежності для розрахунку теплообміну і гідравлічного опору в коротких струминних каналах було адаптовано до випадку струминного обтікання поверхні, що рухається.

Мета дослідження – вибрати геометричні параметри системи струмин, які забезпечили б найвищу інтенсивність теплообміну при мінімальних гідравлічних втратах.

Матеріали і методи дослідження. У сушарці реалізована струминна система з двобічним симетричним відведенням повітря по плоских каналах. Площина верхніх соплових отворів розташована на відстані 80 мм від полотна, що обдувається, а нижніх – на 120 мм від полотна. Таким чином, еквівалентний діаметр відвідних каналів ($d_{екв} = 2h$) дорівнює 160 мм для каналу над полотном і 240 мм – для каналу під полотном. Довжина шляху повітря до виходу соплових решіток становить $l = 110$ мм. Кількість рядів струменів за ходом руху повітря дорівнює 3.

Залежність коефіцієнта тепловіддачі від конструктивних характеристик системи, згідно з рекомендаціями [3] буде мати вигляд:

$$\alpha_c = K_c \left(1 \pm \frac{W_m}{W_\epsilon} \right)^{0,8} \cdot V^{0,8} \cdot f_o^{-0,4} \cdot B_1^{-0,52} \cdot h^{-0,08},$$

де $f_o = N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_o^2$ – відкрита поверхня перфорації:

B_l – довжина соплової решітки;

$\overline{W}_\epsilon = W_\epsilon \left(1 \pm \frac{W_m}{W_\epsilon} \right)$ – відносна швидкість повітря;

$W_\epsilon = \frac{V}{2 \cdot L_c h}$ – швидкість повітря на виході зі струминного каналу;

K_c – коефіцієнт, що об'єднує всі постійні величини та величини, які не залежать від конструктивних параметрів системи.

Відстані від соплової решітки до матеріалу h були обрані з умов оптимальної інтенсифікації теплообміну за рекомендаціями [1, 2]. Тому в подальшому аналізі h залишається незмінною.

Таким чином, реальними параметрами управління процесами теплопереносу є довжина соплових решіток B_1 і поверхня перфорації f_o , тобто кількість і діаметр отворів перфорації. При цьому зменшення B_1 приводить до зменшення довжини шляху повітря в каналі, а зменшення f_o – до збільшення швидкості струменів, а, як наслідок, до інтенсифікації теплообміну.

Результативний ефект визначатиметься загальною дією всіх параметрів, що характеризують процес тепловіддачі.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 1–3 наведено залежності гідравлічного опору й тепловіддачі струминної системи від геометричних розмірів соплової решітки для випадку обдування нерухомої поверхні.

Як видно з рис. 1, зменшення діаметра отворів перфорації з 15 до 10 мм за незмінної їх кількості, тобто, при зменшенні живого перерізу струминних решіток приводить до збільшення коефіцієнтів тепловіддачі у струминному каналі α_c (крива 2) і струминному модулі в цілому α_m (крива

3) приблизно на 40%. Втрати ж тиску, за рахунок збільшення швидкості в отворах перфорації, зростають удвічі.

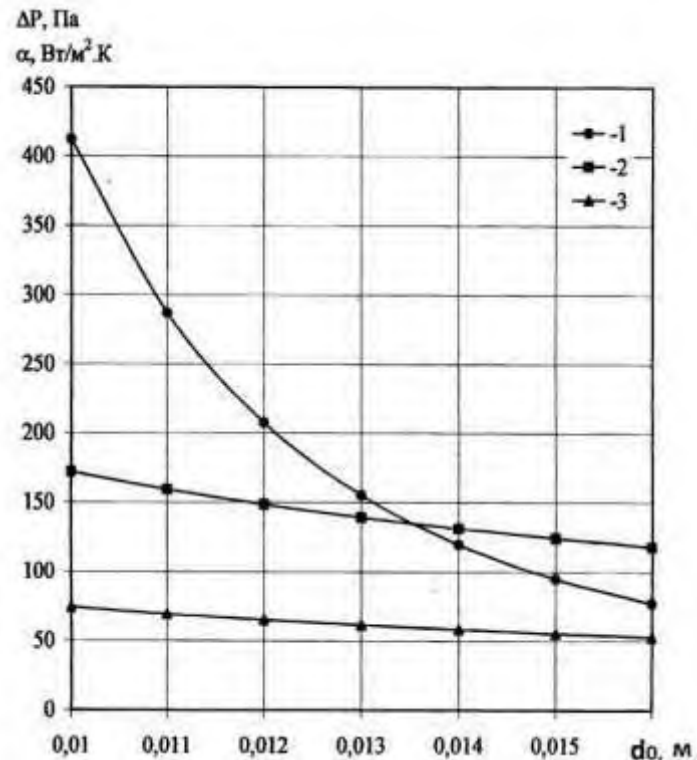


Рис. 1. Вплив діаметра отворів соплової решітки на гідравлічний опір і тепловіддачу струминної системи:

1 – ΔP ; 2 – α_c ; 3 – α_m

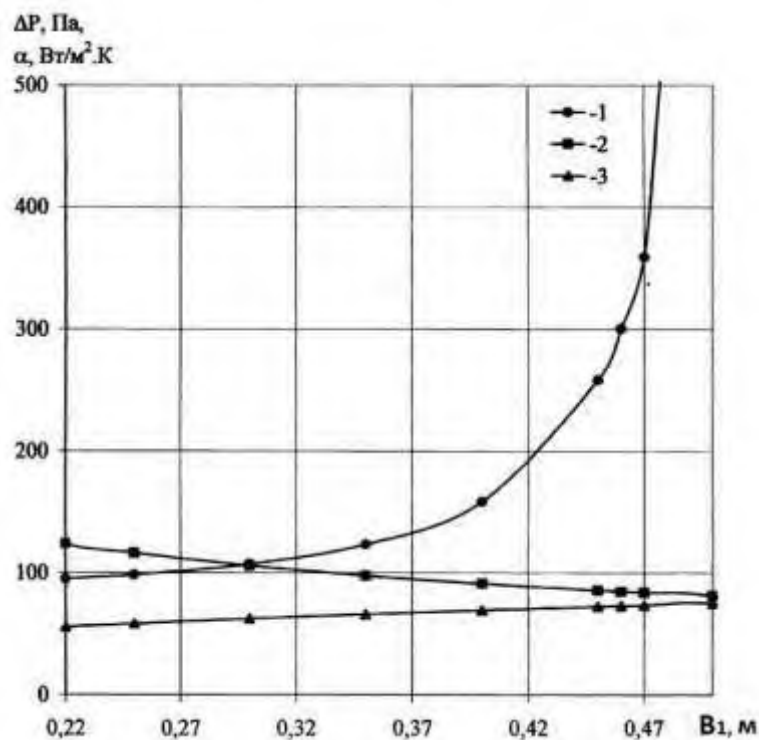


Рис. 2. Вплив довжини соплової решітки на гідравлічний опір і тепловіддачу струминної системи при $d_o = 0,015$ м і $N_1 = 5$:

1 – ΔP ; 2 – α_c ; 3 – α_m

Таким чином, зменшення діаметра отворів перфорації менше, ніж на 15 мм, є неефективним.

На рис. 2 показано вплив довжини соплових решіток на гідравлічний опір і тепловіддачу модуля при постійній поверхні перфорації f_0 , струминних решіток (при діаметрі отворів $d_0 = 0,015$ м та кількості їх рядів $N_1 = 5$).

У цьому випадку, зростання гідравлічного опору системи зумовлене збільшенням опору відвідного колектора, оскільки зі збільшенням B_1 зменшується його вихідний переріз і зростає швидкість повітря в ньому. Коефіцієнт тепловіддачі при цьому в струминному каналі зменшується (крива 2), а в модулі підвищується за рахунок збільшення тепловіддачі у відвідному колекторі (крива 3). Щоб зростання гідравлічного опору не перевершувало зростання інтенсивності теплообміну, довжина соплової решітки повинна бути не більше, ніж 0,36 м.

Зміна гідравлічного опору та інтенсивності теплообміну при одночасному збільшенні довжини соплової решітки й кількості рядів струменів при постійному кроці між отворами $S_1 = 0,035$ м, показано на рис. 3. У цьому випадку, на кривій залежності гідравлічного опору від довжини решіток спостерігається мінімум при $B_1 = 0,3$ м (крива 1).

Коефіцієнт тепловіддачі в струминному каналі (крива 2) монотонно зменшується, а в струминному модулі – залишається, практично, постійним.

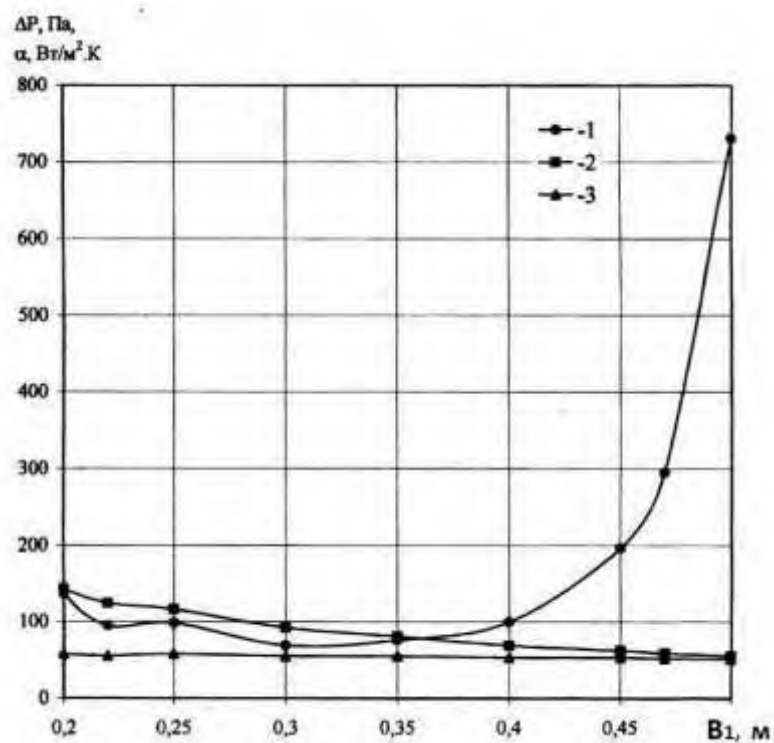


Рис. 3. Вплив довжини соплової решітки на гідравлічний опір і тепловіддачу струминної системи при $S_0 = 0,035$ м:

1 – ΔP ; 2 – α_c ; 3 – α_m

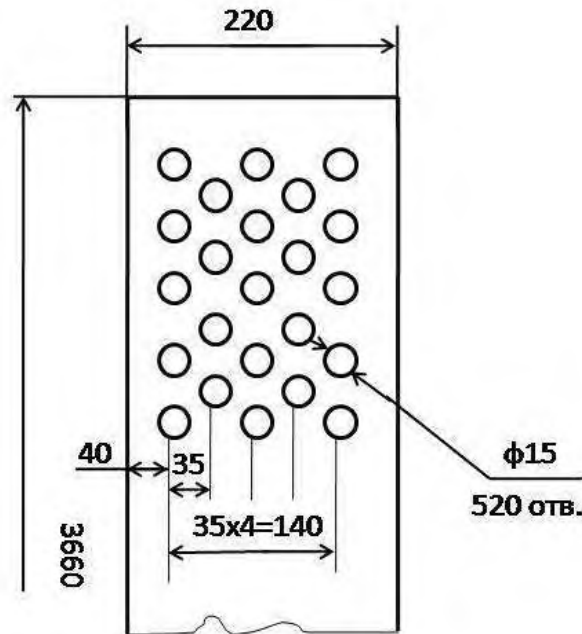


Рис. 4. Схема розташування соплових отворів

Висновки і перспективи. Отже, визначено оптимальні параметри струминної системи, які забезпечать підвищення коефіцієнтів тепловіддачі на 40 % при помірному (до 20 %) зростанні гідравлічного опору, а саме:

- діаметр отворів перфорації $d_o = 0,015 \text{ м}$;
- кількість отворів – 520;
- відкрита поверхня перфорації $f_o = 0,0918 \text{ м}^2$;
- крок розташування отворів $S_1 = 0,035 \text{ м}$;
- кількість рядів струмин $N_1 = 5$.

Схема розташування соплових отворів наведена на рис.4.

Список літератури

1. Дыбан Е. П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Е. П. Дыбан, А. И. Мазур. – К. : Наук. думка, 1982. – 303 с.
2. Дыбан Е. П. Струйное охлаждение оребренных поверхностей полуматриц гофраторов / Е. П. Дыбан, А. И. Мазур, Е. В. Шелиманова // Промышленная теплоэнергетика. – 1993. – № 3. – С. 3–10.
3. Шеліманова О. В. Вдосконалення процесу соплової сушки рухомого полотна матеріалу / О. В. Шеліманова // Електронне видання „Наукові доповіді Національного аграрного університету. Технічні науки”. – 2008. – № 2 (10). – С. 18. – Режим доступу : <http://nd.nubip.edu.ua/2008-2/08sovcnd.pdf>

References

1. Dyban, E. P., Mazur, A. Y. (1982). Konvektyvnyi teploobmen pry struinom obtekannyu tel [Convective heat transfer in jet flow around bodies]. Kyiv: Naukova Dumka, 303.

