

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ЗАЄЦЬ НАТАЛІЯ АНАТОЛІЇВНА

УДК 62-503.56:621.3:004.896

**НАУКОВІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМИ
КОМПЛЕКСАМИ НЕПЕРЕРВНИХ ВИРОБНИЦТВ
ІЗ ПРОГНОЗУВАННЯМ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ**

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
член-кореспондент НАН України
Кондратенко Ігор Петрович,
Інститут електродинаміки НАН України,
завідувач відділу електромагнітних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
директор Інституту електромеханіки,
енергозбереження і систем управління

доктор технічних наук, професор
Островерхов Микола Якович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри теоретичної електротехніки

доктор технічних наук, професор
Федорейко Валерій Степанович,
Тернопільський національний педагогічний
університет імені Володимира Гнатюка,
завідувач кафедри машинознавства
та транспорту

Захист відбудеться «08» жовтня 2019 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, аудиторія 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів та природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «05» вересня 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Всі технологічні процеси на підприємствах неперервного типу реалізуються з використанням електротехнічних пристроїв, які пов'язані між собою інформаційними, керуючими та силовими електричними зв'язками, що в результаті утворює цілісний електротехнічний комплекс. Головна вимога до роботи будь-якого електротехнічного комплексу неперервних виробництв – це отримання найвищого прибутку, що є результатом безперервної, безперебійної і чіткої роботи. Це можливо лише в разі відсутності простоїв, дотримання технологічного регламенту, своєчасного виявлення відхилень регульованих змінних від заданих значень, а також відсутністю поломок, що визначається відповідним технічним станом.

Для електротехнічних комплексів неперервного виробництва характерні певні особливості, що ускладнюють процес управління ними, серед них: складність оцінки зміни деяких параметрів унаслідок неточності засобів вимірювання; багатоальтернативність прогнозування розвитку процесу; різнорідність факторів, що впливають на перебіг технологічних процесів, різні шкали їх оцінки; зміна складу найбільш значущих факторів та ступеню їх впливу на різних ділянках технологічного процесу. Розв'язання задач керування електротехнічними комплексами неперервних виробництв із функцією прогнозування виникнення нештатних ситуацій для підвищення їх енергоефективності, ресурсоощадження та продуктивності проведено на прикладі підприємств харчової галузі, як типового представника неперервних виробництв.

Харчова промисловість є однією з провідних галузей агропромислового комплексу, перед якою стоять завдання підвищення ефективності виробництва, поліпшення якості продукції та впровадження ресурсоефективних технологій. Організація технологічного процесу та ефективність функціонування харчових виробництв неможлива без використання відповідного електротехнічного комплексу: систем управління, енергопостачання та електротехнічного обладнання. У зв'язку з постійним зростанням можливостей систем автоматизованого управління, актуальною є задача комплексного підходу до забезпечення необхідної ефективності функціонування електротехнічних комплексів неперервних виробництв.

Дослідження різноманітних питань ефективного функціонування електротехнічних комплексів та підприємств неперервного типу висвітлено у працях багатьох вчених: В. С. Балакірева, С. М. Василенка, Б. М. Гончаренка, І. В. Ельперіна, В. В. Кафарова, М. О. Корчемного, В. Д. Кишенька, А. П. Ладанюка, В. П. Лисенка, М. Я. Островерхова, А. В. Праховніка, В. Г. Перепечаєнка, М. О. Прядка, В. П. Розена, Д. Й. Родькіна, О. М. Синчука, В. Г. Трегуба, В. С. Федорейка, В. А. Хобіна, В. М. Чермалих О. П. Чорного та ін.

Водночас, попри наявні результати масштабних досліджень найбільш важливих аспектів ефективного функціонування неперервних виробництв, існує потреба в розробленні системи ефективного функціонування електротехнічного

комплексу харчових виробництв, що відрізняється від теперішніх можливістю оперативної діагностики, прогнозування та визначення ефективних сценаріїв функціонування електротехнічного комплексу за різних керуючих впливів, що дає змогу запобігти виникненню нештатних ситуацій, зменшити кількість зупинок виробництва, підтримувати заданий режим роботи та мінімізувати ймовірність виникнення критичних рівнів забруднення довкілля внаслідок скидання стічних вод підприємства. Усе вищезазначене обумовило вибір теми дисертації, встановлення її мети та завдань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження дисертації були складовою планів держбюджетних науково-дослідних тем: «Розробка теорії побудови систем управління агропромисловим виробництвом з біотехнічними об'єктами і особливостями природних збурень» (номер державної реєстрації 0110U003609, 2010–2014 рр.); «Розроблення системи дистанційного моніторингу стану посівів для раціонального використання добрив» (номер державної реєстрації 0116U005634, 2016–2017 рр.); «Розроблення ресурсоефективних режимів вирощування овочевої продукції в тепличних комплексах» (номер державної реєстрації 0117U003966, 2018–2020 рр.).

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження – розроблення наукових основ керування електротехнічними комплексами неперервних виробництв з функцією прогнозування виникнення нештатних ситуацій для підвищення енергоефективності, ресурсозбереження та продуктивності на прикладі харчових виробництв.

Для досягнення мети вирішувалися такі основні завдання:

- провести системний аналіз електротехнічних процесів у харчових виробництвах для можливості встановлення зв'язків між складовими електротехнічного комплексу, визначення ієрархічної структури технологічних апаратів та електротехнічного обладнання комплексів, формулювання єдиних цілей і завдань для подальшого визначення сценаріїв їх функціонування;

- здійснити класифікацію нештатних ситуацій на підприємствах харчової промисловості та розробити системи їх моніторингу і сформулювати правила адаптивного керування комплексами в разі виникнення таких ситуацій;

- оцінити можливе збільшення споживання електроенергії у разі виникнення нештатних ситуацій внаслідок залпових викидів стічних вод на очисні споруди та розробити заходи для підвищення надійності систем очищення стічних вод підприємств харчової промисловості;

- встановити взаємозв'язок енергетичних та економічних показників електротехнічних комплексів протидії нештатним ситуаціям в залежності від типу підприємства та об'єму стічних вод;

- провести аналіз впливу найбільш значних причин зниження ефективності функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв на його безперебійність роботи, продуктивність та якість виготовленої продукції;

- розробити методи діагностики електротехнічного обладнання та прогнозування надійності його функціонування для запобігання відмовам

та зупинкам технологічного процесу за керування електротехнічними комплексами харчових виробництв;

- сформуванати комплексну програму технічного обслуговування і ремонту обладнання на харчових виробництвах та способи її реалізації із урахуванням діагностики та прогнозування ламання електротехнічного обладнання;

- визначити шляхи підвищення ефективності використання обладнання через оптимізацію машинного часу його функціонування з урахуванням технологічних особливостей підприємств;

- розробити систему керування за управління електротехнічним комплексом у нештатних режимах, коли технологічний процес здійснюється в умовах суттєвих невизначеностей;

- розробити сценарно-когнітивну модель прогнозування роботи електротехнічних комплексів харчових виробництв для розрахунку динаміки зміни цільових критеріїв функціонування за вибраних стратегій керування;

- розробити комплекс алгоритмічно-програмного забезпечення та структури системи керування із функцією прогнозування для оперативної оцінки станів та параметрів електротехнічного обладнання харчових виробництв із підтримкою заданого технологічного режиму.

Об'єкт дослідження – процеси споживання енергоресурсів в електротехнічних комплексах харчових виробництв.

Предмет дослідження – вплив режимів функціонування, енергоспоживання та ефективності використання обладнання за управління електротехнічним комплексом харчових виробництв на ефективність та продуктивність виробництва.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених завдань використовувались: методи системного аналізу і сценарного-когнітивного моделювання; методи ідентифікації об'єктів; методи ресурсно-процесної оптимізації; методи нейромережевого моделювання; методи діагностики й прогнозування; методи синтезу структур інтегрованих автоматизованих систем управління, методи прикладного програмування.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше розроблено наукові основи створення системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв, які відрізняються від наявних можливістю оперативної діагностики, прогнозування та визначення ефективних сценаріїв функціонування електротехнічного комплексу за різних керуючих впливів, що дає змогу запобігти виникненню нештатних ситуацій, зменшити кількість зупинок виробництва, підтримувати заданий режим роботи та мінімізувати ймовірність виникнення критичних рівнів забруднення довкілля внаслідок скидання стічних вод підприємства.

Вперше встановлено взаємозв'язок витрат електроенергії електротехнологічного комплексу очищення стоків харчових виробництв у залежності від типу підприємства та об'єму стічних вод із застосуванням у разі залпових викидів стічних вод блоку утилізації, що дає змогу в оперативному режимі визначити енергетичні та економічні показники функціонування такого комплексу.

Вперше на основі генетичного алгоритму встановлено оптимальну кількість вхідних режимних параметрів роботи електродвигунів для їх функціональної діагностики та за допомогою теорії нейронних мереж розроблено математичні моделі прогнозування надійності електродвигунів, які, на відміну від наявних, в оперативному режимі здійснюють інтелектуальний аналіз даних вимірювань датчиків режимних параметрів, що дає змогу виявити дефекти, контролювати стан машин та прогнозувати термін їх роботи.

На основі системного аналізу розроблено нові факторно-цільові моделі електротехнічного комплексу харчових виробництв, які, на відміну від відомих, включають моделювання взаємозв'язків електротехнічного обладнання підприємства та базуються на визначенні ієрархічної структури підсистем електротехнічного комплексу, формулюванні єдиних цілей і завдань, що дало змогу визначити ефективну стратегію досягнення цільових критеріїв функціонування підприємства.

Розроблено нову сценарно-когнітивну модель для прогнозу розвитку ситуації в умовах дефіциту точної кількісної інформації про функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв, яка полягає в створенні нечіткої когнітивної карти, для моделювання якої експертно визначено множини параметрів функціонування електротехнічного комплексу та за допомогою розробленої методики встановлено ступінь їх взаємовпливу, що дає змогу визначити динаміку зміни цільових критеріїв функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв за різних стратегій управління.

Науково обґрунтовано нову стратегію синтезу системи моніторингу технологічного процесу, яка на основі запропонованого класифікатора нештатних ситуацій у реальних умовах функціонування виробництва забезпечує їх оперативне розпізнавання та надає рекомендації оператору для запобігання нештатних ситуацій, що дає змогу вчасного прогнозування факторів ризиків і забезпечення своєчасного усунення причин ризиків до появи відмов та інших небажаних наслідків.

Розвинуто метод оптимізації машинного часу використання обладнання, що відрізняється від теперішніх застосувань ресурсно-процесного підходу із врахуванням взаємозв'язків електротехнічного обладнання та виробничої потужності підприємства, результатом якого буде економія енергоносіїв шляхом оптимізації часу використання електротехнічного обладнання.

Практичне значення одержаних результатів. Науково обґрунтовано нову узагальнену структуру системи керування із функцією прогнозування та розроблено її алгоритмічно-програмне забезпечення, що дає змогу впровадження системи на різнопрофільних підприємствах неперервного типу, оперативної оцінки взаємовпливів між станом та параметрами роботи електротехнічного комплексу та дозволяє підвищити енергоефективність, ресурсощадження та продуктивність виробництва.

Створено методичні розробки «Науково-технічні засади удосконалення нормативної бази електротехнологічної очистки стічних вод із врахуванням дії надзвичайних ситуацій», що рекомендовані до практичного використання за

проектування систем промислового водоочищення Науково-технічною радою ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства» (протокол № 4 від 14 травня 2019 року).

Достовірність наукових результатів обґрунтовано точною постановкою завдань, що доведено експериментальними результатами, отриманими як у лабораторних, так і у виробничих умовах.

Результати роботи впроваджено на ДП «Укрспирт» (Червонослобідське МПД Макарівського району, Київської області), ПрАТ «Дубномолоко» (м. Дубно Рівненської області), ТОВ «Паляниця» (с. Варковичі Рівненської області), АТ «Линовицький цукрокомбінат «Красний» (сміт Линовиця Чернігівської області), ТОВ «SimpleEnergy» (м. Луцьк Волинської області), науково-виробничому підприємстві «ЕІА діджитал» (м. Київ), ТОВ «Андрушівка Хліб» (м. Андрушівка Житомирської області), ООО «Технопарк «Полесьє» (м. Пінськ, Республіка Білорусь).

Результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі кафедри автоматики та робототехнічних систем імені академіка І. І. Мартиненка Національного університету біоресурсів і природокористування України та кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій, відділенні електрифікації Мировошанського аграрного коледжу.

Особистий внесок здобувача. До дисертації увійшли наукові результати, отримані здобувачем особисто. Здобувачу належить постановка завдань і вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення експериментальних результатів досліджень. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті ідеї та положення, які є результатом особистої роботи здобувача. У докторській дисертації матеріали і висновки кандидатської дисертації відсутні.

Апробація результатів дисертації. Основні принципові положення й результати теоретичних та експериментальних досліджень доповідалися та публічно обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (м. Могильов, Республіка Білорусь, 2017 р.); Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки» (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній конференції з автоматичного управління «Основи автоматики 2017» (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції студентів, магістрантів та аспірантів «Галузеві проблеми екологічної безпеки» (м. Харків, 2018 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Современные проблемы машиноведения» (м. Гомель, Республіка Беларусь, 2018 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Новые технологии и материалы, автоматизация производства» (м. Брест, Республіка Білорусь, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции» (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 2018 р.); Міжнародній конференції з мехатроніки та інженерної робототехніки (м. Рим,

Італія, 2019 р.); Міжнародній конференції з електроніки та нанотехнологій (м. Київ, 2019 р.).

Публікації. Основні теоретичні та експериментальні результати наукових досліджень висвітлено у 49 наукових працях, з яких 3 монографії, 14 статей у наукових фахових виданнях України, 10 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 7 статей у наукових виданнях інших держав, стаття в іншому науковому виданні, 3 патенти на корисні моделі, 11 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Матеріал роботи викладено на 386 сторінках. Дисертація містить 121 рисунок та 36 таблиць. Список використаних джерел налічує 272 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано науково-прикладну проблему та визначено мету, об'єкт, предмет, завдання та методи дослідження, показано наукову новизну і практичне значення результатів роботи, подано інформацію щодо апробації результатів досліджень та опублікованих наукових праць.

У першому розділі «**Актуальні задачі підвищення ефективності керування електротехнічними комплексами неперервних виробництв**» виконано аналіз електротехнічних комплексів як складової технологій неперервного виробництва на прикладі харчових виробництв та сформовано структуру узагальненого електротехнічного комплексу виробництва, сформовано концепцію побудови системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв, принципи та рівні її реалізації.

Характерною особливістю функціонування харчових виробництв є наявність на підприємстві стічних вод та автоматизованих систем їх очистки. Штрафи за недотримання Правил скиду стічних вод значно вплинуть на прибуток підприємства. Проте під час визначення ключових показників ефективності виробництва KPI (ISO 22400) не існує показника, який би визначав ефективність очищення стічних вод підприємства. Проаналізовано найбільш значні причини втрати ефективності виробництва і найбільш значні причини, що впливають на якість очищення стічних вод. Автором пропонується ввести коефіцієнт якості очищення стічних вод у розрахунок об'єктивної оцінки ефективності використання обладнання на підприємствах харчової промисловості OEEFP (Overall Equipment Effectiveness Food Production).

$$OEEFP = A \times T \times Q \times QV, \quad (1)$$

де A – експлуатаційна готовність – це відношення доступного робочого часу обладнання до загального робочого часу, %; T – продуктивність роботи – це відношення фактичного часу роботи до чистого операційного часу, %; Q – якість продукції – це відношення якісної продукції до загальної кількості продукції, %; QV – якість очистки стічних вод – це співвідношення між об'ємом очищених

стічних вод, що відповідають нормативним забрудненням та об'ємом очищених стічних вод, %.

Управління електротехнічним комплексом харчових виробництв як складним об'єктом має бути системно узгодженим не тільки із цілями, завданнями, ресурсами і очікуваними результатами, але і в оперативності та результативності взаємодії в реальних умовах нештатної ситуації. Після проведеного аналізу нештатних ситуацій за управління різноманітними складними організаційно-технологічними системами виявлено, що не існує типового класифікатора причин і наслідків виникнення нештатних ситуацій на підприємствах харчової промисловості. Таким чином, виникла потреба на шляху розроблення загальносистемних підходів до вирішення проблеми створення системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу на об'єктах харчової промисловості, що дало змогу вирішити задачу класифікації нештатних ситуацій (рис. 1).

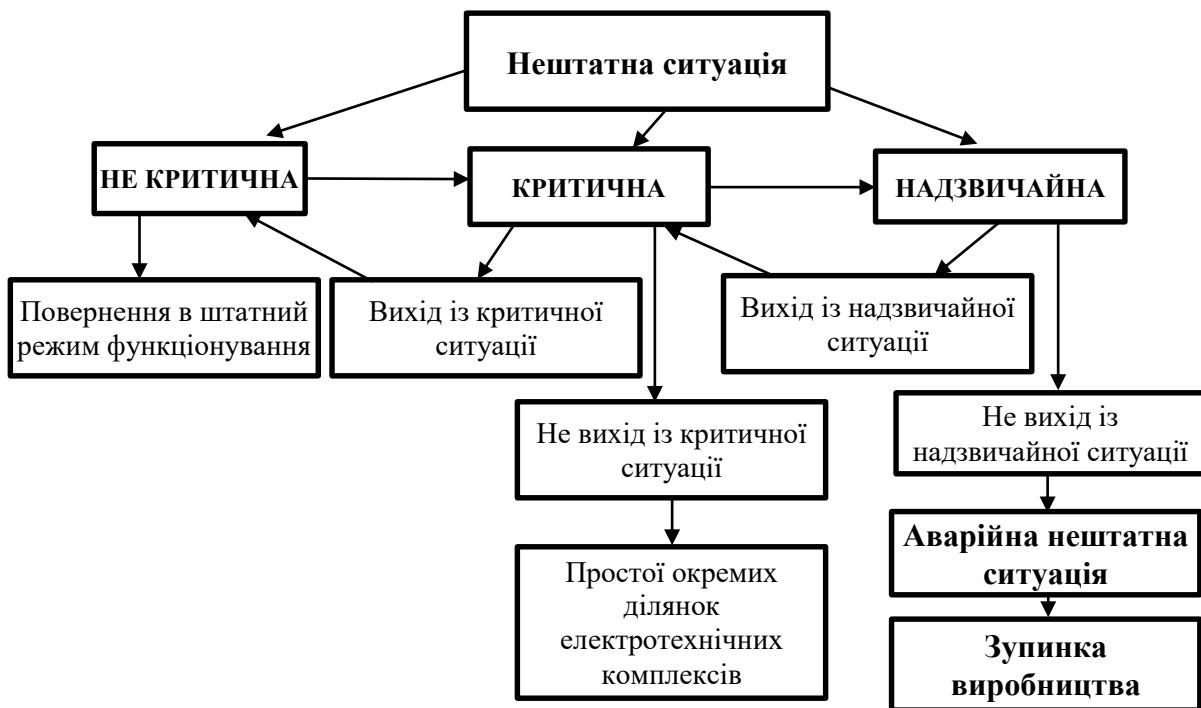


Рис. 1. Класифікація нештатних ситуацій електротехнічних комплексів харчових виробництв

Наявність на диспетчерському та операторському пунктах систем автоматизації та управління може привести як до позитивних, так і до негативних результатів. Будь-яке невірне рішення диспетчера з управління системами автоматики може привести до значних витрат сировини, фінансових втрат та екологічних катастроф. Особливо критичним людський фактор стає в умовах аварійної ситуації, в якій окрім психологічної складової діє часовий фактор. Оскільки нештатні ситуації на харчових виробництвах виникають часто, а їх наслідки значно впливають на ресурсо- та енергоефективність виробництва, виникає гостра потреба у прогнозуванні та розпізнаванні нештатної ситуації, в інформаційній підтримці диспетчерського персоналу, прийнятті термінових і адекватних заходів з її локалізації.

Аналіз особливостей електротехнічних комплексів харчових виробництв та теперішніх методів підвищення ефективності їх функціонування дозволив зробити висновки про те, що розв'язання задач сучасними і перспективними методами в системах керування електротехнічними комплексами вимагає застосування принципово нових підходів, що зумовлено ускладненням як самих об'єктів управління, так і більш жорсткими вимогами до ефективності керування ними.

У другому розділі «Аналітично-експериментальні дослідження функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв» розроблено загальну методику проведення системного аналізу електротехнічного комплексу харчових виробництв із використанням сценарного підходу для побудови факторно-цільової моделі досліджуваного об'єкта. Визначено нову стратегію формулювання цілей функціонування електротехнічного комплексу, встановлення чітких взаємозв'язків між його складовими, ключових технологічних апаратів та електротехнічного обладнання.

Для електротехнічних комплексів харчових виробництв критерії ефективності функціонування (окрім ефективності використання обладнання) обрано із стандартних ключових показників ефективності KPI (ISO 22400), зокрема:

– продуктивність технологічного процесу:

$$FGR = IGQ / CM, \quad (2)$$

де FGR – продуктивність технологічного процесу; IGQ – сумарний об'єм продукції; CM (Consumed material) – витратні матеріали.

– енергоефективність:

$$e = (E + G)/PQ, \quad (3)$$

де E – витрати на повне енергоспоживання, грн; G – витрати на спожитий газ, грн; PQ – об'єм виготовленої продукції, т/год.

– ефективність використання обладнання підприємств харчової промисловості OEE (див. формулу 1).

Для детального аналізу електротехнічного комплексу харчових виробництв та виявлення найбільш значних і поширених джерел втрати ефективності проаналізовано взаємозв'язки між його складовими та побудовано сценарно-цільову модель електротехнічного обладнання (табл. 1).

Таблиця 1

Цілі функціонування електротехнічних комплексів

Ціль	Опис цілі
C1	Підвищення продуктивності електротехнічних комплексів харчового виробництва
C2	Підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів харчового виробництва
C3	Підвищення ефективності використання обладнання електротехнічних комплексів харчового виробництва

На етапі розроблення А-сценарію цілі, що ставляться перед системою, мають глобальний характер і у разі необхідності можуть додатково уточнюватися шляхом розгортання в дерево цілей. Основні фактори, що

наведені в табл. 2, впливають на виконання цілей, поставлених перед електротехнічним обладнанням і відповідно на режими його роботи.

Таблиця 2

Фактори, що впливають на процес виробництва

Позначення	Зміст фактору
Ф1	Якість та кількість електроенергії
Ф2	Справність електрообладнання

Об'єктні потоки, що діють в А-сценарії, наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Основні об'єктні потоки

Позначення	Зміст
P1	Електроенергія
P2 – Pn	Передача електроенергії між підсистемами
Pn + 1	Витрата електроенергії (кількість спожитої електроенергії)

На основі аналізу роботи електротехнічного обладнання сформовано А-сценарій (рис. 2).