2. Dyban, E. P., Mazur A. Y., Shelimanova E. V. (1993). Struinoe okhlazhdenye orebrennykh poverkhnostei polumatryts hofratorov [Jet cooling of finned surfaces of corrugator semimatrixes]. Promyshlennaia teploenerhetyka, 3, 3–10.

3. Shelimanova, O. V. (2008). Vdoskonalennia protsesu soplovoi sushky rukhomoho polotna materialu [Perfection of process of nozzle drying moving cloth of material] Elektronne vydannia „Naukovi dopovidi Natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Tekhnichni nauky”, 2 (10), 1–8. Available at: <http://nd.nubip.edu.ua/2008-2/08sovcnd.pdf>

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВЕДЕНИЯ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА К ДВИЖУЩЕМУСЯ ПОЛОТНУ

Е. В. Шелиманова

Аннотация. Струйный подвод сушильного агента способствует существенному повышению интенсивности процесса сушки, однако при этом возрастает и мощность, необходимая для прокачки теплоносителя. Целью данного исследования является определение геометрических параметров системы струй, которые обеспечили бы высокую интенсивность теплообмена при минимальных гидравлических потерях. Расчеты проведены с использованием канальной модели процессов переноса при обтекании поверхности системой струй [2], которая была адаптирована к случаю струйного обтекания движущейся поверхности [3]. В результате исследования установлены оптимальные параметры струйной системы 520 отверстий перфорации диаметром $d_0 = 0,015$ м; расположенных в 5 рядов с равномерным шагом $S_1 = 0,035$ м. Такая конфигурация системы струй обеспечит повышение коэффициентов теплоотдачи на 40 % при росте гидравлического сопротивления не более чем на 20 %.

Ключевые слова: *тепломассообмен, гидравлическое сопротивление, струйный обдув, сопловая пластина*

THE REASONING OF THE CHOICE OF THE JET SYSTEM'S PARAMETERS FOR THE DRY AGENT'S SUPPLYING TO THE MOVING CLOTH OF MATERIAL

O. Shelimanova

Abstract. Injecting the drying agent contributes to a significant increase in the intensity of the drying process, but at the same time the power required for pumping of the coolant is increasing too. The purpose of this study is to determine the geometric parameters of the jet system, which would provide the highest intensity of heat transfer with minimum hydraulic losses. The calculations were carried out using a channel model of transport processes with the flow around a surface by a system of jets [2], which was adapted to the case of jet flow around a moving surface [3]. As a result of the study, the optimal parameters of the jet system were established: 520 holes with a

diameter $d_0 = 0,015$ m, located in 5 rows with a uniform step $S_1 = 0.035$ m. This configuration of the jet system will provide an increase in the heat transfer coefficients by 40% with a hydraulic resistance increase of no more than 20 %

Keywords: *heat-mass exchange, hydraulic resistance, jet blown, nozzle plate*

УДК: 534.2

ЗВОРОТНІ ХВИЛІ ЛЕМБА У ПЛАСТИНІ КРИСТАЛУ CDS

П. П. ІЛЬІН, кандидат фізико-математичних наук, доцент

E-mail: p_ilyin@ukr.net

Анотація. Наведено результати експериментального дослідження частотної залежності фазової швидкості зворотної хвилі Лемба в пластині кристалу Cds. Зворотні хвилі мають протилежні напрями фазової та групової швидкостей. При поширенні хвиль уздовж осі шостого порядку досліджувалася симетрична мода Лемба першого порядку, в якій на критичній частоті по товщині пластини вкладається одна довжина поперечної хвилі. Вимірювалася частотна залежність фазової швидкості зворотних хвиль і також прямих хвиль, в яких напрями фазової та групової швидкостей збігаються.

Реєстрація хвиль здійснювалася за рахунок п'єзоелектричних властивостей матеріалу пластини. Зворотні хвилі збуджувалися перетворювачем з п'єзоелектричної кераміки. Визначення величини фазової швидкості хвиль проводилося шляхом вимірювання довжини хвилі Лемба фазовим методом змінної бази. Вимірювання проводилися в пластині завтовшки 0,66 мм на частотах $\sim 2,7$ МГц. Величина фазової швидкості зворотних хвиль, унаслідок дисперсії, змінювалася в межах $15 \cdot 10^3 \div 29 \cdot 10^3$ м/с. Доведено існування зворотної пружної хвилі Лемба в пластині Cds. Це може бути використано для реалізації взаємодії зворотних пружних хвиль та пружних хвиль з нульовою груповою швидкістю з носіями електричного заряду у п'єзоелектричному напівпровіднику.

Ключові слова: *хвилі Лемба, зворотні хвилі*

Актуальність. Зворотні пружні хвилі, які мають протилежно спрямовані фазову та групову швидкості, є цікавими об'єктом досліджень через свої дещо незвичайні властивості [1]. Вони також мають перспективи для застосування в акустоелектроніці та дефектоскопії, оскільки можуть мати широкий діапазон зміни значень фазової швидкості при незначній дисперсії групової швидкості. Останнім часом робляться спроби використовувати

пружні хвилі з нульовою груповою швидкістю та скінченною фазовою швидкістю. Такі хвилі є перехідними між зворотними хвилями і прямими хвилями (в яких напрями фазової та групової швидкостей збігаються). Їх пропонується використовувати для вирішення різних проблем, зокрема для створення нових акустоелектронних приладів [2].

Необхідною і достатньою умовою існування хвилі з нульовою груповою швидкістю є існування зворотної хвилі. На сьогодні існування зворотних хвиль в п'єзоелектричних матеріалах експериментально підтверджено лише для трьох мод Лемба в LiNbO_3 [3–5] та для однієї моди Лемба в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ [6], які є діелектриками. У п'єзоелектричних напівпровідниках можна використати взаємодію пружних коливань з носіями електричного заряду. Але у таких матеріалах зворотні хвилі досі не спостерігалися.

Мета дослідження – встановлення існування зворотних хвиль Лемба та частотної залежності їх фазової швидкості в пластинах п'єзоелектричного напівпровідника сульфіду кадмію CdS . Цей матеріал використовується в акустоелектронних приладах.

Матеріали і методи дослідження. Досліджувалося розповсюдження хвиль Лемба в пластині CdS . Пластина була орієнтована вздовж осі шостого порядку [001] і мала товщину $2h=0,66$ мм. Хвилі Лемба поширювалися вздовж осі [001]. Досліджувалася симетрична мода Лемба першого порядку s_1 , в якій на критичній частоті по товщині пластини вкладається одна довжина поперечної хвилі зі зміщеннями в напрямі [001]. Для цієї моди вимірювалися фазові швидкості як зворотних, так і прямих хвиль (в яких напрями фазової та групової швидкостей збігаються). Теоретичні розрахунки, наведені в літературі [7], свідчать про можливість існування зворотних хвиль моди s_1 у пластині CdS .

Схема експерименту наведена на рис. 1. Для збудження прямої хвилі Лемба високочастотна напруга прикладалася до металевих електродів 2, нанесених симетрично на протилежні поверхні пластини CdS 1 (рис. 1, а). Для збудження зворотної хвилі був використаний п'єзокерамічний перетворювач 4 (рис. 1, б) з резонансною частотою 2,75 МГц, виготовлений з кераміки ЦТБС-3, розмірами $16 \times 4,5 \times 0,38$ мм³ із напрямом поляризації вздовж середнього розміру. При прикладанні змінної напруги в напрямі найменшого розміру у п'єзоелементі виникали поперечні коливання. На поверхні пластини створювалися зміщення в напрямі [001].

Хвилі у п'єзоелектричному матеріалі супроводжуються високочастотним електричним полем, тому реєстрація хвиль здійснювалася рухомим електродом 3, який міг пересуватися поверхнею пластини за допомогою мікрометричного гвинта; ця методика застосовувалася в працях [3–5]. Поглинач пружних хвиль 5, виготовлений зі стеарину, запобігав виникненню відбитих хвиль. Дослідження проводилися в імпульсному режимі в частотному діапазоні $2,64 \div 2,80$ МГц при тривалості радіоімпульсів $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ с.

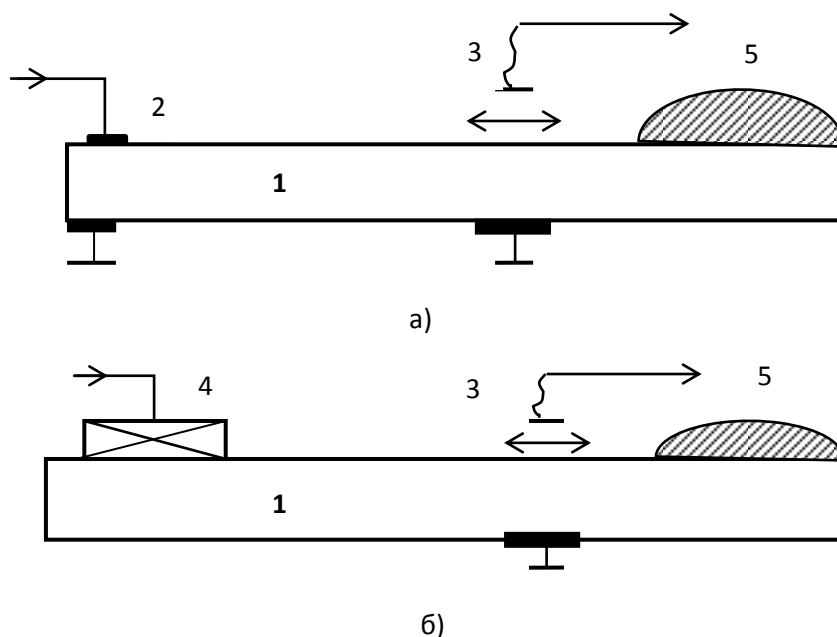


Рис. 1. Схема збудження та вимірювання швидкості прямих (а) та зворотних (б) пружних хвиль

Фазова швидкість хвилі v – це швидкість переміщення фази хвилі у певному напрямі. У випадку гармонічної хвилі $v = \frac{\omega}{k} = f\lambda$,

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число;

λ – довжина хвилі;

$\omega = 2\pi f$ – циклічна частота;

f – частота хвилі.

З цього випливає, що для вимірювання v необхідно виміряти f та λ .

Для вимірювання v було використано фазовий метод змінної бази [8]. Він ґрунтується на тому, що зміна відстані L між джерелом хвиль та приймачем викликає зміну часу поширення хвилі та, відповідно, зміну фази коливань на приймачі. Зміні відстані на λ відповідає зміна фази на 2π . Як опорний сигнал для фазового детектора використовується вихідний сигнал височастотного генератора, який збуджує хвилю. Вимірювання зміни фази з точністю до 1° забезпечувала компенсаційна схема, яка містила вимірювальний фазообертач. Як фазовий детектор використовувався двоканальний осцилограф, який працював у режимі додавання сигналів. Відносна похибка визначення довжини хвилі й величини фазової швидкості, не перевищувала 1 %.

В експериментальних дослідженнях хвилі переносять енергію від джерела хвиль і мають додатну групову швидкість. Тоді зворотні хвилі мають від'ємну фазову швидкість, тобто спрямовану до джерела хвиль.

Напря́м, то́бто знак, фазової швидкості визначався при зміні відстані L між джерелом хвиль та приймачем на величину, напевне, меншу від половини довжини хвилі. Наприклад, при збільшенні відстані, різниця фаз між опорним сигналом та пружною хвилею, що пройшла відстань L , зростає для прямої хвилі та зменшується для зворотної хвилі. Знак фазового зсуву визначався за допомогою фазообертача, який було включено до компенсаційної схеми.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 2 наведені експериментальні результати вимірювань частотних залежностей фазових швидкостей прямої та зворотної хвиль симетричної моди Лемба першого порядку s_1 .

Наведені залежності безрозмірної швидкості v/v_t від безрозмірної частоти $\Omega = k_t h = \frac{\omega}{v_t} h = \frac{2\pi f}{v_t} h$,

де f – частота хвилі;

h – половина товщини пластини;

$v_t = 1,76 \cdot 10^3$ м/с – швидкість поперечних хвиль у напрямках, перпендикулярних до осі шостого порядку.

Для зворотної хвилі $v < 0$, оскільки її фазова швидкість спрямована до джерела хвиль. Для прямої хвилі $v > 0$, оскільки її фазова швидкість спрямована від джерела хвиль. Критична частота $f_c = 2,68$ МГц відповідала значенню $\Omega_c = 3,196$ [7]. Величина фазової швидкості зворотних хвиль внаслідок дисперсії змінювалася в межах $15 \cdot 10^3 \div 29 \cdot 10^3$ м/с. У проведених дослідженнях зворотних хвиль мінімальні втрати на подвійне перетворення становили 75 дБ на частоті 2,66 МГц.