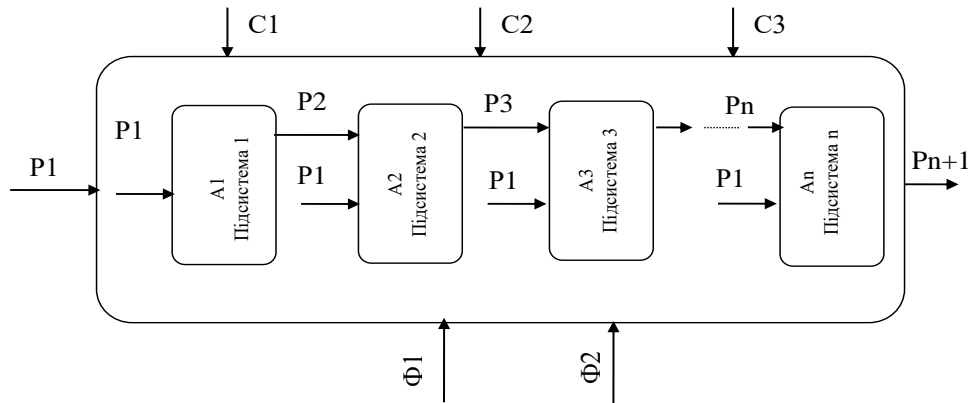


Рис. 2. А-сценарій роботи електротехнічного обладнання харчових виробництв

Базуючись на розробленому цільовому сценарії типового електротехнічного обладнання харчових виробництв, що складається з операцій (табл. 4), цілей (табл. 5), переходів і зв'язків між ними, побудовано базовий граф взаємозв'язків електротехнічного обладнання (рис. 3). Його основою є цільовий сценарій.

Базовий граф описується набором:

$$B = \langle F, O, R, S, \Theta \rangle, \quad (4)$$

де $F = \{f_1, f_2, f_3\}$ – множина операцій; $O = \{o_1, \dots, o_4\}$ – множина об'єктів; $R = \{r_1, r_2\}$ – множина ресурсів; $S = \{s_1, \dots, s_4\}$ – множина подій; $\Theta = \{0, 1, \dots, h\}$ – часова шкала.

Таблиця 4

Операції підсистеми

Позначення	Зміст операції
f ₁	Робота силового обладнання у штатному режимі
f ₂	Вимірювання заданих параметрів
f ₃	Підтримання штатного технологічного режиму

Цілі підсистеми

Позначення	Зміст цілі
c ₁₁	Забезпечити необхідну потужність електротехнічного обладнання
c ₁₂	Забезпечити достовірне вимірювання та передачу інформації про перебіг електротехнічного процесу
c ₁₃	Підтримувати необхідні значення технологічних змінних відділення

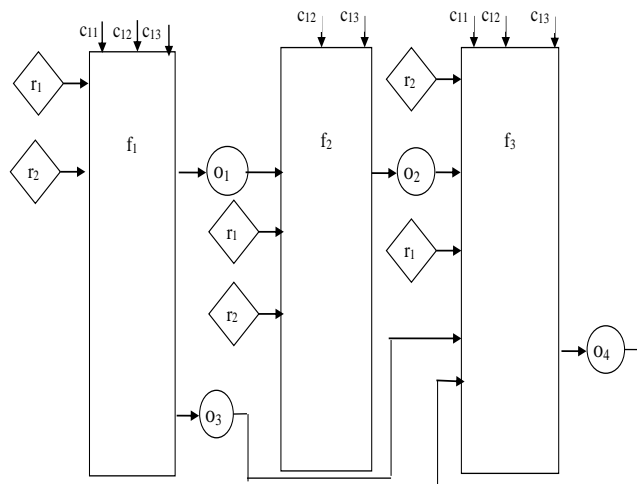


Рис. 3. Базовий програф електротехнічного обладнання харчових виробництв

На основі аналізу об'єкта виділяються ресурси (табл. 6), які необхідно затратити для того, щоб операції (див. табл. 4) відбулися і в результаті їх виконання було досягнуто цілі (див. табл. 5) й отримано об'єкти (табл. 7) та визначено події підсистеми (табл. 8).

Таблиця 6

Ресурси підсистеми

Позначення	Зміст ресурсу
r ₁	Продукт (напівпродукт)
r ₂	Електроенергія

Таблиця 7

Об'єкти підсистеми

Позначення	Зміст об'єкта
o ₁	Сигнал на виході силового обладнання
o ₂	Виходи первинних вимірювальних перетворювачів
o ₃	Виходи мікропроцесорних контролерів
o ₄	Виходи виконавчих механізмів та регулюючих органів

Таблиця 8

Події підсистеми

Позначення	Зміст події
s ₁	Передати o ₁ від f ₁ до f ₂ у момент часу τ ₁
s ₂	Передати o ₂ від f ₂ до f ₃ у момент часу τ ₂
s ₃	Передати o ₃ від f ₁ до f ₃ у момент часу τ ₃
s ₄	Передати o ₄ від f ₃ до f ₃ у момент часу τ ₃

Для проведення імітаційного моделювання побудовано С-сценарії, де визначено внутрішню структуру об'єктів і ресурсів з детальним описом властивостей, станів, переходів і правил. В С-сценарії вводяться обмеження на область зміни значень атрибутів і на основі них операції, що містять у собі певну кількість однакових об'єктів з однаковим набором атрибутів із відмінними значеннями. Кожний клас містить дані про атрибути об'єктів і правила, що описують їх життєвий цикл. Міжопераційні зв'язки відображають перетворення об'єктів та їх передачу між операціями.

За формування С-сценаріїв керування електротехнічним обладнанням виробництва неперервного типу станом або сценарієм s_i системи А назвемо набір активних компонентів:

$$S_i = \{p_i^{k1}, p_i^{k2}, \dots, p_i^{kr}\} \subseteq P, \quad (5)$$

де, для $\forall p_i^k \in P_{ij}$, $p_i^k \in S_i$, якщо стан p_i^k : активний перехід від стану до стану здійснюється стрибком, за допомогою активізації іншого набору життєвих станів. Процес функціонування електротехнічного обладнання є недетермінованим, оскільки заздалегідь неможливо з повною достовірністю прогнозувати, який з наборів може бути активізований в i -й момент часу. Цей процес може бути формалізований у вигляді концептуальної сценарно-цільової моделі, фрагмент якої представлено на рис. 4. Отримані моделі використано для формування і реалізації відповідних стратегій керування електротехнічними комплексами.

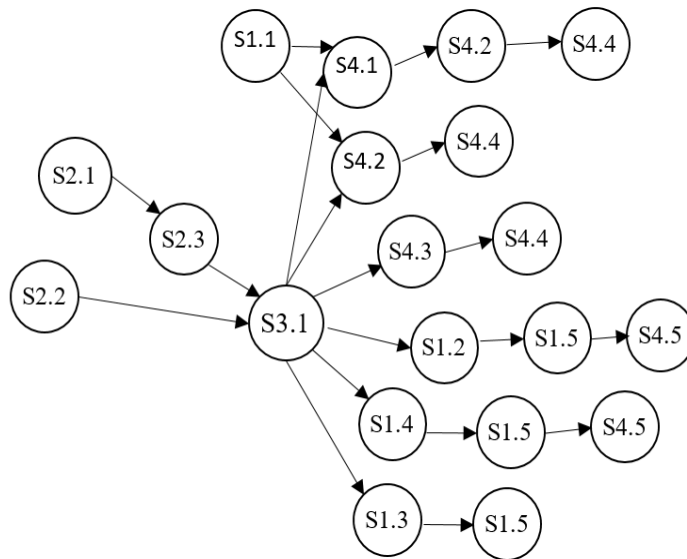


Рис. 4. С-сценарій електротехнічного обладнання харчових виробництв

Проведено систематизацію параметрів стоків для різнопрофільних підприємств харчового сегменту, створено перелік забруднювачів і визначено способи доведення їх до гранично допустимих концентрацій. Здійснено оцінку техногенних ризиків у разі виникнення нештатних ситуацій щодо водоскиду на харчових виробництвах та розроблено варіант комбінованого комплексу електротехнологічних процесів очищення стоків харчових виробництв із врахуванням дії нештатних ситуацій. Розроблено структуру комбінованого

комплексу електротехнологічних процесів очищення стоків харчових виробництв із врахуванням дії нештатних ситуацій (рис. 5).

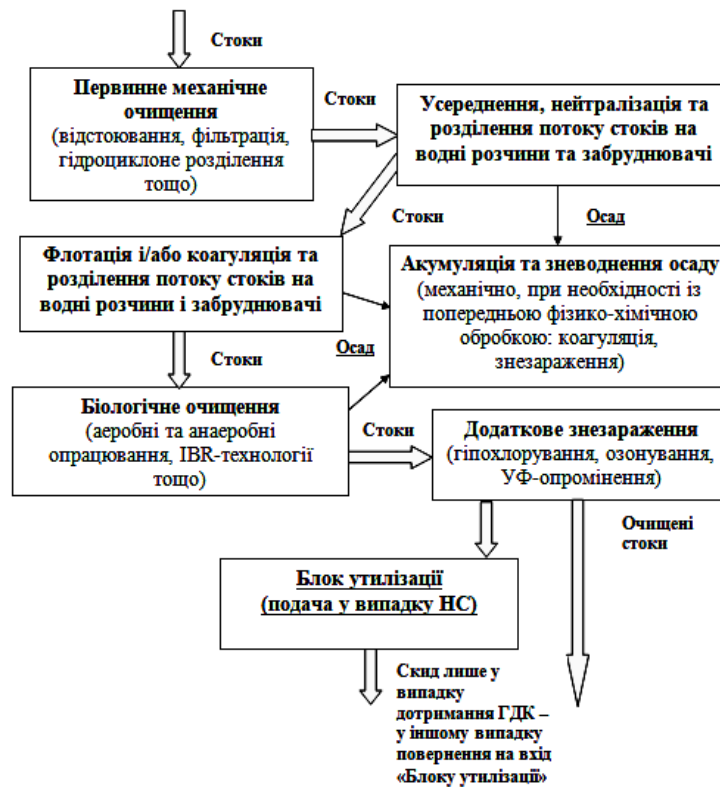


Рис. 5. Варіант комбінованого комплексу електротехнологічних процесів очищення стоків харчових виробництв із врахуванням дії нештатних ситуацій

Обґрунтовано формалізований процес формування комплексної програми технічного обслуговування та ремонту обладнання, що базується на принципах обслуговування на підставі надійності (Reliability-Centered Maintenance IEC 60300-3-11:2009) із використанням підсистем прогнозування надійності первинних вимірювальних перетворювачів та електродвигунів. У результаті розроблено структуру системи реалізації програми технічного обслуговування, що включає не тільки процес аналізу стану електротехнічного обладнання, але й рекомендовані подальші дії, що необхідні для забезпечення цілей управління виробництвом.

Базуючись на окресленій проблемній області та підходах щодо забезпечення ефективного функціонування електротехнічних комплексів харчових виробництв, для подальших досліджень розроблено структурно-логічну модель, що описує всі необхідні кроки для визначення методики синтезу системи ефективного функціонування обраного об'єкта (рис. 6). Визначено ключові етапи забезпечення ефективного функціонування електротехнічних комплексів харчових виробництв, що полягають у діагностиці та прогнозуванні їх поведінки, зменшенні зупинок виробництва та синтезі ефективних стратегій функціонування в умовах виникнення нештатних ситуацій. Проведено декомпозицію ключових етапів методу синтезу системи ефективного функціонування обраного об'єкта із визначенням початкових даних, операцій та результатів виділених підзадач.

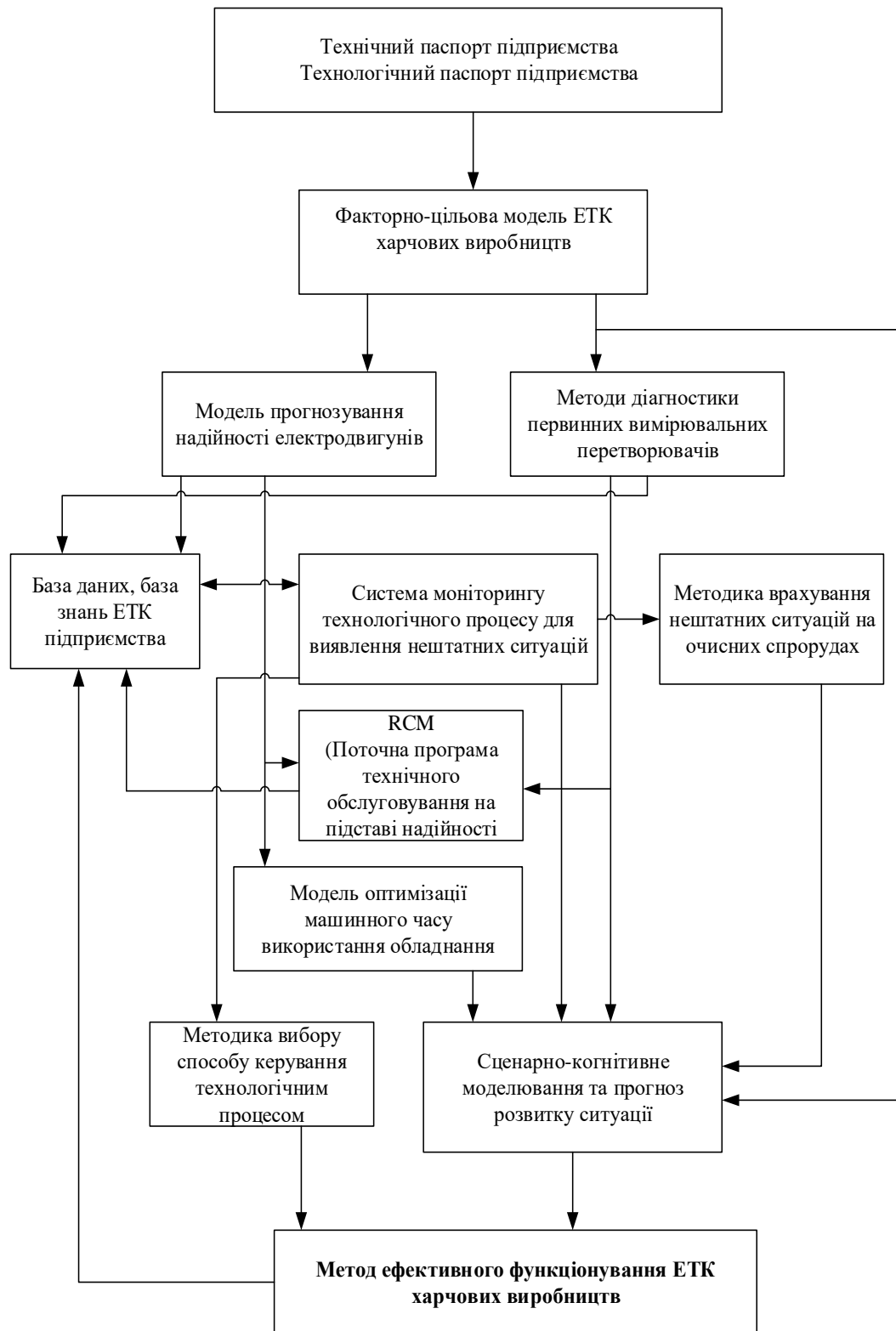


Рис. 6. Структурно-логічна модель методу ефективного функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв*

*Примітка. ЕТК – електротехнічний комплекс

Результатом даного розділу дослідження є розроблення структурно-логічної моделі методу ефективного функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв, який відрізняється від наявних можливістю оперативної діагностики, прогнозування та визначення ефективних сценаріїв функціонування електротехнічного комплексу за різних керуючих впливів,

що дає змогу запобігти виникненню нештатних ситуацій, зменшити кількість зупинок виробництва, підтримувати заданий режим роботи та мінімізувати ймовірність виникнення критичних рівнів забруднення довкілля внаслідок скидання стічних вод підприємства.

У третьому розділі «**Діагностика та прогнозування надійності електротехнічного обладнання харчових підприємств**» доведено доцільність застосування методів функціональної діагностики для електротехнічного обладнання. У структурі електротехнічного комплексу харчових виробництв ключове місце займають асинхронні електродвигуни змінного струму з різними потужностями та частотою обертання. Від їх надійності, насамперед, залежить успішне функціонування всього технологічного обладнання підприємства і, як наслідок, випуск продукції.

З використанням генетичних алгоритмів вирішено оптимізаційну задачу розмірності простору вхідних параметрів моделі прогнозування надійності електродвигунів та визначено наступні важливі параметри діагностики: струм витікання, споживаний струм, навантаження, напруга живлення, частота обертання. Провівши статистичний аналіз даних, отриманих на виробництві, було визначено чутливість прогнозованої надійності від вхідних параметрів, ранг вхідних параметрів розподілився наступним чином: 1 – струм витікання (Var8); 2 – споживаний струм (Var7); 3 – навантаження (Var4); 4 – напруга живлення (Var6); 5 – частота обертання (Var5); 6 – тривалість роботи після останнього ремонту (Var3); 7 – частота відмов (Var2); 8 – загальна тривалість роботи (Var1).

Коефіцієнти чутливості вхідних параметрів моделі прогнозування викликали сумніви необхідності використання всіх експертно обраних вхідних даних. Для діагностики електродвигуна повною гарантією того, що вхідні дані вибрано найкращим чином, є перебір усіх можливих варіантів обраних вхідних наборів даних. Оскільки генетичні алгоритми виконують велику кількість експериментів із різними комбінаціями вхідних даних, це зумовило можливість їх застосування під час вирішення оптимізаційної задачі простору вхідних параметрів. Задача оптимізації формулюється як проблема вибору кращого допустимого рішення із можливих наборів вхідних параметрів за результатами спостереження, що визначається за критерієм оптимальності Q :

$$Q^* = Q(\bar{x}^*) = \max_{x \in D} (\min) Q(\bar{x})^*, \quad (6)$$

де \bar{x}^* – оптимальний розв'язок; $Q^* = Q(\bar{x}^*)$ – найменше значення критерію оптимальності (контрольної похибки) серед усіх його значень в області D .

Опрацювання експериментальних даних проведено в Genetic Algorithm Input Selection пакету ST Neural Networks, що реалізує автоматизований підхід до вибору вагомих вхідних даних, за аналогією встановивши вісім входів та один вихід. Де Var1 – загальна тривалість роботи; Var2 – частота відмов; Var3 – тривалість роботи після останнього ремонту; Var4 – навантаження; Var5 – частота обертання; Var6 – напруга живлення; Var7 – споживаний струм; Var8 – струм витікання.

Проведено оцінку кожного з наборів вхідних даних за контрольною похибкою, за значенням якої відбувався вибір кращих варіантів, що комбінуються один з одним за допомогою штучних генетичних операцій: схрещування та мутації. З отриманих результатів (табл. 9) очевидний висновок, що не всі вхідні параметри, обрані для діагностики надійності електродвигуна, значимі щодо оптимізації простору входів. Між тим значимість факторів, виходячи з робочої похибки у разі подачі на вхід всіх параметрів, перевищує похибку оптимізованого простору входів Var4 – Var8. Отже, для побудови нейронної мережі доцільно використовувати лише дослідні дані Var4 – Var8 із рангом чутливості прогнозованої надійності від вхідних параметрів 1–5.

Таблиця 9

Результат оптимізації простору входів

Вичерпне значення									
	Помилка	1	2	3	4	5	6	7	8
1.233	0.403639	Так	Так	Так	–	Так	–	–	–
1.234	0.403481	Так	Так	Так	–	Так	–	–	Так
1.235	0.402901	Так	Так	Так	–	Так	–	Так	–
1.236	0.402772	Так	Так	Так	–	Так	–	Так	Так
1.237	0.396737	Так	Так	Так	–	Так	Так	–	–
1.238	0.396584	Так	Так	Так	–	Так	Так	–	Так
1.239	0.398251	Так	Так	Так	–	Так	Так	Так	–
1.240	0.398119	Так	Так	Так	–	Так	Так	Так	Так
1.241	0.405358	Так	Так	Так	Так	–	–	–	–
1.242	0.405241	Так	Так	Так	Так	–	–	–	Так
1.243	0.404548	Так	Так	Так	Так	–	–	Так	–
1.244	0.404461	Так	Так	Так	Так	–	–	Так	Так
1.245	0.399975	Так	Так	Так	Так	–	Так	–	–
1.246	0.399864	Так	Так	Так	Так	–	Так	–	Так
1.247	0.399602	Так	–	Так	–	–	Так	Так	Так
1.248	0.403540	Так	–	Так	–	Так	–	–	–
1.249	0.403382	Так	–	Так	–	Так	–	–	Так
1.250	0.402802	Так	–	Так	–	Так	–	Так	–
1.251	0.402673	Так	–	Так	–	Так	–	Так	Так
1.252	0.398639	Так	–	Так	–	Так	Так	–	–
1.253	0.398486	Так	–	Так	–	Так	Так	–	Так
1.254	0.398153	Так	–	Так	–	Так	Так	Так	–
1.255	0.398021	Так	–	Так	–	Так	Так	Так	Так
1.256	0.397787	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так
Кінець	0.398549	–	–	–	Так	Так	Так	Так	Так

З рисунків поверхні відгуку між вхідними параметрами та надійністю роботи електродвигуна (рис. 7–8) впливає очевидний нелінійний взаємозв'язок між параметрами, також спостерігається зменшення прогнозованої надійності роботи електродвигуна у разі зменшенні частоти обертання та збільшенні середнього навантаження, споживаного струму та струму витікання.

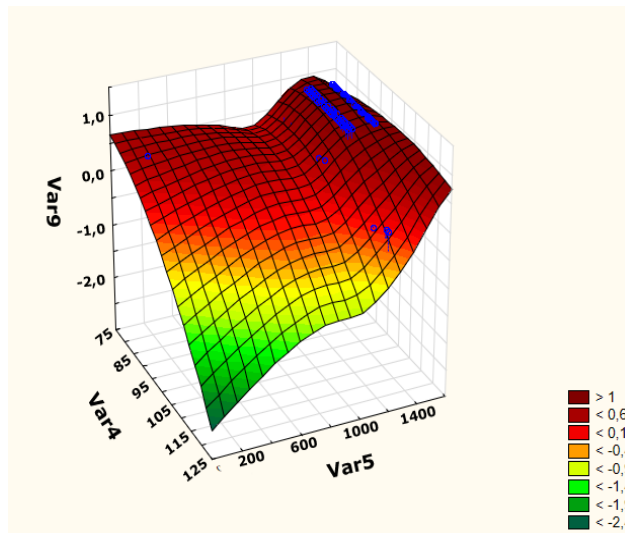


Рис. 7. Поверхня відгуку між вхідними і вихідним параметром

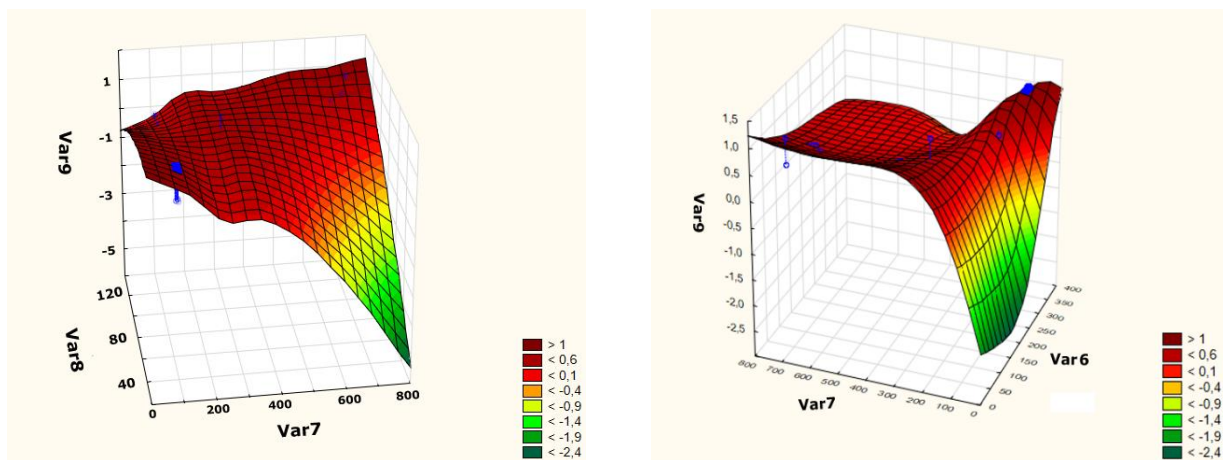


Рис. 8. Поверхня відгуку між вхідними і вихідним параметром

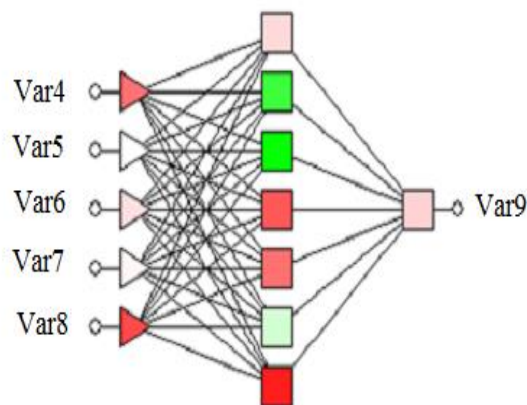


Рис. 9. Архітектура нейронної мережі прогнозування надійності роботи електродвигуна

Для прогнозування надійності електродвигунів розроблено структуру інтелектуальної системи прогнозування на основі нейронних мереж (рис. 10), результати моделювання якої показують ефективність прогнозу відмов 96 %. Для практичного використання синтезованої нейронної мережі в інтелектуальній

системі діагностики та прогнозування надійності роботи електродвигунів згенеровано код мовою програмування «С++».