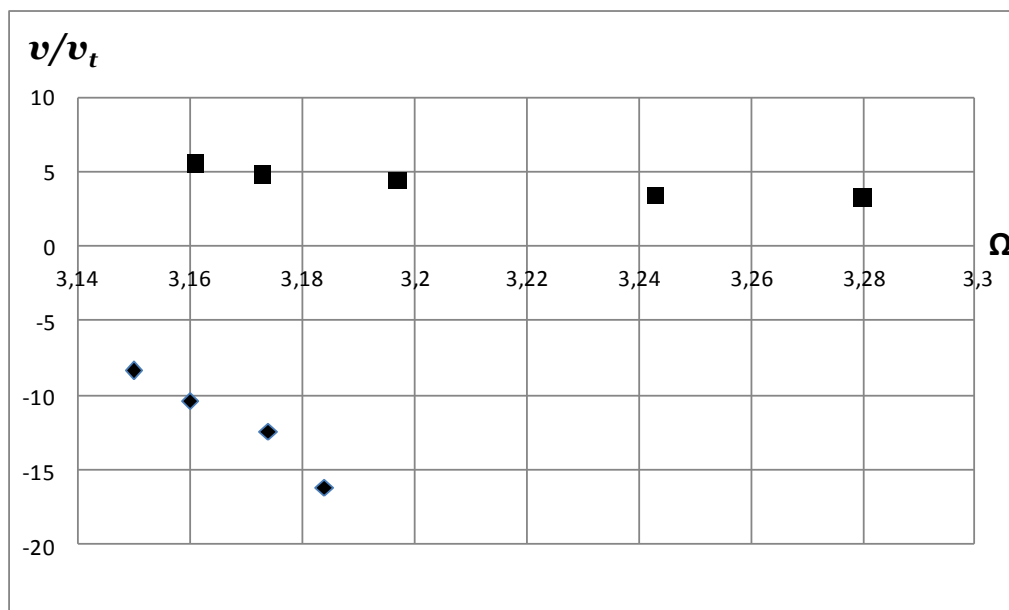


Рис. 2. Дисперсійні залежності фазової швидкості v зворотних та прямих хвиль симетричної моди Лемба першого порядку в пластині CdS

Висновки і перспективи. Експериментально підтверджено існування зворотних пружних хвиль Лемба в пластині кристалу CdS. З цього випливає існування пружних хвиль з нульовою груповою швидкістю в таких пластинах. Оскільки CdS є п'єзоелектричним напівпровідником, це робить можливою реалізацію взаємодії зазначених хвиль з носіями електричного заряду та використання цієї взаємодії в акустоелектронних приладах.

Список літератури

1. Гринченко В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. – К. : Наукова думка, 1981. – 284 с.
2. Yantchev, V. Thin-film zero-group-velocity Lamb wave resonator / V. Yantchev, L. Arapan, I. Katardjiev, V. Plessky // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 99, issue 3, 033505. doi: 10.1063/1.3614559.
3. Бурлий П. В. Обратные упругие волны в пластинах / П. В. Бурлий, И. Я. Кучеров // *Письма в ЖЭТФ.* – 1977. – Т. 26, вып. 9. – С. 644–647.
4. Одновременное возбуждение и исследование обратных и прямых упругих волн / П. В. Бурлий, Ю. П. Гололобов, И. Я. Кучеров, С. Х. Рожко // *Украинский физический журнал.* – 1979. – Т. 29, № 12. – С. 1905–1907.
5. Ільїн П. П. Експериментальне дослідження зворотних хвиль Лемба у пластині кристалу ніобата літію / П. П. Ільїн // *Енергетика та автоматика.* – 2017. – № 4. – С. 181–189.
6. Бурлий П. В. Обратные волны Лэмба в пьезоэлектриках кубической симметрии / П. В. Бурлий, П. П. Ильин, И. Я. Кучеров // *Украинский физический журнал.* – 1987. – Т. 32, № 3. – С. 440–443.
7. Бурдакова А. В. Влияние пьезоэффекта на распространение волн Лэмба в кристаллах CdS, CdSe и ZnO / А. В. Бурдакова, И. Я. Кучеров, В. М. Перга // *Украинский физический журнал.* – 1973. – Т. 18, № 6. – С. 965–972.
8. Бражников Н. И. Ультразвуковая фазометрия / Н. И. Бражников. – М. : Энергия, 1968. – 272 с.

References

1. Grinchenko, V. T., Meleshko, V. V. (1981). *Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugikh telakh* [Harmonic vibrations and waves in elastic bodies]. Kiev: Naukova Dumka, 284.
2. Yantchev, V., Arapan, L., Katardjiev, I., Plessky V. (2011). Thin-film zero-group-velocity Lamb wave resonator. *Appl. Phys. Lett.* 99 (3), 033505. doi: 10.1063/1.3614559.
3. Burlii, P. V., Kucherov I. Ya. (1977). *Obratnie uprugie volni v plastinah* [Backward elastic waves in plates]. *Letters to Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 26 (9), 644–647.
4. Burlii, P. V., Gololobov, Yu. P., Kucherov, I. Ya., Rozhko, S. Kh. (1979). *Odnovremennoe возбуждение i issledovanie obratnyh i pryamyh uprugih voln* [Simultaneous excitation and investigation of backward and forward elastic waves]. *Ukrainian journal of physics*, 29 (12), 1905–1907.
5. Il'in, P. P. (2017). *Eksperimental'ne doslidzhennya zvorotnikh khvil' Lemba u plastini kristalu niobata litiju.* [Experimental investigation of backward Lamb waves in plate of lithium niobate crystal]. *Energetics and automatics*, 4, 181–189.
6. Burlii, P. V., Il'in, P. P., Kucherov, I. Ya. (1987). *Obratnye volny Lemba v p'ezoelektrikakh kubicheskoi simmetrii* [Backward Lamb waves in piezoelectric with cubic symmetry]. *Ukrainian journal of physics*, 32 (3), 440–443.

7. Burdakova, A. V., Kucherov, I. Ya., Perga, V. M. (1973). Vliyaniye p'ezoeffekta na rasprostraneniye voln Lemba v kristallakh CdS, CdSe i ZnO [The influence of piezoeffect on Lamb waves propagation in CdS, CdSe and ZnO crystals]. Ukrainian journal of physics, 18 (6), 965–972.

8. Brazhnikov, N. I. (1968). Ul'trazvukovaya fazometriya [Ultrasonic phaseometry]. Moscow: Energiya, 228.

ОБРАТНЫЕ ВОЛНЫ ЛЭМБА В ПЛАСТИНЕ КРИСТАЛЛА CDS

П. П. Ильин

Аннотация. Приведены результаты экспериментального исследования частотной зависимости фазовой скорости обратных волн Лэмба в пластине кристалла Cds. Обратные волны имеют противоположные направления фазовой и групповой скоростей. При распространении волн вдоль оси шестого порядка была исследована симметричная мода Лэмба первого порядка, у которой на критической частоте по толщине пластины укладывается одна длина поперечной волны. Измерялась частотная зависимость фазовой скорости обратных волн, а также прямых волн, у которых направления фазовой и групповой скоростей совпадают.

Регистрация волн осуществлялась за счет пьезоэлектрических свойств материала пластины. Обратные волны возбуждались преобразователем из пьезоэлектрической керамики. Определение величины фазовой скорости волн проводилось путем измерения длины волны Лэмба фазовым методом переменной базы. Исследования проводились в пластине толщиной 0,66 мм на частотах ~2,7 МГц. Величина фазовой скорости обратных волн вследствие дисперсии изменялась в пределах $15 \cdot 10^3 \div 29 \cdot 10^3$ м/с. Доказано существование обратной упругой волны Лэмба в пластине Cds. Это может быть использовано для реализации взаимодействия обратных упругих волн и упругих волн с нулевой групповой скоростью с носителями электрического заряда в пьезоэлектрическом полупроводнике.

Ключевые слова: волны Лэмба, обратные волны

BACKWARD LAMB WAVES IN CDS CRYSTAL PLATE

P. P. Il'in

Abstract. The results of the experimental research of frequency dependency of the phase velocity of backward Lamb wave in CdS crystal plate are presented. Those waves have opposite directions of the phase and group velocities. Under wave propagation along axis of sixth order the symmetrical Lamb mode of first order was investigated. The one length of shear wave fit the plate thickness at cutoff frequency of this mode.

For this mode the frequency dependence of phase velocity of backward wave, and also of forward wave (its directions of phase and group velocities

coincide), were measured. Detecting of waves was carried out with using piezoelectric properties of the plate material. Excitation of backward Lamb wave was excited with piezoelectric ceramic transducer. The determination of the phase velocity of the waves was performed by measuring of the wavelength with the phase method of variable base. The measurements were carried out in plate with thickness 0,66 mm at frequencies $\sim 2,7$ MHz. The observed value of phase velocity of backward wave was varied in region $15 \cdot 10^3 \div 29 \cdot 10^3$ m/s. The existence of backward Lamb wave in CdS plate is proved. This fact may be used to realize the interaction of charge carriers with backward elastic waves and elastic waves with zero group velocity.

Keywords: Lembe wave, reverse waves

УДК 535.372

КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ МІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ ЦЕЛЮЛОЗИ ТА ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ОКСИДІВ: ВЛАСТИВОСТІ Й НАПРЯМ ЗАСТОСУВАННЯ

В. В. БОЙКО, кандидат фізико-математичних наук, доцент

В. П. ЧОРНИЙ, кандидат фізико-математичних наук

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

В. А. БАРБАШ, кандидат хімічних наук, доцент

О. В. ЯЩЕНКО, аспірант

*Національний університет «Київський
політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського*

О. М. АЛЕКСЄЄВ, кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Ю. Є. ГРАБОВСЬКИЙ, кандидат фізико-математичних наук, доцент

С. Г. НЕДІЛЬКО, доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Є. О. РЕЗНИЧЕНКО, студент

В. П. ЩЕРБАЦЬКИЙ, провідний інженер

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

М. С. НЕДЄЛЬКО, провідний інженер

Інститут електрозварювання ім. О. Є. Патона НАН України

E-mail: vchornii@gmail.com

Анотація. Подано результати люмінесцентно-спектроскопічних досліджень композитів, що складаються з мікрокристалічної целюлози та оксидів – AgNO_3 , $\text{K}_2\text{Eu}(\text{PO}_4)(\text{MoO}_4)$ та $\text{LaVO}_4\text{:Sm}$. Встановлено, що

© В. В. Бойко, В. П. Чорний, В. А. Барбаш, О. В. Ященко, О. М. Алексєєв,
Ю. Є. Грабовський, С. Г. Неділько, Є. О. Резниченко, В. П. Щербацький,
М. С. Неделько, 2018

люмінесцентні властивості целюлози залежать від типу вихідної рослинної сировини та способу обробки, що проявляється в різній інтенсивності свічення, однак профіль спектрів фотолюмінесценції (ФЛ) залишається практично незмінним. Максимум неелементарної смуги ФЛ целюлози лежить близько 490 нм при збудженні на 405 нм.

Композити, що містили нітрат аргентуму, в цілому, виявляли подібний профіль смуги ФЛ з максимумом при 490 нм, але із більш інтенсивною короткохвильовою частиною. Композити, що містили $K_2Eu(PO_4)(MoO_4)$ та $LaVO_4:Sm$ характеризуються інтенсивною видимою ФЛ при збудженні в діапазоні 337–532 нм, спектр якої залежить від довжини хвилі збудження. Показано, що нанесення люмінесцентного покриття «мікрокристалічна целюлоза»+ $K_2Eu(PO_4)(MoO_4)$ на комерційний світлодіод з $\lambda_{випр} = 455$ нм дає змогу одержати біле світло з блакитним відтінком (колірні координати $x = 0,262$; $y = 0,224$).

Ключові слова: мікрокристалічна целюлоза, люмінесценція, оксид, рідкісноземельний іон

Актуальність. Створення новітніх композиційних матеріалів на основі полімерів та неорганічних матеріалів є одним із важливих напрямів сучасного матеріалознавства. При розгляді таких композитів зазвичай говорять про полімерну матрицю та наповнювач, а їх вибір диктується необхідними фізичними характеристиками. Серед полімерних матриць особливе місце займає целюлоза – найпоширеніший природний полімер, який можна одержати із різноманітних джерел рослинної сировини.

Щодо неорганічного наповнювача, то в цій праці було обрано кілька оксидних матеріалів, які є люмінесцентно-активними. Створені таким чином композити можуть бути придатними для застосувань як люмінесцентні покриття в сучасних оптоелектронних приладах. Целюлозні волокна, що містять специфічні люмінесцентні сполуки, можуть бути ефективними модифікаторами текстильних виробів, документів на паперовій та пластиковій основі. Суттєвою перевагою оксидних люмінесцентних сполук, як наповнювачів, є їх стабільність і те, що їх важко вилучити зі складу целюлозних волокон, навіть застосувавши спеціальну обробку [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Варто зазначити, що целюлоза та матеріали на її основі не досить часто використовуються, або ж вивчаються, як оптичні системи, або системи, де використовуються оптичні явища. На сьогодні відомі деякі приклади подібного застосування. Це стосується, зокрема, розробки дозиметрів сонячного випромінювання на основі композиційної структури, що складається з органічного барвника, оксиду титану (TiO_2), як фотокаталізатора, та полівінілпіролідона, як речовини зв'язування.

Зазначені складові наносяться на целюлозну матрицю (папір) за допомогою друкування. Під дією світла, завдяки фотокаталітичній реакції оксиду титану, залежно від тривалості опромінення та довжини хвилі світла, має місце втрата густини кольору барвника. Рівень втрати кольору можна контролювати на око, або ж інструментально, шляхом вимірювання

коефіцієнта відбивання світла композитом в ультрафіолетовому (УФ) або видимому діапазонах сонячного випромінювання [2].

Можна згадати і ряд інших розробок і досліджень властивостей композиційних матеріалів на основі целюлози, де саме оптичні люмінесцентні характеристики є тими, що визначають перспективи використання таких матеріалів та напрям дослідження їх властивостей. Такого типу композити одержували різними способами. Серед них такі, як друкування, нанесення покриття, або ж навпаки, введення деяких функціональних люмінесцентних добавок до целюлозної матриці. Наприклад, композит на основі целюлози, який виявляє люмінесцентні властивості, було виготовлено шляхом однокрокового гідротермічного відновлення окисованого графіту до графену; після чого на поверхню цих листів було нанесено нанорозмірні (< 10 nm) люмінесцентні частинки (квантові точки) ZnS [3].

Важливим є те, що, за даними авторів, нанесення квантових точок не призвело до руйнування структури і морфології волокон. Люмінесценція описаного композиту спостерігалася в смузі з максимумом в околі 466 nm, якщо її збуджували світлом із довжиною хвилі 320 nm. У цій системі ефективність люмінесценції зростала внаслідок послаблення агрегації квантових точок дворозмірною площиною графену та особливостей переносу електронів у ньому.

Мета дослідження – розробка наноструктурованих композитів на основі целюлози, як матриці, і деяких складних оксидів, як наповнювачів, та з'ясування їх люмінесцентних характеристик, що має підтвердити прогнози щодо можливості їх практичного застосування.

У цій праці ми наведемо дані щодо люмінесцентних характеристик целюлози та МКЦ, синтезованих в лабораторних умовах на кафедрі екології та технології рослинних полімерів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Ці дані порівнюються з аналогічними характеристиками комерційної МКЦ та композиційних матеріалів, виготовлених на її основі методом холодного пресування [4, 5]. Основну увагу тут приділено властивостям виготовлених нами композиційних зразків, які визначають можливість їх використання як, так званих, люмінесцентних конверторів світла (ЛСК) – тонкоплівкових покриттів, що наносяться на поверхню світлодіода, або ж кремнієвого сонячного елемента.

Таке ЛСК покриття поглинає випромінювання діода або сонячне світло з фіолетово-синього діапазону, 350–450 nm, і трансформує його у люмінесцентне випромінювання жовто-червоного діапазону, 575–700 nm. Нанесення ЛСК, у випадку світлодіода, дає змогу створити джерело «білого» світла, а, у випадку сонячних елементів, – дозволяє підвищити їх енергоефективність, адже сонячне випромінювання з діапазону 350–450 nm погано перетворюється кремнієвими елементами в електричний струм.

Матеріали і методи дослідження. У праці досліджувалися декілька серій зразків. Серія А, що складалася з 5-ти зразків (А1, А2, ..., А5) – це порошкоподібні матеріали, одержані з однієї рослинної речовини – волокон конопель – на різних стадіях процедури синтезу МКЦ. Серія В, що складалася

з 6-ти зразків (B1, B2, ..., B6), – це МКЦ, одержана з різних представників вітчизняних рослин: волокон льону, конопель, кенафу, стебел соломи, кукурудзи і міскантусу. Методику одержання із них МКЦ описано в праці [6].

Для виготовлення зразків серії С та D, як стартовий матеріал, використовували таблетки комерційної МКЦ, які виробляє фірма ANCYR-B (Україна). Спочатку, таблетки МКЦ було розмелено й дисперговано за допомогою ротаційно-планетарного млина. Далі, однакові частини одержаного порошку, масою $\sim 0,5$ г, змішувалися з певною кількістю попередньо підготовленого порошку оксиду. Композиційні зразки в серії С містили аргентум нітрат, AgNO_3 . Зразок композиту «МКЦ+ AgNO_3 », де кількість AgNO_3 становила 30 мг, нижче позначено як C/Ag.

Процедура виготовлення зразків серії D дещо відрізнялася від попередньої. Тут суміш диспергованої МКЦ та оксиду розчинялася в 50 мл етанолу високої чистоти і піддавалася обробці ультразвуком (частота, $f = 4,2$ кГц, тривалість обробки, $t = 20$ хв.). Після цього, одержана суспензія витримувалася протягом 30 хвилин, рідина зливалася, а видалений осад фільтрувався через фільтрувальний папір і осушувався в атмосфері оточення за температури 60°C . Порошки сумішей всіх серій пресувалися в таблетки у вигляді диску діаметром ~ 10 мм і завтовшки ~ 1 мм. При цьому, зразки серій А та В було одержано під тиском $1,8 \cdot 10^4$ кПа/м², а зразки серії С та D – під тиском 580 кПа/м². Зразки, виготовлені з диспергованої МКЦ, які не містять оксиду, позначаються як O/O, а всі інші: D/Назва відповідного оксиду/Вміст оксиду в мг.

Характеристики люмінесцентного випромінювання та спектрів збудження люмінесценції досліджувалися в УФ та видимому діапазонах світла з використанням лазерно-спектральних комплексів ЛСК-1 та ЛСК-2. До складу комплексів входять спектральні монохроматори ДФС-12, МДР-2, ДМР-4, призначені для реєстрації люмінесцентного випромінювання та селекції випромінювання збудження, набір лазерних випромінювачів, що перекривають діапазон випромінювання збудження від ультрафіолетового до інфрачервоного світла; джерела суцільного за спектром випромінювання збудження: ксенонові лампи ДКС-150 та ДКСел-1000. За допомогою цих комплексів люмінесцентні властивості можна досліджувати в діапазоні довжин хвиль збудження, λ_{ex} , 225 – 800 нм та в діапазоні довжин хвиль реєстрації свічення, λ_{reg} , 300–1200 нм.

Результати досліджень та їх обговорення. У спектрах ФЛ виготовленої нами МКЦ, незалежно від її походження і передісторії, при збудженні УФ та фіолетовим світлом ($\lambda_{\text{ex}} = 325 - 450$ нм) спостерігається широка структурна смуга (рис. 1). У діапазоні видимого світла, у цій смузі можна виділити щонайменше три досить інтенсивних компоненти, які лежать у межах 375–500, 450–550, 525–625 та 625–725 нм (рис. 1). Найбільш інтенсивним є компонент синьо-зеленого випромінювання, 450–550 нм, у межах якого і лежить максимум спектральної смуги ФЛ, $\lambda_{\text{max}} = \sim 490$ нм, при її збудженні з $\lambda_{\text{ex}} = 405$ нм.

Наведені на рис. 1 спектри ФЛ зразків на стадіях підготовки МКЦ та «чистої» МКЦ показують, що передісторія зразків, а отже і їх склад, структура

і морфологія певним чином відбиваються в характеристиках люмінесценції. Дійсно, легко помітити, що спектри різних зразків, наведені для прикладу на рис. 1, відрізняються формою, а отже, відносним внеском компонентів та інтенсивністю. Оксидний наповнювач також відіграє певну роль, що показує відмінність кривої 5 на рис. 1, яка відповідає випромінюванню композиту «МКЦ+AgNO₃», від спектрів «чистої» МКЦ (рис. 1, криві 3, 4).

Характеристики отриманої ФЛ є подібними до тих, що повідомлялися раніше в літературі щодо свічення МКЦ, композитів МКЦ із різними оксидами, або ж різного типу матеріалів на основі целюлози [4]. Тому ми маємо можливість стверджувати, що спостережене випромінювання пов'язане з люмінесцентними процесами в самій матриці МКЦ. Зазвичай вважається, що існує декілька джерел ФЛ целюлози, якими є молекулярні флуорофори, що належать целюлозним матрицям. На жаль, питання стосовно їх походження і ролі конкретних молекулярних складових МКЦ або її похідних (наприклад, карбонільних груп) до кінця не з'ясоване. Водночас, роль у люмінесцентних процесах деяких молекулярних радикалів, наприклад, гідроксильних груп, розташованих на поверхні целюлозних волоконць, раніше вже обговорювалася.

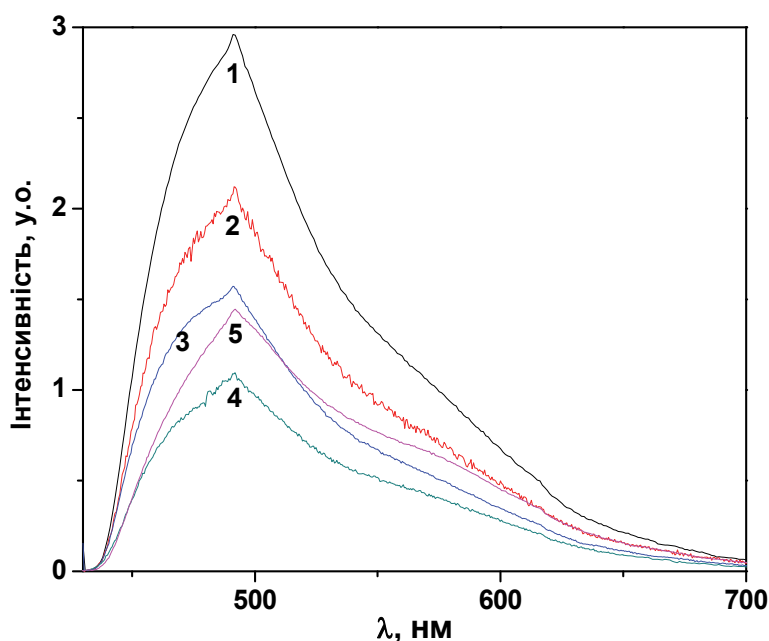


Рис. 1. Спектри люмінесценції зразків А2 (1), А3 (2), А5 (3), В6 (4) та композиту С/AgNO₃ (5). $\lambda_{\text{ex}} = 405$ нм; $T = 300$ К

Композити «МКЦ+оксид», у випадку, коли оксидна сполука у своєму складі містить люмінесцентно активні центри типу іонів рідкісноземельних елементів (Eu³⁺, Sm³⁺ тощо), характеризуються яскравою люмінесценцією при збудженні ультрафіолетовим або видимим випромінюванням. Спектри ФЛ таких композиційних зразків суттєво залежать від довжини хвилі збудження (рис. 2). Так, при короткохвильовому збудженні ($\lambda_{\text{ex}} = 325\text{--}405$ нм) у спектрах ФЛ переважає синьо-зелене випромінювання, характерне для описаного вище свічення целюлозної матриці. Використання більш

довгохвильового збудження веде до зростання інтенсивності довгохвильових компонентів ФЛ і зміщення максимуму смуги свічення в довгохвильовий бік спектра та появи лінійчатих спектрів, характерних для випромінювання іонів – європію, Eu^{3+} та самарію, Sm^{3+} , у твердотільних матрицях [4].

Часткова карбонізація композитів шляхом піролізу також впливає на їх спектрально-люмінесцентні властивості. Після відпалу за відносно невисоких температур 150...200 °С інтенсивність ФЛ іонів РЗЕ суттєво зменшується, тоді як інтенсивність короткохвильового широкосмугового випромінювання зростає. Природу цього явища важко описати на цій стадії досліджень, однак, слід зазначити, що зростання інтенсивності свічення в короткохвильовій області може бути зумовлено проявом свічення, притаманного деяким вуглецевим матеріалам [4]. Слід сподіватися, що зміна співвідношення інтенсивності свічення іонів РЗЕ та МКЦ матриці внаслідок піролізу може бути використана для управління спектральним складом свічення виготовлених нами композитів.

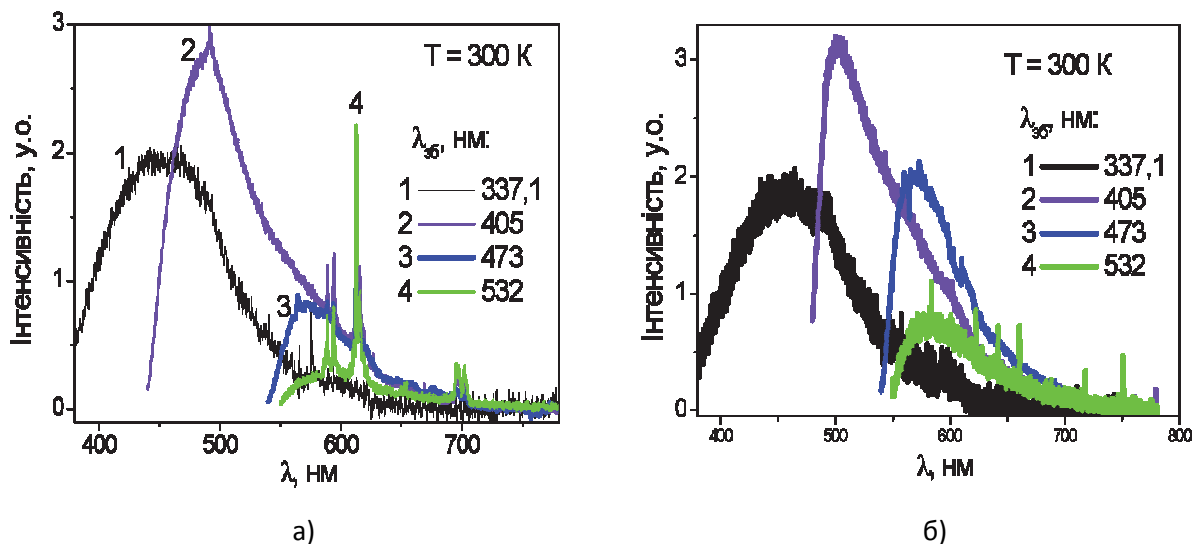


Рис. 2. Спектри ФЛ композитів $\text{D/K}_2\text{Bi(PO}_4\text{)(MoO}_4\text{):Eu/100$ (а) та $\text{D/LaVO}_4\text{:Sm/10}$ (б); довжини хвиль збудження зазначено на рисунку

Целюлозно-оксидні композити як ЛСК для світлодіодів. На поверхню комерційних світлодіодів (СД) двох типів ми нанесли шар композиту «МКЦ + $\text{K}_2\text{Eu(PO}_4\text{)(MoO}_4\text{)}$ » завтовшки ~ 0,9 мм та складом: 500 мг МКЦ/100 мг оксиду. Як джерела світла використовувалися сині СД з довжиною хвилі та максимальною потужністю випромінювання $\lambda_1 = 445$ нм, $P_1 \sim 1$ Вт та $\lambda_2 = 463$ нм, $P_2 \sim 0,03$ Вт. На рис. 3, для прикладу, наведено нормовані спектри випромінювання СД та системи «СД+композит».