Розроблена нейронна мережа прогнозування надійності електродвигунів дає змогу виявляти дефекти електротехнічного обладнання та контролювати стан машин, тим самим прогнозуючи термін їх роботи. Вектор прогнозованої надійності електротехнічного обладнання буде подаватися в систему підтримки прийняття рішень на рівень управління виробництвом, де формується поточна програма технічного обслуговування на підставі надійності. Це сприятиме значному заощадженню коштів підприємства на ремонтах, позапланових зупинках та на заходах із запобігання аваріям.



Рис. 10. Структура інтелектуальної системи прогнозування надійності електродвигуна*

Примітка. *СППР – система підтримки прийняття рішень; ОПР – особа, що приймає рішення

Для виявлення можливих несправностей на ранніх стадіях діагностики первинних вимірювальних перетворювачів розроблено структурно-логічну схему етапів виявлення несправностей первинних вимірювальних перетворювачів, яка базується на результатах проведеного статистичного аналізу технологічних вимірювань із використанням контрольних карт Шухарта, тестового діагностування і аналізу графіка ремонтних і профілактичних робіт технічних засобів, що на ранніх стадіях вказують на появу проблеми і дають час оператору для виявлення різних типів поломок.

Для підвищення ефективності використання електротехнічного обладнання харчових виробництв шляхом оптимізації машинного часу використання обладнання, розвинуто ресурсно-процесний підхід скорочення тривалості машинного часу реалізації добової виробничої потужності підприємства, що дозволяє підвищити енерго- та ресурсоефективність харчових виробництв. Методична реалізація такого підходу на харчових виробництвах цілком допустима, оскільки підприємства функціонують на основі заданої виробничої потужності підприємства (рис. 11), як правило на добу або зміну, виходячи зі специфіки перероблення продукції та економічних планів виробництва. Очевидно, що електротехнічний комплекс харчового виробництва у контексті забезпечення виробничої потужності підприємства – це розподілена мережа, у якій початкова сировина у результаті використання енергетичних

ресурсів поетапно перетворюється у напівфабрикати, а на кінцевому етапові – у готовий продукт, що створює передумови для використання ресурсно-процесного підходу щодо мінімізації машинного часу реалізації виробничих завдань.



Рис. 11. Концепція підвищення ефективності використання електротехнічного обладнання шляхом оптимізації машинного часу

Приймемо, що математична модель електротехнічного комплексу, як розподіленої мережі включає: $n \geq 2$ – кількість джерел розподіленої передачі сировини (напівфабрикатів); $p \geq 2$ – кількість кінцевих споживачів сировини (напівфабрикатів); $s \geq 2$ – кількість порцій (блоків) структурованих конкуруючих потоків сировини (напівфабрикатів) від джерел; $T = [t_{ij}]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$ – матрицю термінів передачі сировини (напівфабрикатів) i -м джерелом із j -го діапазону; $C = [c_{ij}]_{n \times s}$ – матрицю вартості одиниці електроенергії із j -го цінового діапазону; $\varepsilon > 0$ – параметр, що характеризує системний час, який витрачається на організацію паралельної передачі сировини (напівфабрикатів) від n джерел p кінцевим споживачам.

У випадку, коли число блоків структурованих потоків сировини (напівфабрикатів) дорівнює кількості кінцевих споживачів, тобто $s = p$, Для знаходження величини $T_n^2(p, n, s, \varepsilon)$ отримаємо формулу:

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{p-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i, j+1}^\varepsilon \right] + \sum_{i=1}^n t_{ip}^\varepsilon \quad (7)$$

де $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$ – $n \times s$ – матриця термінів передач блоків сировини (напівфабрикатів) i -м джерелом із j -го цінового діапазону електроенергії з врахуванням накладних витрат ε .

У випадку, коли число кінцевих споживачів системи більше числа блоків структурованих потоків сировини (напівфабрикатів) ($s < p$) результуюча матриця RM термінів передачі джерелами кінцевим споживачам складатиметься з $k+1$ матриць T^ε , причому матриці міститимуть тільки r перших стовпчиків:

$$RM = [t_{ij}^\varepsilon]_{n \times p} = \begin{bmatrix} t_{11}^\varepsilon & t_{12}^\varepsilon & \dots & t_{1s}^\varepsilon & t_{11}^\varepsilon & t_{12}^\varepsilon & \dots & t_{1s}^\varepsilon & \dots & t_{11}^\varepsilon & t_{12}^\varepsilon & \dots & t_{1r}^\varepsilon \\ t_{21}^\varepsilon & t_{22}^\varepsilon & \dots & t_{2s}^\varepsilon & t_{21}^\varepsilon & t_{22}^\varepsilon & \dots & t_{2s}^\varepsilon & \dots & t_{21}^\varepsilon & t_{22}^\varepsilon & \dots & t_{2r}^\varepsilon \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{n1}^\varepsilon & t_{n2}^\varepsilon & \dots & t_{ns}^\varepsilon & t_{n1}^\varepsilon & t_{n2}^\varepsilon & \dots & t_{ns}^\varepsilon & \dots & t_{n1}^\varepsilon & t_{n2}^\varepsilon & \dots & t_{nr}^\varepsilon \end{bmatrix} \quad (8)$$

З урахуванням формули (6) мінімальний загальний час забезпечення n альтернативними джерелами сировини p кінцевих споживачів за умови $s < p$ буде визначатися з виразу:

$$T_n^2(r, n, r, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{r-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^\varepsilon \right] + \sum_{i=1}^n t_{ir}^\varepsilon \quad (9)$$

У випадку, коли кількість потоків сировини (напівфабрикатів) $s \geq 2$ більше числа кінцевих споживачів $p \geq 2$, тобто є обмеженим ($s > p$), тоді робимо розбиття множини блоків на $k+1$ групу по p блоків у кожній, за винятком останньої, яка за p не кратне s буде містити r блоків: $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$. Це рівносильно розбиттю вихідної матриці часів передачі сировини (напівфабрикатів) i -м джерелом з j -го цінового діапазону електроенергії із врахуванням системних витрат $\varepsilon > 0$ $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$, на $k+1$ під матрицю по p стовпців у кожній, причому під матрицю в $k+1$ разів, коли s не кратне p , буде містити r стовпців. Із аналізу послідовних діаграм Ганта випливає, що:

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) = T_n^2(p, n, kp, \varepsilon) = \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon - \Omega, \quad (10)$$

де T_l^ε знаходиться за формулами (5 або 7), а величина Ω є величиною максимально допустимого сумарного суміщення сусідніх діаграм Ганта по осі часу:

$$\Omega \geq \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l', \omega_l''\}, \quad (11)$$

$$\text{де } \omega_l' = \min_{1 \leq j \leq p} \{T_l^\varepsilon - E_{nj}^{\varepsilon, l} + B_{1j}^{\varepsilon, l+1}\}, \quad \omega_l'' = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ \sum_{q=1}^{i-1} t_{q1}^{\varepsilon, l+1} + \sum_{q=i+1}^n t_{qp}^{\varepsilon, l} \right\}, \quad l = \overline{1, k-1}.$$

де ω_l' і ω_l'' є відрізками максимально допустимого суміщення по осі часу l -ої і $(l+1)$ -ої діаграм.

У результаті експериментально встановлено, що на досліджуваному підприємстві із використанням ресурсно-процесної оптимізації місячна нераціональна витрата електроенергії зменшилася на 6,8 % за рахунок зменшення сумарного холостого ходу електродвигунів, нагріву та охолодження печей, роботи компресорів.

У четвертому розділі «Синтез стратегій ефективного керування технологічними процесами харчових виробництв» на основі запропонованого класифікатора нештатних ситуацій реалізовано систему моніторингу нештатних ситуацій та підтримки прийняття рішень на підприємствах харчової промисловості, що дає змогу вирішити задачі оперативного розпізнавання нештатної ситуації та інформаційної підтримки диспетчерського персоналу у прийнятті термінових і адекватних заходів з її локалізації. Основна ідея розробленої стратегії управління полягає в забезпеченні в реальних умовах функціонування виробництва своєчасного та вірогідного виявлення і розпізнавання нештатної ситуації, оцінювання факторів ризиків і на цій основі забезпечення своєчасного усунення причин ризиків до появи відмов та інших небажаних наслідків. Реалізацію розробленої системи (рис. 12) виконано за допомогою TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) компанії Siemens.

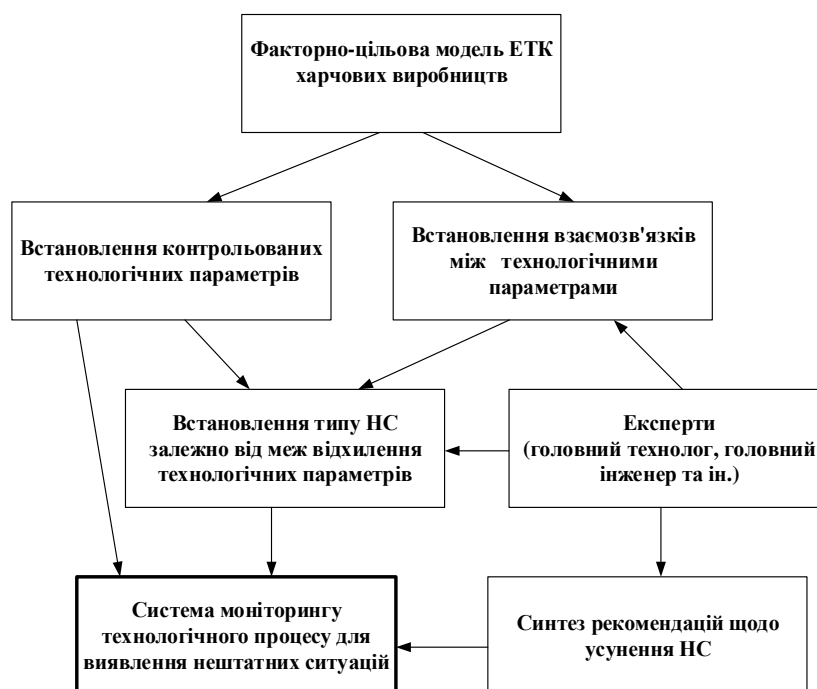


Рис. 12. Стратегія синтезу системи моніторингу технологічного процесу для виявлення нештатних ситуацій*

*Примітка. ЕТК – електротехнічний комплекс; НС – нештатна ситуація

Системи автоматизованого керування електротехнічними об'єктами харчової промисловості за штатного режиму працюють за критерієм, що визначається технологічним регламентом. Втім, розрахунок параметрів налаштування керуючого пристрою проводять, як правило, для лінійної моделі з постійними коефіцієнтами з урахуванням запасу стійкості системи. В момент переходу системи в нештатний режим значно зростає структурна та

параметрична невизначеність системи і система керування може втратити стійкість. Для забезпечення стійкості системи рекомендовано в нештатному режимі використати робастні системи керування.