Як видно з рисунку, сумарний спектр такої модельної системи складається зі смуги випромінювання самого СД, і спектра люмінесценції композиту: широка смуга свічення МКЦ та набір вузьких ліній свічення іонів європію.

Розрахунок, на основі спектрів рис. 3, кольорних координат свічення дослідженої системи показав, що вони змінюються від координат свічення СД: $x = 0,157$; $y = 0,018$ (темно-синій колір), до значень: $x = 0,262$; $y = 0,224$, за

наявності ЛСК, що наближає випромінювання дослідженої системи до координат стандарту білого кольору ($x = 0,333$; $y = 0,333$), однак, тим не менше, не може вважатися таким. Світло від системи «СД+композит» візуально є білим з блакитним відтінком, що також свідчить про недостатню інтенсивність випромінювання в жовто-червоній спектральній області.

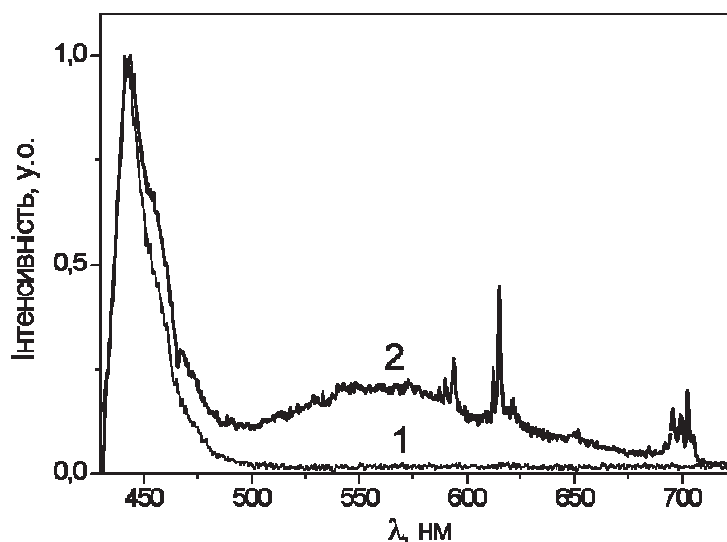


Рис. 3. Нормовані спектри ФЛ світлодіода (1) та системи «СД+композит». Композит: «МКЦ - $K_2Eu(PO_4)(MoO_4)/100$ »

Отже, у майбутньому мають бути проведені подальші дослідження з метою покращення колірних характеристик випромінювання системи «базовий світлодіод + ЛСК на основі мікрокристалічної целюлози + люмінесцентний оксид». Покращити характеристики передбачається шляхом підбору іншого люмінесцентно активного оксиду.

Висновки і перспективи. Виготовлені методом холодного пресування композиційні зразки, де матрицею є мікрокристалічна целюлоза (МКЦ), а наповнювачем – сполуки складних оксидів $AgNO_3$, $LaVO_4:Sm,Eu$ та $K_2Bi(PO_4)(MoO_4):Eu$, характеризуються інтенсивною фотолюмінесценцією у видимому світлі, спектр якої складається із широкої смуги свічення целюлози та набору вузьких ліній, зумовлених випромінюванням іонів рідкісноземельних елементів (РЗЕ) Європію, Eu^{3+} та самарію, Sm^{3+} .

Співвідношення інтенсивності свічення МКЦ та іонів РЗЕ залежить від вмісту оксиду у складі композиту. Карбонізація композитів шляхом піролізу також впливає на інтенсивність компонентів свічення. Згадані фактори відкривають можливості керування спектральним складом фотолюмінесценції.

Результати досліджень є основою для подальших розробок на основі досліджених целюлозно-оксидно-вуглецевих гібридних композитів люмінесцентних конвертерів фіолетового та синього світла комерційних світлодіодів і створення, тим самим, на їх основі світлодіодів «білого» випромінювання.

Список літератури

1. Kulpinski P. et al. Luminescent cellulose fibers modified with cerium fluoride doped with terbium particles //Polymer Composites. – 2016. – Vol. 37. – №. 1. – P. 153–160.
2. Khiabani P. S. et al. Paper-based sensor for monitoring Sun exposure //ACS Sensors. – 2016. – Vol. 1. – №. 6. – P. 775–780.
3. Bian Y., He B., Li J. Preparation of cellulose-based fluorescent materials using Zinc sulphide quantum dot-decorated graphene by a one-step hydrothermal method //Cellulose. – 2016. – Vol. 23. – №. 4. – P. 2363–2373.
4. Nediello M. et al. Mechanical, dielectric, and spectroscopic characteristics of “micro/nanocellulose+ oxide” composites //Nanoscale research letters. – 2017. – Vol. 12. – №. 1. – P. 98.
5. Barbash V. A. et al. Development of technology of microcrystalline cellulose from hemp fibres //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 3/6. – P. 51–56.
6. Барбаш В. А., Нагорна Ю. М. Технологія одержання мікрокристалічної целюлози із недеревної рослинної сировини / Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2015. – № 2. – С. 119–124.

References

1. Kulpinski, P., Erdman, A., Grzyb, T., & Lis, S. (2016). Luminescent cellulose fibers modified with cerium fluoride doped with terbium particles. Polymer Composites, 37 (1), 153–160.
2. Khiabani, P. S., Soeriyadi, A. H., Reece, P. J., & Gooding, J. J. (2016). Paper-based sensor for monitoring Sun exposure. ACS Sensors, 1 (6), 775–780.
3. Bian, Y., He, B., & Li, J. (2016). Preparation of cellulose-based fluorescent materials using Zinc sulphide quantum dot-decorated graphene by a one-step hydrothermal method. Cellulose, 23 (4), 2363–2373.
4. Nediello, M., Hamamda, S., Alekseev, O., Chornii, V., Dashevskii, M., Lazarenko, M., ... & Scherbatskyi, V. (2017). Mechanical, dielectric, and spectroscopic characteristics of “micro/nanocellulose+ oxide” composites. Nanoscale Research Letters, 12 (1), 98.
5. Barbash, V.A., Karakutsa, M.G., Trembus, I.V., Yaschenko O.V. (2016) Development of technology of microcrystalline cellulose from hemp fibres. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/6, 51–56.
6. Barabash, V. A., Nagorna, Yu. M. (2015) Tekhnolohiia oderzhannia mikrokrystalichnoi tseliulozy iz nederevnoi rosllynnoi syrovyny [Technology of microcrystalline cellulose derivation from non-wood plant raw material] / Naukovi visti NTUU «KPI», 2, 119–124.

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ОКСИДОВ: СВОЙСТВА И НАПРАВЛЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

**В. В. Бойко,
В. П. Чорний,
В. А. Барбаш,
О. В. Яценко,
О. М. Алексеев,**

Ю. Е. Грабовский,
С. Г. Неделько,
Е. О. Резниченко,
В. П. Щербацкий,
М. С. Неделько

Аннотация. Представлены результаты люминесцентно-спектроскопических исследований композитов, состоящих из микрокристаллической целлюлозы и оксидов – AgNO_3 , $\text{K}_2\text{Eu}(\text{PO}_4)(\text{MoO}_4)$ и $\text{LaVO}_4\text{:Sm}$. Установлено, что люминесцентные свойства целлюлозы зависят от типа исходного растительного сырья и способа обработки, что проявляется в разной интенсивности свечения. При этом профиль спектров фотолюминесценции (ФЛ) остается практически неизменным. Максимум неэлементарной полосы ФЛ целлюлозы лежит около 490 нм при возбуждении на 405 нм.

Композиты, которые содержали нитрат серебра, в целом, проявляли подобный профиль полосы ФЛ с максимумом при 490 нм, но с более интенсивной коротковолновой частью. Композиты, которые содержали $\text{K}_2\text{Eu}(\text{PO}_4)(\text{MoO}_4)$ и $\text{LaVO}_4\text{:Sm}$ характеризуются интенсивной видимой ФЛ при возбуждении в диапазоне 337–532 нм, спектр которой зависит от длины волны возбуждения. Показано, что нанесение люминесцентного покрытия «микрокристаллическая целлюлоза»+ $\text{K}_2\text{Eu}(\text{PO}_4)(\text{MoO}_4)$ на коммерческий светодиод с $\lambda_{\text{изл}} = 455$ нм позволяет получить белый свет с голубым оттенком (цветовые координаты $x = 0,262$; $y = 0,224$).

Ключевые слова: микрокристаллическая целлюлоза, люминесценция, оксид, редкоземельный ион

COMPOSITES BASED ON MICROCRYSTALLINE CELLULOSE AND LUMINESCENT OXIDES: PROPERTIES AND A WAY OF APPLICATION

V. Boyko,
V. Chornii,
V. Barbash,
O. Yashchenko,
A. Alekseev,
Yu. Hrabovskyi,
S. Nedilko,
E. Reznichenko,
V. Shcherbatskyi,
M. Nediello

Abstract. The results of luminescent spectroscopic studies of composites that consist of microcrystalline cellulose and oxides – AgNO_3 , $\text{K}_2\text{Eu}(\text{PO}_4)(\text{MoO}_4)$ and $\text{LaVO}_4\text{:Sm}$ are reported. It was established the luminescence properties of cellulose are dependent on type of plant raw

materials as well as on processing methods. These factors have influence on luminescence intensity but profile of photoluminescence (PL) bands remains practically unchanged. A maximum of non-elementary PL band is located near 490 nm for case of excitation at 405 nm.

Composites with argentums nitrate revealed similar shape of PL band with maximum at 490 nm but with more intensive short-wavelength side of the band. Under excitation in 33–532 nm spectral region the composites that contain $K_2Eu(PO_4)(MoO_4)$ and $LaVO_4:Sm$ are characterized by intensive visible photoluminescence. Spectra of these PL depend on excitation wavelength. It is shown the combination of luminescent coating “microcrystalline cellulose” + $K_2Eu(PO_4)(MoO_4)$ and commercial light emitting diode with $\lambda_{em} = 455$ nm allow to obtain bluish white light (chromaticity coordinates are $x = 0.262$; $y = 0.224$).

Keywords: microcrystalline cellulose, luminescence, oxide, rare-earth ion

УДК 535.3

ВПЛИВ АДСОРБЦІЙНОГО ШАРУ МЕТАЛЕВИХ ЧАСТИНОК НА РОЗСІЯННЯ СВІТЛА

С. В. СТЕЦЕНКО, старший викладач
Національний університет біоресурсів
і природокористування України
E-mail: sstetsenko@i.ua

Анотація. Розглянуто сучасний стан досліджень взаємодії електромагнітного випромінювання з металевими наночастинками та дисперсними системами на їх основі. Проаналізовано деякі чисельні результати з даної тематики, отримані за останні роки. Наведено результати досліджень впливу адсорбційного шару металевої частинки сферичної форми на посилення комбінаційного розсіяння світла молекулами в зовнішньому електричному полі. Проаналізована в даній роботі методика дає можливість вивчати стан окремих груп, що знаходяться на поверхні частинок та їх комплексів. Це особливо важливо, оскільки величезна кількість процесів відбувається саме на границі розподілу фаз.

Ключові слова: малі частинки, адсорбційний шар, поляризованість, комбінаційне розсіяння, коефіцієнт посилення

Актуальність. Актуальність дослідження діелектричних та спектральних характеристик гетеросистем з металевими включеннями розміром порядку 5–15 нм зумовлена рядом властивостей цих систем та

© С. В. Стеценко, 2018

активним їх використанням у сучасних технологіях для задач діелектричної та оптичної спектроскопії поверхні, оптичного запису інформації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті «Електродинамічний відгук малих частинок на електромагнітне випромінювання» [2] авторів О. Ю. Грищук, Н. Г. Шкода, С. В. Стеценко аналізується питання впливу поверхневих шарів металевих частинок на формування спектрів розсіяння, поглинання та екстинкції. Властивості частинок та дисперсних систем на їх основі можуть бути зумовлені поляризовністю їх складових. У статті «Вплив адсорбційного шару металевих частинок на їх поляризованість та розсіяння світла» [3] авторів О. Ю. Грищук, С. В. Стеценко розглядається задача взаємодії електромагнітного випромінювання з малими металевими частинками, яка зводиться до розрахунку її поляризованості, що залежить від частоти ω коливань електромагнітного поля. Значення поляризованості дають можливість визначати частоти поверхневих збуджень металевої кульки як із адсорбційним шаром, так і без нього.

Мета дослідження – аналіз впливу адсорбційного шару металевої частинки сферичної форми на посилення комбінаційного розсіяння світла на адсорбованих молекулах у зовнішньому електричному полі.

Матеріали і методи дослідження. Отримані результати [3] дають змогу оцінювати вплив адсорбційного шару металевої частинки сферичної форми на посилення комбінаційного розсіяння F світла на адсорбованих молекулах у зовнішньому електричному полі. Фактор F більше, ніж 10^6 , і значною мірою залежить від розміру частинок. Звичайно, сильну залежність F від розміру частинок пов'язують з відхиленням форми частинок від сферичної.