У разі нештатного режиму технологічний процес піддається дестабілізуючим внутрішнім впливам, що проявляються на математичній моделі об'єкта як параметричні та мультиплікативні. Таким чином, критерієм оптимізації можна обрати вектор:

$$\left\| \begin{matrix} \mathbf{W}_1(s)\mathbf{S}(s) \\ \mathbf{W}_2(s)\mathbf{T}(s) \end{matrix} \right\|_{\infty} \rightarrow \min_{\mathbf{K}(\theta,s)}, \quad (12)$$

де $\mathbf{K}(\theta, s)$ – передавальна функція регулятора з вектором параметрів θ . Структуру регулятора $\mathbf{K}(\theta, s)$ можна обрати самостійно, виходячи з апіорних даних про функціонування технологічного об'єкта та простоти реалізації. Критерій (12) є різновидом так званих задач «weighted mixed sensitivity», розв'язок яких зводиться до «2-Ріккати»-підходу без задання структури регулятора. Однак, в даній роботі оптимізаційну задачу розв'язано методом негладкого синтезу, тим самим фіксуючи структуру $\mathbf{K}(\theta, s)$. На прикладі хлібопекарської печі в роботі продемонстровано кращі властивості системи з робастним регулятором в умовах виникнення нештатних ситуацій, а саме область параметричної та структурної невизначеності, за якої система залишається стабілізованою, ширше на 11–18 %.

Стічні води підприємств харчової промисловості різноманітні як за компонентним складом, так і за концентрацією і є складною фізико-хімічною системою, в якій поряд із розчиненими речовинами містяться частинки різного ступеня дисперсності. Водночас, у результаті дії нештатних ситуацій можливі залпові викиди забруднювачів, коли останні у кілька разів перевищують свої проектні значення, створюючи значну екологічну небезпеку для довкілля, що вимагає впровадження новітніх методик використання технічних засобів превентивної протидії таким нештатним ситуаціям. Застосовувані на промислово-комунальних об'єктах методи і технології очищення висококонцентрованих стоків є недосконалими і в ряді випадків не забезпечують необхідний ступінь очищення і утилізацію всіх побічних продуктів. Водночас, на етапі проектування комплексно не враховується потенційна дія нештатних ситуацій, що негативно впливає на експлуатаційну надійність електротехнічного комплексу харчових виробництв.

Розроблено підсистему інтелектуального керування у випадку виникнення нештатних ситуацій на очисних спорудах, що здатна передбачити можливість оперативного збільшення витрат реагентів та включити у схему електротехнологічного комплексу ефективного очищення стоків блок утилізації висококонцентрованих стоків у вигляді електротехнологічного комплексу електродіалізера. Завдання блоку утилізації та протидії залповим викидам у разі нештатних ситуацій забезпечити електротехнічні процеси для:

- збільшення доз реагентів нейтралізації;
- збільшення доз флокулянтів;

- збільшення доз коагулянтів;
- можливого транспортування концентрованих стоків повз біологічне очищення – мікроорганізми у біореакторах можуть загинути, наприклад, від залпових викидів токсичних сполук;
- збільшення доз на знезараження;
- інтенсифікація біологічних процесів (під час використання обладнання);
- вибору режимів блоку утилізації.

Розрахунок підвищених доз та блоку живлення електродіалізера виконано експериментально на основі оцінки викидів при нештатних ситуаціях на харчових виробництвах.

Значення витрат змінювалось від 20 до 110 м³/год із кроком 30 м³/год. Розрахунок базувався на типових рекомендаціях проектування електродіалізерів.

Отримані результати імітаційної оцінки продемонстрували прийнятність запропонованого підходу застосування електротехнологій протидії нештатних ситуацій стосовно електроенергетичних характеристик (рис. 13–14).

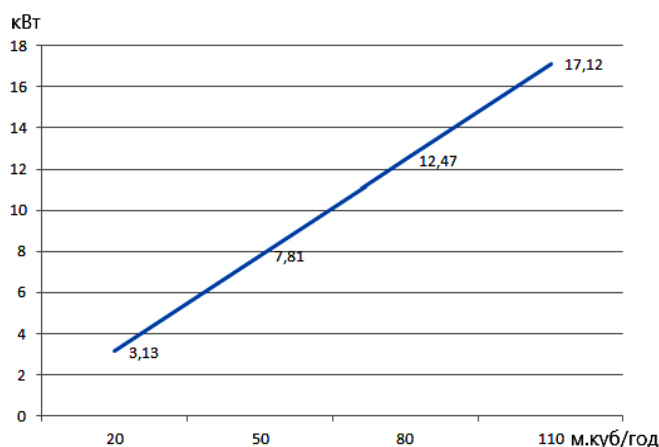


Рис. 13. Теоретична оцінка витрат електроенергії в електродіалізній установці за змінних витрат стоків

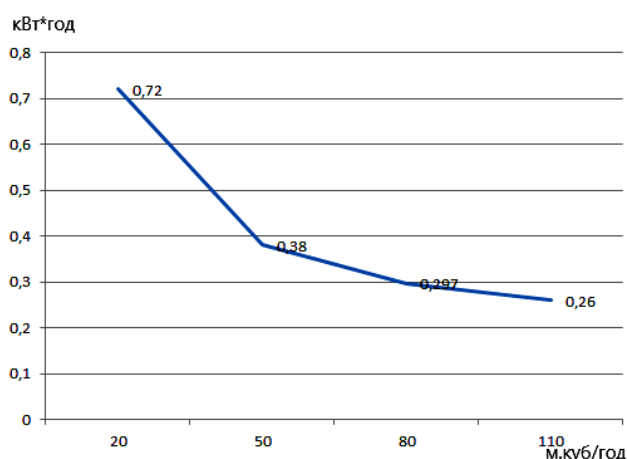


Рис. 14. Теоретична оцінка витрат електроенергії на очищення 1 м³ водного розчину електродіалізним комплексом за змінних витрат стоків (враховується функціонування електронасосних агрегатів)

Експериментальні дослідження проводилися на реальних стоках молокозаводу, хлібокомбінату, спиртового та цукрового підприємств, для яких використовували кислотні стічні води. Для вирішення такого завдання було розроблено експериментальний проточний багатосекційний електродіалізер. Матеріал анода – оксид-рутенія-титановий анод; катода – нержавіюча сталь; корпусу – діелектричний пластик. Джерело живлення (струму) – MEAN WELL-10A-24B.

Міжелектродна відстань – 3 мм. Об'єм опрацьовуваної стічної води – 1,5 л. Матеріал іонселективної мембрани – NM-MBR-1520. Принцип роботи – замкнутий байпасний циркуляційний контур.

Проаналізувавши ключові забруднювачі досліджуваних підприємств та наявних базових способів очищення стічних вод, прийшли до висновку, що завданням електродіалізного блоку буде очищення від хлоридів. Однак, враховуючи наявність у всіх стоках та ефективність пропонованого підходу для усунення розчинених органічних забруднювачів, також контролюватиметься інтегральний параметр хімічного споживання кисню.

Дози флокулянтів та коагулянтів марки YANGFLOC встановлювалися згідно аналітичних залежностей ДБН В.2.5-75:2013 «Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування» за виконання умов:

- окислюваність – не більше 5 мгО₂/дм³;
- концентрація завислих частинок – не більше 2 мг/дм³;
- сумарна концентрація загального заліза та марганцю – не більше 0,05 мг/дм³.

Оцінка показників стічних вод «Концентрація хлоридів» і «Хімічне споживання кисню» до опрацювання та після нього виконувалася в атестованій лабораторії аналізу складу водних розчинів.

У результаті експериментальних досліджень було досягнуто необхідної якості очищення (табл. 10).

Таблиця 10

Результати експериментального опрацювання реальних стічних вод підприємств

Об'єкт водоскиду	Стічні води (до корегування концентрації хлоридів)		Після флокулянтно-коагулянтного опрацювання		Після електродіалізного опрацювання	
	Хлориди, мг/л	Хімічне споживання кисню, мгО ₂ /л	Хлориди, мг/л	Хімічне споживання кисню, мгО ₂ /л	Хлориди, мг/л	Хімічне споживання кисню, мгО ₂ /л
Молокозавод	780	2654	1523	432	144	17
Хлібокомбінат	304	467	304	96	136	12
Спиртзавод	437	1673	642	123	113	16
Цукровий завод	567	2410	708	83	127	10

Примітка. Згідно даних атестованої лабораторії якості стічних вод розширено невизначеності типу В вимірювання параметрів якості (P=0,95): хлориди – ±4,5 %, хімічне споживання кисню – ±5,5 %

Проведені дослідження дозволили встановити прийнятність запропонованого підходу та визначити енергозатрати на протидію нештатним ситуаціям для харчових підприємств із використанням електродіалізного обладнання. Підвищені енергозатрати у порівнянні з теоретичними дослідженнями викликані тим, що електроенергія під час електродіалізу використовувалася і на видаленні інших забруднювачів (підтверджено зменшенням значень хімічного споживання кисню до вимог нормативних документів – редуція 97–98 %).

Враховавши розширену невизначеність вимірювань типу В, вираз для встановлення загальних енергозатрат на протидію нештатним ситуаціям матиме вигляд:

$$\text{Енерговитрати} = (E_{МК} \pm PH) \cdot НО, \text{ кВт} \quad (13)$$

де $E_{МК}$ – енерговитрати на очистку 1 м³ до гранично допустимих концентрацій, кВт/м³; PH – розширена невизначеність вимірювань типу В; $НО$ – загальний об'єм залпових викидів (сировина, що знаходиться в технологічних місткостях та водні розчини, що застосовуються у виробничих процесах), який обов'язково потрібно очистити у випадку виникнення нештатним ситуаціям, м³.

Тоді на основі експериментальних досліджень, за умови об'єктно-орієнтованої адаптації:

для молокозаводів:

$$\text{Енерговитрати} = (1,42 \div 1,57) \cdot НО, \text{ кВт} \quad (14)$$

для хлібокомбінатів:

$$\text{Енерговитрати} = (0,86 \div 0,94) \cdot НО, \text{ кВт} \quad (15)$$

для спиртзаводів:

$$\text{Енерговитрати} = (1,15 \div 1,25) \cdot НО, \text{ кВт} \quad (16)$$

для цукрових заводів:

$$\text{Енерговитрати} = (1,53 \div 1,67) \cdot НО, \text{ кВт} \quad (17)$$

Провівши аналіз технологічних ліній та можливих об'ємів залпових викидів у вигляді сировини, що знаходиться в технологічних місткостях та водних розчинів, що застосовуються у виробничих процесах харчових підприємств, встановлено мінімальні та максимальні об'єми стоків, які потрібно очистити у разі виникнення нештатних ситуацій. Отже, для забезпечення ефективної протидії нештатним ситуаціям на харчових виробництвах за каналом «водоскид» необхідно: передбачити на основних очисних спорудах можливість оперативного збільшення витрат реагентів та інших ресурсів при настанні нештатних ситуацій; включити у схему водоочищення блок утилізації висококонцентрованих стоків, застосувавши у якості останнього електротехнологічний комплекс електродіалізера.