Посилення комбінаційного розсіяння світла молекулами на малій сферичній частинці можна подати у вигляді:

$$F(\omega_1, \omega_2) = 1 + 2 \left(R/R_o \right)^3 \alpha(\omega_1)^2 \left[1 + 2 \left(R/R_o \right)^3 \alpha(\omega_s)^2 \right], \quad (1)$$

де ω_1 – частота лазерного випромінювання;

ω_s – частота комбінаційного розсіяння;

$R_o \approx R$ – положення молекули.

Якщо частоти поверхневих збуджень, які виникають унаслідок взаємодії з електромагнітним випромінюванням, близькі до ω_1, ω_s , обидва множники у правій частині рівняння (1) можуть досягати великих значень. Наслідком цього є значне збільшення коефіцієнта підсилення. Частоти поверхневих збуджень дуже залежать від природи частинки, її розміру та характеристик поверхневого шару. Генерація локалізованих поверхневих плазмонів на поверхні металу забезпечує посилення світла з речовиною, що призводить до посилення інтенсивності комбінаційного розсіяння.

Зробимо оцінки впливу поверхневого адсорбційного шару на коефіцієнт посилення $F(\omega_1, \omega_2)$ вважаючи, що металева частинка

описується діелектричною проникністю в гідродинамічному наближенні з частотою плазових коливань ω_p та частотою зіткнень електронів $\gamma\omega_p$. В адсорбційному шарі молекули одного сорту описуються ефективними поляризовностями в дворівневому наближенні з частотою переходу ω_o та частотою затухання $\Gamma\omega_o$. У цьому наближенні, без урахування поверхневого шару, куля має одне поверхнєве збудження, частота якого дорівнює частоті виникнення поверхневого плазмону: $\omega_1 = \omega_p / \sqrt{3}$. Частоти поверхневих збуджень металевої кулі з поверхневим шаром знаходили з рівняння:

$$\left[1 - 3 \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 \right] \left[1 - \chi^2 + \phi^2 + 4\chi^2 \phi^2 \right] = 2\sqrt{2} \chi \left[1 - \chi^2 - \phi^2 \right] \quad (2)$$

де χ, ϕ – реальна та уявна частини виразу:

$$\frac{1}{R^3} \frac{p}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^2 - 2i\Gamma \frac{\omega}{\omega_o}}, \quad (3)$$

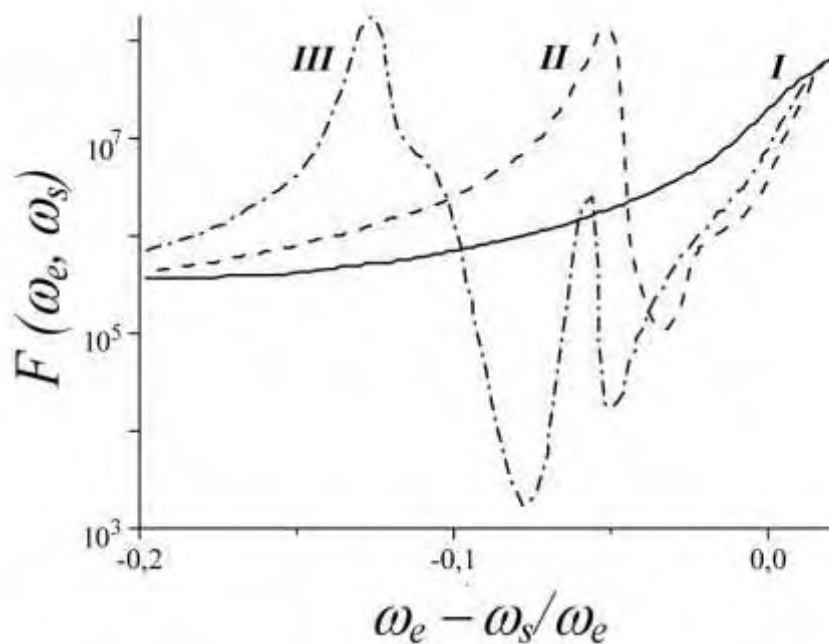
де $p = N\alpha \sqrt{2}$, N – число молекул в адсорбційному шарі;

α – поляризованість атомів або молекул поверхневого шару на нульовій частоті.

Частоти поверхневих збуджень значною мірою залежать від розміру частинки та характеристик поверхневого шару, що за певних умов може забезпечити одночасний резонанс та значне зростання коефіцієнта підсилення F .

Результати досліджень та їх обговорення. На рисунку наведено залежність коефіцієнта підсилення $F(\omega_l, \omega_s)$ від різниці частот лазерного випромінювання і комбінаційного розсіяння, $\omega_l - \omega_s$, на кулі без адсорбційного шару – I, з адсорбційним шаром при $p/R^3 = 0,01$ – II та при $p/R^3 = 0,05$ – III.

Як видно з рисунка, наявність поверхневого адсорбційного шару молекул приводить до зростання інтенсивності комбінаційного розсіяння в дисперсних системах до значень, порядку 10^9 - 10^{10} , на частотах ω_l, ω_s , а також зумовлює сильну залежність коефіцієнта посилення комбінаційного розсіяння від розміру частинки.



Залежність коефіцієнта посилення $F(\omega_e, \omega_s)$ від різниці частот $\omega_e - \omega_s$

Висновки і перспективи. Аналіз проведених розрахунків свідчить, що наявність зовнішнього електричного поля приводить до зміни електродинамічних та оптичних властивостей: перерозподілу зарядів, зсуву положення піків, зменшення інтенсивності поглинання електромагнітного випромінювання і зростання інтенсивності комбінаційного розсіяння. Це дає змогу стверджувати, що при адсорбції атомів або молекул на поверхні металевої частинки відбувається також зміна люмінесценції, поглинання та ряду нелінійних ефектів. При цьому характер такої зміни залежить від параметрів дисперсної системи, частоти збудження електромагнітного випромінювання і ступеня шорсткості поверхневого шару частинки.

Список літератури

1. Гречко Л. Г. Ефективна діелектрична проникність матричних дисперсних систем з багатошаровими включеннями: пряма та обернена задачі / Л. Г. Гречко, Л. Б. Лерман, Н. Г. Шкода // Вісник Київ. ун-ту. Серія: Фіз.-мат. науки. – 2004. – № 2. – С. 181–186.
2. Грищук О. Ю. Електродинамічний відгук малих частинок на електромагнітне випромінювання / О. Ю. Грищук., Н. Г. Шкода, С. В. Стеценко // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2014. – № 194, ч. 2. – С. 235–243.
3. Грищук О. Ю. Вплив адсорбційного шару металевих частинок на їх поляризованість та розсіяння світла / О. Ю. Грищук, С. В. Стеценко // Металофізика: новітні технології. – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 391–397.

References

1. Grechko, L. G., Lerman, L. B., Shkoda, N. G. (2004). Efektyvna dielektrychna pronyknist matrychnykh dyspersnykh system z bahatosharovymy vkluchenniamy: priama ta obernena zadachi [The effective permittivity matrix dispersed systems with multilayered inclusions: direct and inverse problems]. Visnyk Kyiv. un-tu. Serii: fiz.-mat. Nauky, 2, 181–186.
2. Grishchuk, O. Y., Shkoda, N. G., Stetsenko, S. V. (2014). Elektrodynamichniy vidhuk malykh chastynok na elektromahnitne vyprominiuvannya [Electrodynamic add small particles to electromagnetic radiation]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. Serii: tekhnika ta enerhetyka v APK, 194 (2), 235–243.
3. Grishchuk, O. Y., Stetsenko, S. V. (2014). Vplyv adsorbtsiinoho шару metalevykh chastynok na yikh poliarizovnist ta rozsiannia svitla [Influence of the adsorptive layer of metal particles on their polarizability and light scattering]. Metalofizyka: novitni tekhnolohii, 36 (3), 391–397.

ВЛИЯНИЕ АДсорбЦИОННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ НА РАССЕЯНИЕ СВЕТА

С. В. Стеценко

Аннотация. Рассмотрено современное состояние исследований взаимодействия электромагнитного излучения с металлическими наночастицами и дисперсными системами на их основе. Проанализированы некоторые численные результаты по данной тематике, полученные за последние годы. Приведены результаты исследований влияния адсорбционного слоя металлической частицы сферической формы на усиление комбинационного рассеяния света молекулами во внешнем электрическом поле. Проанализирована в данной работе методика позволяет изучать состояние отдельных групп, находящихся на поверхности частиц и их комплексов. Это особенно важно, поскольку огромное количество процессов происходит именно на границе раздела фаз.

Ключевые слова: малые частицы, адсорбционный слой, поляризуемость, комбинационное рассеяние, коэффициент усиления

INFLUENCE OF THE ADSORPTIVE LAYER OF METAL PARTICLES ON LIGHT SCATTERING

S. Stetsenko

Abstract. The current state of research on the interaction of electromagnetic radiation with metallic nanoparticles and dispersed systems based on them is considered. Some numerical results on this subject, obtained in recent years, are analyzed. The results of investigations of the influence of the adsorption layer of a metal particle of spherical shape on the enhancement of Raman scattering by molecules in an external electric field. Analyzed in this

paper, the technique makes it possible to study the state of individual groups located on the surface of particles and their complexes. This is especially important, since a huge number of processes occur precisely at the phase boundary

Keywords: *small particles, adsorptive layer, polarizability, Raman scattering, coefficient of strengthening*

УДК 515.1

ТОПОЛОГІЧНА ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ КУСКОВО-ЛІНІЙНИХ ФУНКЦІЙ

Т. Г. КРИВОРОТ, кандидат педагогічних наук
**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**
E-mail: tania.krivorot@gmail.com

Анотація. Розглянуто задачу для неперервних функцій зі скінченною кількістю екстремальних точок, заданих на відрізку та числовій осі. Показано, що в кожному класі еквівалентності таких функцій присутня невід'ємна функція, яка приймає в точках екстремумів усі цілочислові значення з множини $0, 1, 2, \dots, l$. Для повної альтернуючої послідовності визначено кусково-лінійну функцію, яка називається PL-реалізацією альтернуючої послідовності. Доведено, що кожна неперервна функція зі скінченною кількістю екстремальних точок, задана на відрізку, буде топологічно еквівалентною PL-реалізації своєї повної альтернуючої послідовності.

Визначено періодичну альтернуючу послідовність, яка будується згідно з послідовністю екстремумів неперервної функції, яка задана на відрізку $[a, b]$, і чисел, що відповідають критичним значенням заданої функції. Введено спеціальну функцію та поставлено у відповідність спеціальній функції періодичну альтернуючу послідовність. Доведено існування поліному, топологічно еквівалентного кусково-лінійній функції.

Ключові слова: *альтернуюча послідовність, екстремум, топологічна еквівалентність, поліном, кусково-лінійна функція*

Актуальність. Багато процесів можна описати за допомогою гладких функцій та поведінки гладких функцій в околі критичних точок. Важливим напрямом є проблема дослідження умов топологічної еквівалентності кусково-лінійних функцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основним дослідженням є розв'язок задачі про існування поліному топологічно еквівалентного кусково-лінійній функції. Класифікацією та дослідженням умов топологічної еквівалентності функцій займалися О. В. Болсінов [1],

© Т. Г. Криворот, 2018

А. А. Ошемков [2], В. В. Шарко [3]. Ми ж розглянемо не загальний випадок, а обмежимося більш вузькими класами неперервних відображень – поліноміальними.

Мета дослідження – дослідити топологічну еквівалентність для кусково-лінійних функцій.

Матеріали і методи дослідження. Нехай f – неперервна функція, яка задана на відрізку $[a, b]$. Точка $x_0 \in (a, b)$ – є точкою локального максимуму (мінімуму) функції f . У нашому випадку, повні альтернуючі послідовності $A(k, l)$ будуються, відповідно до послідовності значень функції f в екстремальних точках, яка задана на відрізку $[a, b]$.

Поставимо у відповідність функції f на відрізку $[a, b]$ повну альтернуючу послідовність відповідного типу $A(k, l)$, яку далі позначатимемо через $A_f(k, l)$. Для цього на відрізку $[a, b]$ розглянемо послідовність $y_i, (0 \leq i \leq k)$ локальних екстремумів функції $f(y_0 = a, y_k = b), y_i < y_{i+1}$. Позначимо $x_i = f(y_i)$. Припустимо, що $f(a) < x_i; f(b) < x_{k-1}$. Тоді послідовність $x_0 < x_1 > x_2 < x_3 > \dots < x_{k-1} > x_k$ утворює повну альтернуючу послідовність $A(k, l)$ типу $<>$. Побудова інших типів альтернуючих послідовностей є аналогічною.

Якщо розглянути на відрізку $[a, b]$ довільну неперервну функцію $y = f(x)$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів, то за допомогою гомеоморфізму числової прямої $s: R^1 \rightarrow R^1$, функцію $y = f(x)$ можна замінити на функцію $z = s \circ f(x)$. Якщо точка y_i – локальний максимум (мінімум) для функції f , то вона буде локальним максимумом (мінімумом) для функції $s \circ f$ і навпаки.

Оскільки гомеоморфізм s зберігає порядок точок, розташованих на числовій осі, то для сусідніх екстремальних точок y_i і y_{i+1} функції f нерівність $f(y_i) < f(y_{i+1}) (f(y_i) > f(y_{i+1}))$ зберігається для функції $s \circ f$, тобто $s \circ f(y_i) < s \circ f(y_{i+1}) (s \circ f(y_i) > s \circ f(y_{i+1}))$. Таким чином, неперервній функції $y = f(x)$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів однозначно можна поставити у відповідність повну альтернуючу послідовність $A_f(k, l)$ певного типу залежно від кількості екстремумів функції f значень, які функція f набуває в екстремальних точках.