Найважливішим процесом, що зв'язує всі основні функції управління складними електротехнічними комплексами харчових виробництв, є розроблення управлінських рішень, оскільки саме швидкість прийняття рішень визначає ефективність роботи комплексу. Наявні системи управління не забезпечують швидкого комплексного реагування на оперативні зміни ситуаційної поведінки досліджуваного об'єкта, які залежать від багатьох факторів технологічного та організаційного характеру. Для прийняття рішень в

умовах дефіциту точної кількісної інформації експерти й аналітики змушені виходити із власного досвіду та інтуїції. Логіку розвитку подій на багатофакторному полі визначити вкрай важко. Для цього в роботі використано комп'ютерні засоби когнітивного моделювання ситуацій на основі нечіткої когнітивної карти. Втім, одним із суперечливих питань створення нечіткої когнітивної карти є розроблення на початковому етапі матриці взаємовпливів концептів. Оскільки більшість фактичної інформації по об'єкту управління отримується з експертних оцінок, то вона багато в чому має суб'єктивний характер. Причому думки експертів з одного і того ж питання можуть істотно, іноді принципово, відрізнятись. Тому актуальним є завдання оптимального узагальнення експертних думок з метою побудови адекватної нечіткої когнітивної карти.

Відповідна структура нечіткої когнітивної карти розроблялася з урахуванням експериментальних досліджень і об'єктно-орієнтованого аналізу електротехнічного комплексу харчових виробництв (рис. 15). Виходячи з технологічних особливостей досліджуваного об'єкта, задається інтервал, через який виконується сценарне планування.

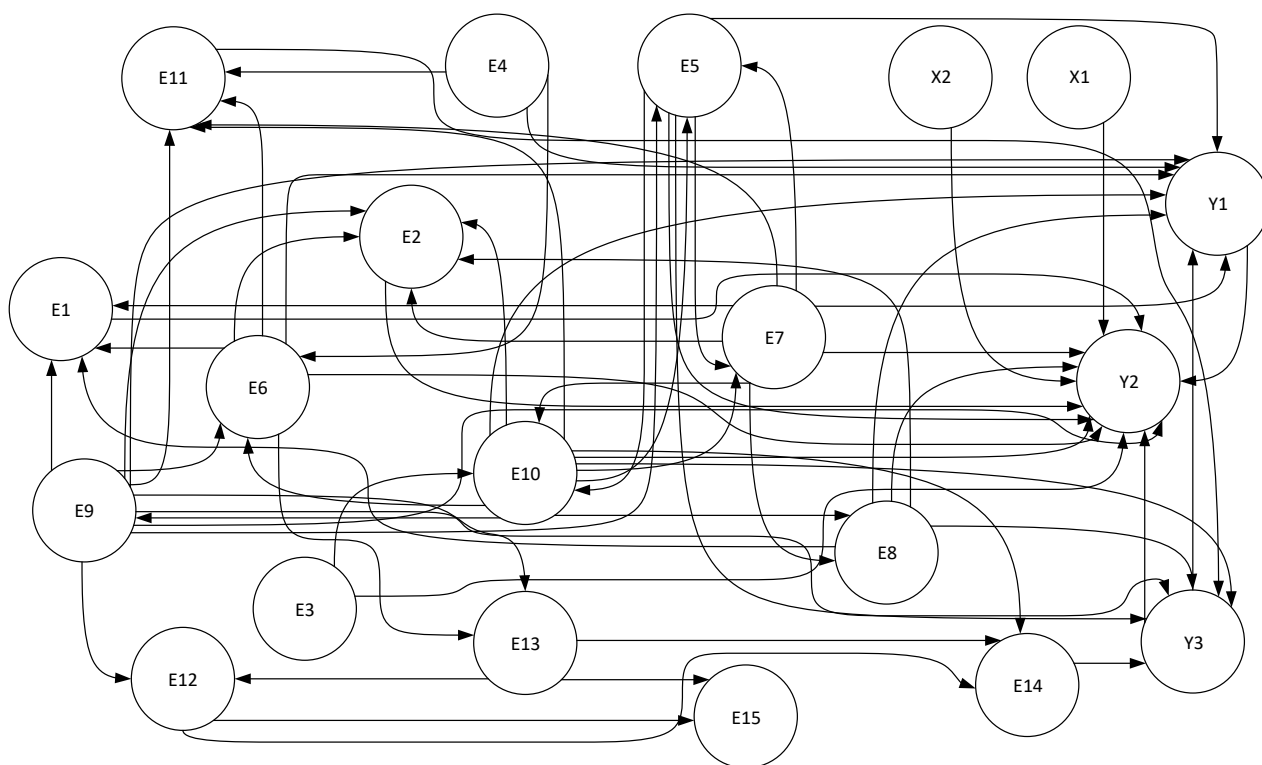


Рис. 15. Модель електротехнічного комплексу харчових виробництв у вигляді нечіткої когнітивної карти

Експертно обрано такі елементи матриці взаємовпливу нечіткої когнітивної карти:

1. Проміжні концепти: E1 – Витрати газу; E2 – Витрати електроенергії; E3 – Якість електроенергії; E4 – Тиск газу в трубопроводі на вході виробництва; E5 – Час роботи технологічних ліній; E6 – Відхилення параметрів технологічного процесу; E7 – Об'єм продукту, що надходить на переробку; E8 – Степінь використання обладнання; E9 – Час простою технологічного обладнання;

E10 – Відмова електротехнічного обладнання; E11 – Об’єм браку під час запуску та виробничого браку; E12 – Якість води на вході очисних споруд; E13 – Залпові викиди продукту/стічних вод; E14 – Якість очистки стічних вод; E15 – Застосування електродіалізної очистки.

2. Вхідні дії: X1 – Вартість газу; X2 – Вартість електроенергії.

3. Вихідні дії: Y1 – Продуктивність; Y2 – Енергоефективність; Y3 – Ефективність використання обладнання.

Формування значень вагових коефіцієнтів взаємовпливу концептів на основі експертних оцінок вирішить проблему неможливості оперативного опитування експертів у разі зміни параметрів функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв.

Враховуючи відсутність будь-яких законів розподілу експертних оцінок для узагальнення експертної оцінки взаємовпливів концептів нечіткої когнітивної карти, некоректно використовувати методи статистичного аналізу даних. Для групування експертних оцінок і визначення єдиного значення використано методи кластерного аналізу, що використовуються на початковій стадії дослідження тоді, коли не має будь-яких апріорних гіпотез щодо класів. Ціллю кластерного аналізу є визначення центра кластера з найбільшою кількістю даних, що і буде шуканим значенням експертної оцінки взаємовпливу концептів.

Якщо кількість експертних оцінок = n , то набір експертних оцінок описується виразом $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Кількість кластерів = k , де $k \in N, k \leq n$.

Необхідно розділити множину спостережень X на k кластерів $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ таким чином, щоб мінімізувати суму квадратів відстаней від кожної точки кластера до його центра:

$$\arg \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} p(x, \mu_i)^2, \quad (18)$$

де μ_i – центри кластерів; $i = 1, \dots, k$, $p(x, \mu_i)$ – функція відстані між X та μ_i .

У результаті проведених досліджень запропоновано наступну стратегію узагальнення експертної оцінки взаємовпливів концептів:

1. Формування матриці експертних оцінок.

2. Розрахунок стандартизованих значень експертних оцінок.

3. Проведення ієрархічної класифікації та визначення необхідної кількості кластерів.

4. Проведення кластерного аналізу методом K -середніх.

4.1. Вибирається кількість кластерів та множина точок $\mu_i, i=1, \dots, k$, що розглядається як початкові центри кластерів: $\mu_i^{(0)} = \mu_i$

4.2. Відбувається розподіл векторів за кластерами:

$$t: \forall x_i \in X, i = 1, \dots, n : x_i \in S_j \Leftrightarrow j = \arg \min_k p(x_i, \mu_k^{(t-1)})^2 \quad (19)$$

та розраховується евклідова відстань між векторами $x_i \in X, i = 1, \dots, n$ та центрами кластерів μ_1, \dots, μ_k .

4.3. Перераховуються центри кластерів:

$$t: \forall i = 1, \dots, k: \mu_i^{(t)} = \frac{1}{|S_i|} \sum_{x \in S_i} x \quad (20)$$

4.4. Перевіряються умови зупинки:

якщо $\exists i \in \overline{1, k}: \mu_i^{(t)} \neq \mu_i^{(t-1)}$ тоді $t = t + 1$ і перехід до кроку 4.2, у протилежному випадку – перехід до кроку 5.

5. Розрахунок значимості кластерів:

5.1. якщо значимість $p < 0,05$, тоді переходимо до кроку 6.

5.2. якщо значимість $p > 0,05$, тоді переходимо до кроку 4.1.

6. Визначаємо значення центру кластера із найбільшою кількістю змінних.

7. Завершення алгоритму кластеризації.

За запропонованої стратегії кластерного аналізу розраховуються значення для всіх вагових коефіцієнтів концептів нечіткої когнітивної карти електротехнічного комплексу. Для створення та дослідження нечіткої когнітивної карти підприємства використовуємо спеціалізований програмний продукт FCMapper, де реалізовано узагальнений математичний апарат нечітких когнітивних карт.

Реалізуючи розроблену матрицю вагових коефіцієнтів концептів нечіткої когнітивної карти проведено аналіз її структурних характеристик:

- 4 концепти виконують функції лише передавачів (Transmitter);
- 1 концепт тільки отримує інформацію (Receiver);
- 15 концептів є «прийомо-передавачами» (Ordinary).

Проаналізовано структурно-функціональні характеристики матриці концептів за вагомістю впливу на вихідні цільові параметри (табл. 11), а відповідно і на ефективність функціонування підприємства.

Таблиця 11

Структурні характеристики нечітких когнітивних карт підприємства

Concepts	Outdegree	Indegree	Centrality	Transmitter	Receiver	Ordinary
E1	1,00	1,26	2,26			1
E2	1,00	1,94	2,94			1
E3	0,90	0,00	0,90	1		
E4	0,61	0,00	0,61	1		
E5	1,89	2,68	4,57			1
E6	2,80	1,66	4,46			1
E7	5,79	0,25	6,04			1
E8	1,39	1,12	2,51			1
E9	5,25	1,56	6,81			1
E10	4,99	1,04	6,03			1
E11	0,38	2,13	2,51			1
E12	1,37	1,08	2,45			1
E13	2,97	0,91	3,88			1
E14	0,66	3,43	4,09			1
E15	1,00	1,90	2,90			1
X1	0,10	0,00	0,10	1		
X2	0,10	0,00	0,10	1		
Y1	0,23	3,54	3,77			1
Y2	0,00	4,97	4,97		1	
Y3	0,37	3,33	3,70			1

Концепти поділено на три групи:

- впливові концепти: E7 (об'єм продукту, що надходить на переробку); E9 (час простою технологічного обладнання); E10 (відмова електротехнічного обладнання); E13 (залпові викиди продукту/стічних вод);

- концепти, що мають певний вплив: E5 (час роботи технологічних ліній); E6 (відхилення параметрів технологічного процесу); E12 (якість води на вході очисних споруд); E1 (витрати газу); E2 (витрати електроенергії); E14 (якість очищення стічних вод); E15 (застосування електродіалізного очищення);

- концепти, які мають незначний вплив на вихідні цільові параметри: E3 (якість електроенергії); E4 (тиск газу в трубопроводі на вході виробництва); E8 (ступінь використання обладнання); E11 (об'єм браку під час запуску та виробничого браку).

Проведене сценарно-когнітивне моделювання на прикладі експериментальних даних функціонування цукрового заводу показало, що зупинки виробництва та нештатні ситуації, які пов'язані із відмовою електротехнічного обладнання, відхиленням технологічного режиму та якістю очищення стічних вод мають суттєвий вплив на динаміку зміни продуктивності, енергоефективності та ефективності використання обладнання, тобто розроблений підхід до встановлення ефективних режимів функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв є обґрунтованим.

У п'ятому розділі **«Реалізація системи моніторингу і прогнозування роботи електротехнічного комплексу харчових виробництв»** показано результати виробничих випробувань системи ефективного функціонування електротехнологічного комплексу харчових виробництв на прикладі цукрового заводу. Розроблена система ефективного управління електротехнічного комплексу може використовуватися на середньому рівні будь-якої теперішньої інтегрованої автоматизованої системи керування та базується на виконанні наступних функцій: автоматизація збору та обробки оперативної інформації про хід виробництва; оперативне керування і регулювання основного виробництва; моніторинг технологічного процесу для виявлення нештатних ситуацій та вибір способу керування технологічним процесом; врахування нештатних ситуацій на очисних спорудах; прогнозування надійності електротехнічного обладнання; оперативний облік виробництва та оптимізація машинного часу використання обладнання; контроль якості продукції; аналіз техніко-економічних показників; синтез рекомендованої програми технічного обслуговування та ремонту обладнання та ін.