Нехай задана повна альтернуюча послідовність $A(k, l)$. Тоді послідовності $A(k, l)$ можна поставити у відповідність кусково-лінійну криву $L(A(k, l))$.

Лема 1. Нехай на відрізку $[a, b]$ задана неперервна функція f зі скінченною кількістю екстремальних точок. Поставимо їй у відповідність її повну альтернуючу послідовність $A_f(k, l)$. Тоді функції f і $L(A_f(k, l))$ будуть топологічно еквівалентними.

Доведення. Можемо вважати, що всі екстремальні точки $x_0 = a, x_1, \dots, x_k = b$ функцій f і $L(A_f(k, l))$ співпадають та значення функцій f і $L(A_f(k, l))$ в екстремальних точках також співпадають. Якщо це не так, то за допомогою гомеоморфізму $s: R^1 \rightarrow R^1$, що зберігає орієнтацію, для функції $s \circ f$ ми можемо цього досягти. Звуження функції f на проміжках $[x_i, x_{i+1}]$ є строго монотонна функція, яка топологічно еквівалентна звуженню функції $L(A_f(k, l))$ на цей проміжок. Отже, функція f топологічно еквівалентна функції $L(A_f(k, l))$.

Теорема 1. Дві неперервні функції $y = f(x)$ і $y = g(x)$ на відрізку $[a, b]$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів будуть топологічно еквівалентними тоді і тільки тоді, коли співпадають їх повні альтернуючі послідовності $A_f(k, l)$ і $A_g(k, l)$.

Для довільної повної альтернуючої послідовності $A(k, l)$ можна побудувати неперервну на відрізку $[a, b]$ функцію $y = f(x)$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів, таку, що її повна альтернуюча послідовність $A_f(k, l)$ є $A(k, l)$.

Доведення. Розглянемо дві неперервні функції $y = f(x)$ і $y = g(x)$ на відрізку $[a, b]$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів. Припустимо, що функції $y = f(x)$ і $y = g(x)$ топологічно еквівалентні. Отже, існує гомеоморфізм $h: [a, b] \rightarrow [a, b]$, $(h(a) = a, h(b) = b)$ та гомеоморфізм $s: R^1 \rightarrow R^1$, які зберігають орієнтацію і такі, що $s \circ f = g \circ h$. Тоді $f = s^{-1} \circ g \circ h$ і у функцій $f = s^{-1} \circ g \circ h$ і g будуть однакові повні альтернуючі послідовності.

Нехай $y = f(x)$ і $y = g(x)$ – неперервні функції, задані на відрізку $[a, b]$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів, і нехай повні альтернуючі послідовності $A_f(k, l)$ і $A_g(k, l)$ функцій f і g однакові. Тоді кожна з них топологічно еквівалентна своїй PL-реалізації. Оскільки PL-реалізації будуть топологічно еквівалентними, це означає, що будуть топологічно еквівалентними й функції f і g .

Для довільної повної альтернуючої послідовності $A(k, l)$ її PL-реалізація є шукана неперервна функція зі скінченною кількістю екстремальних точок на відрізку $[a, b]$, повна альтернуюча послідовність якої співпадає з $A(k, l)$.

Неперервну невід'ємну функцію $y = f(x)$, яка задана на відрізку $[a, b]$ та задовольняє умовам: $(f(a) = f(b) = 0)$; на відрізку $[a, b]$ функція f має в точності $2k+1$ локальних екстремумів; на множині локальних екстремумів функція f приймає всі невід'ємні цілі значення з проміжку $[0, l], (l \leq 2k-1)$ називають спеціальною функцією.

Спеціальній функції f на відрізку $[a, b]$ ставимо у відповідність періодичну альтернуючу послідовність $A(2k, l)$, яка далі буде позначатися

через $A_f(2k, l)$. Нехай задано періодичну альтерную послідовність $A_f(2k, l)$. Тоді послідовності $A(2k, l)$ можна поставити у відповідність кусково-лінійну криву $L(A(2k, l))$, яку можна трактувати як графік неперервної функції $L(A(2k, l))$ з $2k+1$ локальними екстремумами та l значеннями в них, яка задана на відрізку $[a, b]$.

Для повної альтернуючої послідовності $A(2k, l)$ кусково-лінійну функцію $L(A(2k, l))$ будемо називати періодичною PL-реалізацією послідовності $A(2k, l)$.

Лема 2. Нехай на відрізку $[a, b]$ задана неперервна функція f зі скінченною кількістю екстремальних точок. Поставимо їй у відповідність її періодичну альтернуючу послідовність $A_f(2k, l)$. Тоді функції f і $L(A_f(2k, l))$ будуть топологічно еквівалентними.

Доведення. Вважаємо, що всі екстремальні точки $y_0 = a, y_1, \dots, y_{2k} = b$ функцій f і $L(A_f(2k, l))$ співпадають. Можна вважати, що значення функцій f і $L(A_f(2k, l))$ в екстремальних точках теж співпадають. Якщо це не так, то за допомогою гомеоморфізму числової прямої $h: \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$, що зберігає орієнтацію, для функції $h \circ f$ ми можемо цього досягти. Звуження функції f на проміжках $[y_i, y_{i+1}]$ є строго монотонна функція, яка топологічно еквівалентна звуженню функції $L(A_f(2k, l))$ на цей проміжок. Отже, функція f топологічно еквівалентна функції $L(A_f(2k, l))$.

Дві неперервні функції f і g на відрізку $[a, b]$ зі скінченною кількістю локальних екстремумів і такі, що $f(a) = f(b) \leq f(x), (x \in (a, b))$, $g(a) = g(b) \leq g(x), (x \in (a, b))$ будуть топологічно еквівалентними тоді й тільки тоді, коли співпадають їх періодичні альтернуючі послідовності $A_f(2k, l)$ і $A_g(2k, l)$.

Покажемо тепер, що для довільної періодичної альтернуючої послідовності $A(2k, l)$ можна побудувати неперервну на відрізку $[a, b]$ функцію f зі скінченною кількістю локальних екстремумів таку, що $f(a) = f(b) \leq f(x), (x \in (a, b))$ і її періодична альтернуюча послідовність $A_f(2k, l) \in A(2k, l)$.

Лема 3. Нехай $f: \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$ – неперервна функція зі скінченним числом локальних екстремумів, тоді f топологічно еквівалентна кусково-лінійній функції.

Доведення. Нехай $x_1, x_2, \dots, x_p$ – точки локальних екстремумів функції f . На інтервалах $(-\infty, x_1), (x_i, x_{i+1}), (x_n, \infty)$ функція f строго монотонно зростає або спадає ($i = 1, \dots, p-1$). Отже, звуження функції f на ці інтервали топологічно еквівалентні лінійним функціям, що доводить лему.

Поліноміальні функції різних ступенів можуть бути топологічно еквівалентними. Як приклад можна навести функції $f = x^3 + y^2 - 2xy$ і $g = x^5 + y^2 - x$.

Доведення. Нехай l – кусково-лінійна і має екстремуми $\xi_1 < \xi_2 < \dots < \xi_{n-1}$. Оскільки $\xi_i, i = \overline{1, n-1}$ – екстремуми, то $(-1)^i (l(\xi_i) - l(\xi_{i-1})), i = \overline{2, n-1}$ одного знака. Існує поліном $f: R^1 \rightarrow R^1$ ступеня n такий, що $f'(\xi_i) = 0; f(\xi_i) = l(\xi_i), i = \overline{1, n-1}$. Функція f монотонна на кожному інтервалі $(-\infty, \xi_1) \dots (\xi_i, \xi_{i+1}) \dots (\xi_{n-1}, +\infty), i = \overline{1, n-1}$ (оскільки f має степінь $n \rightarrow f'$ має степінь $n-1$).

[illegible]

Результати досліджень та їх обговорення. Отже, інваріантом функції, який дає відповідь на поставлені питання, є альтернуючі послідовності, за допомогою яких будується послідовність значень функції, заданої на відрізку, в екстремальних точках. Поліном $f: R^1 \rightarrow R^1$ топологічно еквівалентний кусково-лінійній функції. Поліноміальні функції різних ступенів можуть бути топологічно еквівалентними.

Список літератури

- 319

3. Шарко В. В. Гладкая и топологическая эквивалентность функций на поверхностях / В. В. Шарко // Укр. мат. жур. – 2003. – № 5. – С. 687–700.

References

1. Bolsinov, A., Oshemkov, S., Sharko, V. (1996). On classification of flows on manifolds, 2 (2), 51–60.

2. Oshemkov, A. A., Sharko, V. V. (1998). O klassifikacii potokov Morsa-Smejla na dvumernyh mnogoobraziyah [On the classification of Morse-Smale flows on two-dimensional manifolds]. Mathematical collection, 7, 93–140.

3. Sharko, V. V. (2003). Gladkaya i topologicheskaya ehkvivalentnost' funkciy na poverhnostyakh [Smooth and topological equivalence of functions on surfaces]. Ukrainian mathematical journal, 5, 687–700.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ

Т. Г. Криворот

Аннотация. Рассмотрена задача для непрерывных функций с конечным числом экстремальных точек, заданных на отрезке и числовой оси. Показано, что в каждом классе эквивалентности таких функций присутствует неотрицательная функция, которая принимает в точках экстремумов все целочисленные значения из множества $0, 1, 2, \dots, l$. Для полной альтернирующей последовательности определено кусочно-линейную функцию, которая называется PL-реализацией альтернирующей последовательности. Доказано, что каждая непрерывная функция с конечным числом экстремальных точек, заданная на отрезке будет топологически эквивалентной PL-реализации своей полной альтернирующей последовательности.

Определена периодическая альтернирующая последовательность, которая строится согласно последовательности экстремумов непрерывной функции, заданной на отрезке $[a, b]$, и чисел, соответствующих критическим значениям заданной функции. Введено специальную функцию и поставлено в соответствие специальной функции периодическую альтернирующую последовательность. Доказано существование полинома, топологически эквивалентного кусочно-линейной функции.

Ключевые слова: альтернирующая последовательность, экстремум, топологическая эквивалентность, полином, кусочно-линейная функция

TOPOLOGICAL EQUIVALENCE PIECEWISE-LINEAR FUNCTIONS

T. Krivorot

Abstract. In this paper we consider the problem for continuous functions with a finite number of extremal points defined on an interval and a numerical axis. It is shown that in each equivalence class of such functions there is a nonnegative function that takes at the extremum points all integer values from the set $0, 1, 2, \dots, l$. For a complete alternating sequence, a piecewise linear function is defined, which is called a PL-realization of an alternating sequence. It is proved that every continuous function with a finite number of extremal points, given on an interval, will be topologically equivalent to PL-realization of its complete alternating sequence.

A periodic alternating sequence is defined which is constructed according to the sequence of extrema of a continuous function defined on the interval $[a, b]$ and numbers corresponding to the critical values of the given function. A special function is introduced and a special alternating function is assigned to the special function. The existence of a polynomial topologically equivalent to a piecewise-linear function is proved.

Keywords: alternating sequence, extremum, topological equivalence, polynomial, piecewise-linear function

УДК 372.851

МІЖПРЕДМЕТНІ ЗВ'ЯЗКИ У ПРОЦЕСІ ВИКЛАДАННЯ ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ МАЙБУТНІМ ІНЖЕНЕРАМ

О. Ю. ДЮЖЕНКОВА, кандидат фізико-математичних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: oduzen@ukr.net

Анотація. Важливою складовою якісної підготовки майбутніх інженерів є підвищення рівня їх математичної освіти. Це передбачає розуміння суті основних понять і тверджень, що вивчаються в курсі вищої математики, їх тлумачення в різних науках, уміння будувати математичні моделі та застосовувати математичні методи при розв'язанні прикладних задач. У статті розглянуто основні підходи для встановлення міжпредметних зв'язків у процесі викладання вищої математики студентам інженерних спеціальностей, зокрема, в галузі енергетики.

Підкреслено важливість використання задач, які ілюструють необхідність введення основних математичних понять, що дає мотивацію та стимулює до вивчення математики. Для реалізації професійного спрямування курсу вищої математики значну увагу слід приділити прикладним задачам, які сприяють розвитку дослідницьких навичок майбутніх фахівців. Зазначено, що математичне моделювання

є важливим для встановлення міжпредметних зв'язків та формування науково-цілісного сприйняття світу.

Розглянуто приклади введення математичних понять та їх застосування у різних сферах людської діяльності. Для висвітлення міжпредметних зв'язків розглянуто застосування границі та похідної функції, диференціальних рівнянь у прикладних задачах. Підкреслено доцільність використання комбінованих задач, які дають можливість зрозуміти проблему комплексно. Крім того, розглянуто застосування ймовірнісно-статистичних методів при розв'язуванні задач з електроенергетики.

Ключові слова: міжпредметні зв'язки, професійна спрямованість, прикладні задачі

Актуальність. Різні науки описують різні сторони навколишнього світу, а взаємозв'язки наук відображують його єдність, формуючи науково-цілісну картину світу. Для підготовки якісного фахівця будь-якого профілю важливу роль відіграють міжпредметні зв'язки при вивченні основних дисциплін, зокрема, математичних. Це можна зробити лише за наявності зв'язку матеріалу, що вивчається, з іншими дисциплінами та з різними розділами самої дисципліни. Викладаючи майбутнім фахівцям-інженерам математичні дисципліни, слід особливу увагу звертати на їх професійну спрямованість.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливість та основні принципи встановлення міжпредметних зв'язків при викладанні математичних дисциплін розглядалися у роботах Г. Л. Бевза [1], Л. Д. Вінника [2] та інших. Останнім часом професійна спрямованість математики є актуальною внаслідок необхідності підготовки конкурентоспроможних фахівців у сучасних умовах, тому ця тема є доволі розповсюдженою, зокрема в роботах І. І. Ковтун і Скороход Т. А. [4]

Мета дослідження. Майбутні фахівці-інженери повинні вміти аналізувати фізичні процеси, складати математичні моделі та використовувати математичні методи для розв'язання прикладних задач. Значною мірою цьому сприяє реалізація міжпредметних зв'язків при вивченні курсу вищої математики студентами інженерних спеціальностей. Необхідно розглянути основні підходи для встановлення зв'язків між математичними поняттями та іншими дисциплінами.

Матеріали і методи дослідження. Для якісного засвоєння матеріалу важливо не тільки розуміти суть основних математичних понять і тверджень, а й тлумачити їх з точки зору інших наук та вміти застосовувати для розв'язання професійних задач. Висвітлювати міжпредметні зв'язки при вивченні математичних дисциплін можна різними шляхами, зокрема, при введенні нових понять та при вивченні різноманітних застосувань цих понять, при розв'язуванні одних і тих самих задач різними способами, при розв'язуванні комбінованих та прикладних задач.

Більшість нових математичних понять слід вводити лише після розгляду задач, які й потребують їх введення. Такий підхід дає не тільки

можливість аргументувати вивчення математики, а й показує її зв'язок з іншими науками.

Розглядаючи поняття функції, різні способи її задання та класифікацію функцій, можна навести такі приклади: лінійна функція $s = vt$, яка описує шлях, пройдений тілом зі сталою швидкістю v за час t ; квадратична $S = \pi R^2$ (площа круга); тригонометричні функції $y = \sin x$ та $y = \cos x$, які описують не лише механічні коливання, а й багато біологічних явищ (слух, зір, сприйняття ультразвуку тощо), пов'язаних із коливними процесами. Доцільно звернути увагу на роль експоненціальної функції, яка описує різноманітні закони неперервного (органічного) росту (розпад радіоактивної речовини, розмноження бактерій, зростання народонаселення, ріст грошових вкладів).

Зокрема, табличний спосіб задання функції широко використовується у фізичних експериментах та статистичних спостереженнях. Графічний спосіб задання функції застосовують у роботі з різними самописними приладами. Наприклад, у медицині (для аналізу роботи серця використовують кардіограму), у метеорології, у геодезії, у топографії тощо.

Вивчаючи неперервні функції, можна навести конкретні приклади, які описують певні неперервні процеси. Для описання розривних функцій можна розглянути таку задачу. З метою стимулювання економії електроенергії введено два різних тарифи: якщо витрати енергії не перевищують a кВт·г, то тариф дорівнює k , а якщо перевищує зазначену норму, то він збільшується на l , тобто дістаємо розривну функцію:

$$y = \begin{cases} kx, & 0 < x \leq a, \\ (k+l)x, & x > a. \end{cases}$$

Розділ «Диференціальне числення функцій однієї змінної» є одним із основних в курсі вищої математики. Поняття похідної та диференціала функції дає широкі можливості для дослідження функцій, що описують різноманітні процеси повсякденного життя. Для дотримання принципів професійної спрямованості, науковості та доступності при викладанні цього матеріалу слід звернути увагу на такі моменти.

Серед задач, які розглядаються перед введенням поняття похідної (крім класичних задач про миттєву швидкість та про дотичну до кривої) можна розглянути приклади про продуктивність праці, про швидкість хімічної реакції, про швидкість зростання популяції. Усі ці задачі після введення поняття похідної дають змогу характеризувати похідну як швидкість зміни певного процесу, що описується заданою функцією.

Означення похідної доцільно вводити одночасно як для функції дійсної, так і комплексної змінних. Формулювання деяких тверджень при цьому не ускладнюються, тоді як можливості їх застосування значно розширюються. Крім того, такий підхід дає значну економію часу.

Доцільно детально розглянути повне дослідження функції, що ілюструє необхідність вивчення попереднього матеріалу та показує широкі можливості застосування похідної. Розв'язуючи прикладні задачі на екстремум функції, для студентів енергетичних спеціальностей

доцільно розглянути задачу на відшукування сили струму, якщо задано кількість електрики, яка проходить через поперечний переріз провідника.

Елементи лінійної алгебри та аналітичної геометрії також мають широке застосування. Зокрема, матриці та вектори ефективно використовують для вивчення процесів в електроенергетиці. Наприклад, у розрахунках застосовують геометричні властивості електричного ланцюга, які визначаються його схемою.

Для вивчення суті математичних понять та їх застосування доцільно розглядати задачі, які розв'язуються різними способами. Зокрема, границю $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n}$ можна обчислити різними способами.

Користуючись нерівністю Коші $\sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \leq \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$, маємо:

$$\alpha_n = \sqrt[n]{n} = \sqrt[n]{\sqrt{n} \sqrt{n} \underset{n-2}{1 \dots 1}} \leq \frac{2\sqrt{n} + n - 2}{n} = 1 + \frac{2}{\sqrt{n}} - \frac{2}{n} < 1 + \frac{2}{\sqrt{n}} \Rightarrow$$

$$1 < \alpha_n < 1 + \frac{2}{\sqrt{n}}.$$

За властивістю границі проміжної змінної, дістаємо, що $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$.

Після вивчення похідної функції можна скористатися правилом Лопіталя, тоді $\frac{1}{x^x} = e^{\frac{1}{x} \ln x} = e^{\frac{\ln x}{x}} \rightarrow e^0 = 1, \quad x \rightarrow +\infty$.

Для того, щоб навчити студентів аналізувати та розглядати поставлену проблему комплексно, розв'язують комбіновані задачі, які встановлюють зв'язки між різними математичними розділами. Наприклад,

обчислити інтеграл $\int_a^b \frac{x-1}{x^2+6x+9} dx$, де $a = \begin{vmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & -2 \end{vmatrix}$, b довжина висоти CK

у трикутнику з вершинами $A(2;3;-1)$, $B(0;-1;3)$, $C(10;9;3)$.

Міжпредметні зв'язки математики з іншими дисциплінами легко показати за допомогою задач на застосування диференціального та інтегрального числення. Багато прикладних задач з фізики розв'язуються за допомогою диференціальних рівнянь. Зокрема, для студентів енергетичних спеціальностей можна розглянути наступну задачу, яка зводиться до розв'язання неоднорідного лінійного диференціального рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами. *Знайти силу струму в електричному ланцюгу із самоіндукцією L , якщо сила струму збуджується електрорушійною силою $E = E_0 \sin \omega t$, і в початковий момент часу сила струму $I(0) = I_0$.*

Широке застосування в задачах електроенергетики мають ймовірно-статистичні методи. Зокрема, формула Байєса дає можливість розв'язати наступну задачу. *Забезпечення електроенергією певного споживача можливе тільки тоді, коли працюють дві електростанції. Надійність (імовірність неперервної роботи протягом*

часу t) для першої електростанції становить $P_1 = 0,95$, а для другої $P_2 = 0,98$. Упродовж часу t споживач один раз втратить електропостачання. Знайти ймовірність того, що в цьому випадку вийшла з ладу тільки перша електростанція.

Багато цікавих прикладних задач з вищої математики, теорії ймовірностей та математичної статистики наведено в посібниках [3, 5].

Результати досліджень та їх обговорення. У праці розглянуто основні підходи, що дають можливість встановити міжпредметні зв'язки при викладанні математичних дисциплін для студентів інженерних спеціальностей, зокрема, в енергетичній галузі. Значну увагу приділено задачам, які приводять до певних математичних понять та прикладним задачам, які використовують ці поняття.

Висновки і перспективи. Важливим фактором якісного викладання вищої математики студентам інженерних спеціальностей є реалізація міжпредметних зв'язків з іншими дисциплінами. Такий підхід необхідний для успішної професійної діяльності майбутніх фахівців у сучасних умовах.

Список літератури

1. Бевз В. Г. Міжпредметні зв'язки як необхідний елемент предметної системи навчання / В. Г. Бевз // Математика в школі. – 2003. – № 6. – С. 11–15.
2. Вінник Л. Д. Міжпредметні зв'язки, як умова підвищення ефективності навчально-виховного процесу / Л. Д. Вінник // Проф.-тех. освіта. – 2003. – № 2. – С. 43–46.
3. Дюженкова Л. И. Практикум по высшей математике : учеб. пособие (в 2-х частях) / Л. И. Дюженкова, О. Ю. Дюженкова, Г. А. Михалин. – Ч. 2. – М. : Бинум. Лаборатория знаний. – 2009. – 468 с.
4. Ковтун І. І. Вища математика. Побудова математичних моделей фізичних процесів. / І. І. Ковтун, Т. А. Скороход. – К. : Центр інформаційних технологій. – 2010. – 60 с.
5. Практикум з теорії ймовірностей та математичної статистики: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Р. К. Чорней, О. Ю. Дюженкова, О. Б. Жильцов та ін. – К. : МАУП, 2003. – 328 с.

References

1. Bevz, V. G. (2003). Mizhpredmetni zvyazky yak neobhidnyy element predmetnoyi systemy navchannya. [Interpersonal connections as a necessary element of a substantive learning system]. Matematyka v shkoli, 6, 11–15.
2. Vinnik, L. D. (2003). Mizhpredmetni zvyazky, yak umova pidvyshchennya efektyvnosti navchalno-vykhovnoho protsesu. [Interpersonal relations as a condition for increasing the efficiency of the educational process]. Prof.-tech. osvita. 2, 43–46.
3. Dyuzhenkova, L. I., Dyuzhenkova, O. Yu., Mikhalin, G. O. (2009). Praktykum po vyshey matematyke: uchebnoe posobyie (v 2-h chastyah). [Workshop on Higher Mathematics: a manual (in 2 parts)]. 2. Moskow: Bynom. Laboratoryya znanyy, 468.
4. Kovtun, I. I., Skorokhod, T. A. (2010). Vyscha matematyka. Pobudova matematichnih modeley fizichnih protsesiv [Higher mathematics. Construction of mathematical models of physical processes]. Kyiv: Tsentr informatsiynyh tehnologiy, 60.
5. Chornay, R. K., Dyuzhenkova, O. Yu, Zhiltsov O. B. (2003). Praktykum z teorii ymovirnostey ta matematychnoyi statystyky: Navch.posib. dlya stud. vyshch.

МЕЖПРЕДМЕТНЫЕ СВЯЗИ В ПРОЦЕССЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ БУДУЩИМ ИНЖЕНЕРАМ

О. Ю. Дюженкова

Аннотация. Важной составляющей качественной подготовки будущих инженеров является повышение уровня их математического образования. Это предполагает понимание сути основных понятий и утверждений, изучаемых в курсе высшей математики, их толкование в различных науках, умение строить математические модели и применять математические методы при решении прикладных задач. В статье рассмотрены основные подходы для установления межпредметных связей в процессе преподавания высшей математики студентам инженерных специальностей, в частности, в области энергетики.

Подчеркнута важность использования задач, которые иллюстрируют необходимость ввода основных математических понятий, дают мотивацию и стимулируют изучение математики. Для реализации профессионального направления курса высшей математики большое внимание следует уделить прикладным задачам, которые способствуют развитию исследовательских навыков будущих специалистов. Указано, что математическое моделирование является важным для установления межпредметных связей и формирования научно-целостного восприятия мира.

Рассмотрены примеры введения математических понятий и их применение в различных сферах человеческой деятельности. Для освещения межпредметных связей рассмотрено применение границы и производной функции, дифференциальных уравнений в прикладных задачах. Подчеркнута целесообразность использования комбинированных задач, дающих возможность понять проблему комплексно. Кроме того, рассмотрено применение вероятностно-статистических методов при решении задач по электроэнергетике.

Ключевые слова: межпредметные связи, профессиональная направленность, прикладные задачи

INTERSUBJECT COMMUNICATIONS IN THE MATHEMATICS TEACHING TO THE FUTURE ENGINEERS

O. Dyuzhenkova

Abstract. An important component of the qualitative training of future engineers is to increase their level of mathematical education. This involves understanding the essence of the basic concepts and statements studied in the course of higher mathematics, their interpretation in various sciences, the

ability to build mathematical models and apply mathematical methods in solving applied problems. The article considers the main approaches for establishing intersubject connections in the teaching of higher mathematics to students of engineering specialties, in particular, in the field of energy.

The importance of using tasks that illustrate the need to enter basic mathematical concepts, emphasizes the motivation and stimulates the study of mathematics. To implement the professional direction of the course of higher mathematics, great attention should be paid to applied problems that contribute to the development of research skills of future specialists. It is indicated that mathematical modeling is important for establishing intersubject connections and for forming a scientifically holistic perception of the world.

In the article examples of introduction of mathematical concepts and their application in various spheres of human activity are considered. For the illumination of intersubject connections, the application of the boundary and the derivative of the function, differential equations in applied problems is considered. The expediency of using combined tasks that make it possible to understand the problem comprehensively is emphasized. In addition, the application of probability-statistical methods in solving problems in the electric power industry is considered.

Keywords: *intersubject communications, professional orientation, applied problems*