Для спрощення впровадження системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу на різнопрофільних підприємствах харчової промисловості синтезовано її універсальну структурно-логічну схему (рис. 16) та описано ключові етапи створення системи.

Для технічної та програмної реалізації розроблюваної системи використано комплексне середовище програмування на платформі Siemens TIA Portal v14. Розроблено програмне забезпечення для реалізації даної системи в SCADA системі користувача. Окремим розділом на SCADA системі показано досліджуваний електротехнічний комплекс цукрового виробництва із

візуалізацією основних технологічних параметрів (визначається за допомогою факторно-цільового аналізу електротехнічного комплексу цукрового виробництва) та стану електродвигунів, параметри яких передаються на інтелектуальну систему прогнозування надійності (рис. 17). Зображення поточної інформації про значення основних технологічних параметрів процесу можливе як у вигляді цифрового індикатора, так і у графічному вигляді зі зазначенням часу та дати останнього вимірювання параметра.

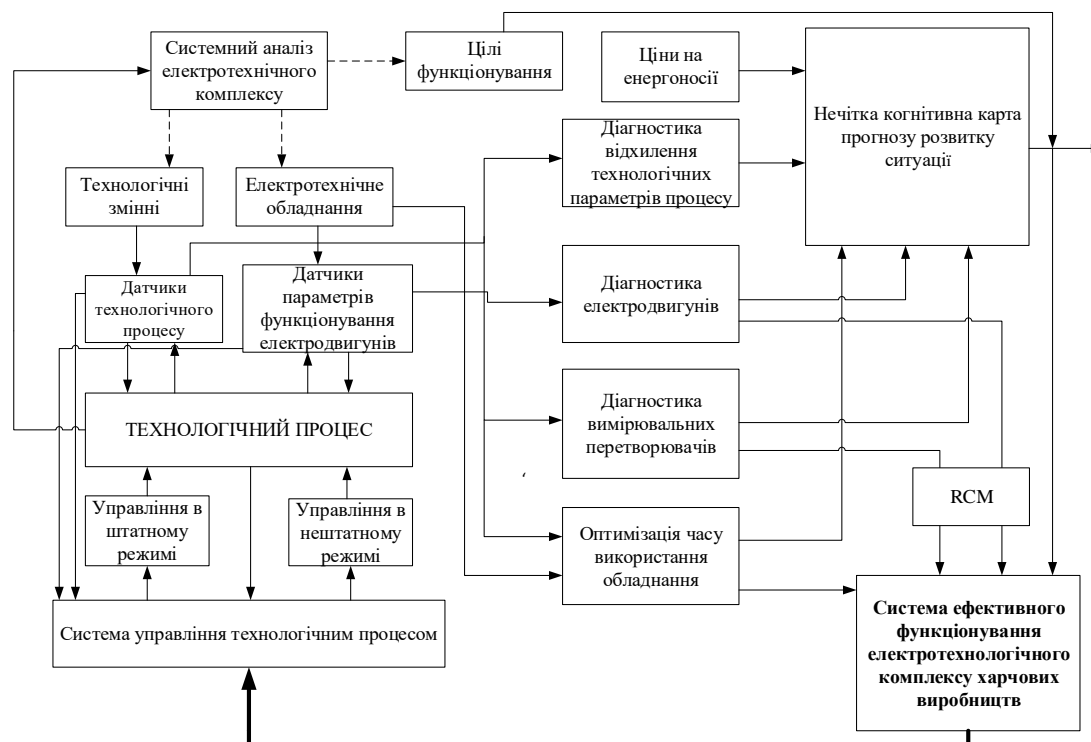


Рис. 16. Універсальна структурно-логічна схема системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв

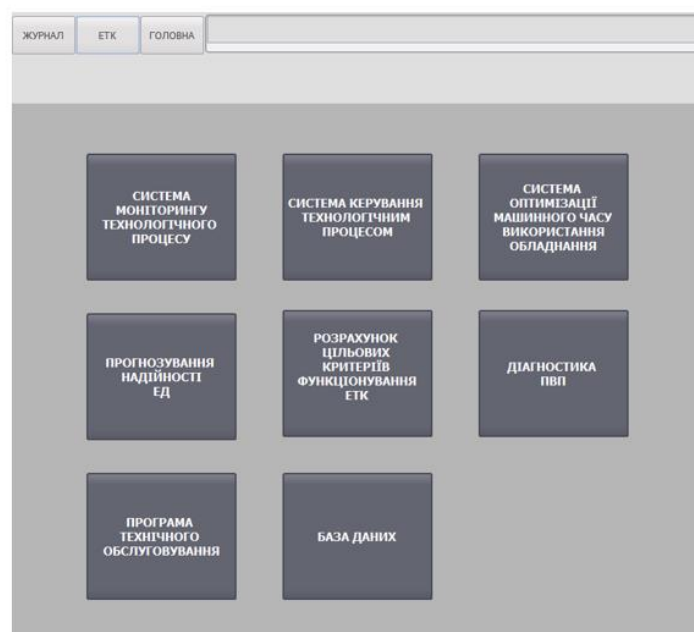


Рис. 17. Інтерфейс користувача системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу

Завдяки створенню системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв можливо отримати ефективні методи аналізу та прогнозування в області складних електротехнічних процесів, що характеризуються великими обсягами інформації. Для ефективного функціонування розроблюваної системи необхідно в повному обсязі реалізувати автоматизовані робочі місця всіх спеціалістів підприємства.

Для діагностики первинних вимірювальних перетворювачів, отримано повний перелік технологічних параметрів, а для перевірки системи прогнозування надійності електродвигунів, не було можливості отримати дані в повному обсязі, оскільки на виробництві попередньо не встановлювалися датчики параметрів функціонування електродвигунів. Тому з п'яти входів для нейронної мережі на виробництві отримано лише чотири: навантаження, частота обертання, напруга живлення та споживаний струм. Дані про значення струму витікання залишилися невідомими. Нейромережа отримала недостатню кількість вхідних даних, у порівнянні з етапом створення (відсутність одного входу – значення струму витікання), що викликало ситуацію параметричної невизначеності стосовно вхідної інформації. У результаті такої розмитості вхідних даних, якість прогнозу погіршилася та в середньому склала 54 %.

За експериментальними даними реального виробництва з використанням нечіткої когнітивної карти проведено сценарно-когнітивне моделювання, за допомогою якого отримали можливість порівняти реальну продуктивність, енергоефективність та ефективність використання обладнання із прогнозованими результатами нечіткої когнітивної карти. Експериментально встановлено, що відносна похибка прогнозу цільових критеріїв функціонування електротехнічного комплексу не перевищує 7 %. Отже, розроблена в дисертації нечітка когнітивна карта побудови сценарію розвитку ситуації на електротехнічному комплексі харчових виробництв може використовуватися для стратегічного управління підприємством із можливістю в реальному часі прогнозувати величину цільових показників функціонування.

На основі аналізу експериментальних даних, отриманих на цукровому заводі за період роботи протягом 153 днів виявлено, що 73 % простоїв виробництва пов'язані з несправністю електродвигунів. За результатами виробничої перевірки інтелектуальної системи прогнозування надійності електродвигунів виконано розрахунок економічної ефективності підприємства, припустивши, що розроблювана система вірно спрогнозує та зможе запобігти виникненню 54 % несправностей. У табл. 12 представлено результати аналізу базового варіанту роботи підприємства (варіант 1) і за умови впровадження системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу (варіант 2).

Таким чином, внаслідок збільшення фактичного робочого часу обладнання на 12,9 % загальний обсяг продукції збільшиться на 4,7 %, а енергоефективність зросте на 1,5 %, що призведе до збільшення чистого прибутку підприємства на 4,5 %, на суму 1,266 млн грн за незмінної вартості за одиницю товару (табл. 12). Між тим показник продуктивності збільшився на 10,2 %, а показники ОЕЕ – ОЕЕFP на 8,1 % і склали 70,93 %. Запропоновані

заходи дозволили перевести підприємство за цільовим показником ефективності обладнання харчових виробництв із середнього рівня на високий.

Таблиця 12

Розрахунок економічної ефективності на прикладі цукрового виробництва

Показник	Варіант 1	Варіант 2
Запланований час виробництва продукції, год	3192	3192
Запланований час роботи, год	3672	3672
Чистий час експлуатації, год	2495	2817
Час корисної експлуатації, год	3144	3144
Об'єм якісної продукції, тонн	27198	28462
Загальний об'єм продукції, тонн	29869	31255
Availability (A),%	86,93	86,93
Perfomance (T), %	79,36	89,60
Quality yield (Q), %	91,06	91,06
QV, %	100,00	100,00
OEE, %	62,82	70,93
OEEFP, %	62,82	70,93
Чистий прибуток, млн грн	27,803	29,069

Результати дисертації дають змогу впровадити на підприємствах харчової галузі систему енергетичного менеджменту (ISO 50001:2011), метою якої є надання можливості організаціям розробити системи та процеси, необхідні для поліпшення енергетичних характеристик, охоплюючи енергетичну ефективність, використання та споживання енергії (рис. 18). Для впровадження системи енергетичного менеджменту для підприємств харчової промисловості загальний міжнародний стандарт ISO 50001:2011 необхідно вдосконалити з урахуванням особливостей функціонування електротехнічних комплексів харчових виробництв.

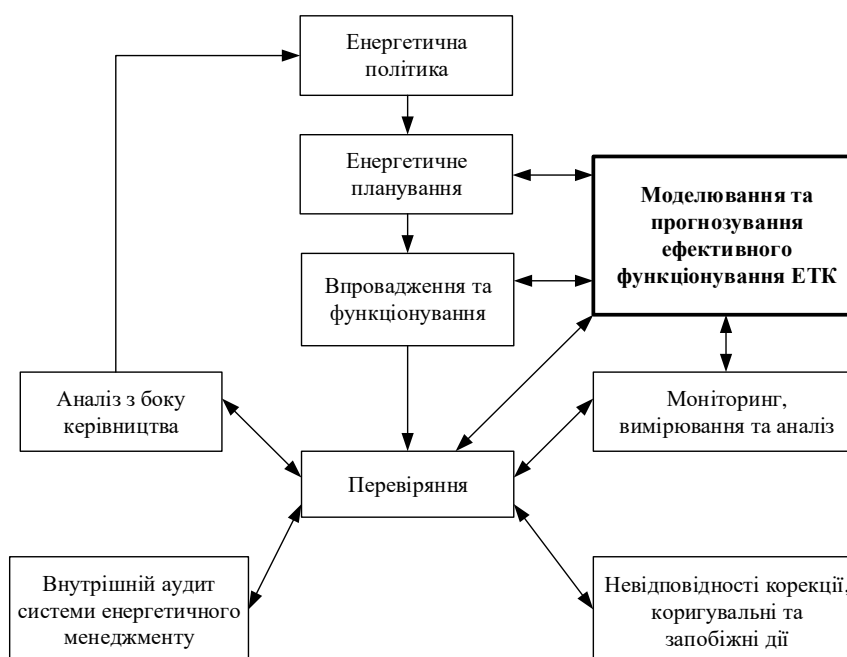


Рис. 18. Удосконалена модель енергетичного менеджменту (згідно ISO 50001:2011)

Відштовхуючись від запропонованої методики ефективного функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв створено концепцію ітеративного інтегрованого управління електротехнічними процесами підприємства. Такий енергетичний менеджмент на підприємстві впроваджується послідовно, згідно із запропонованою вдосконаленою моделлю енергетичного менеджменту.

Вимоги до системи енергетичного менеджменту та детальний опис всіх типових складових приведеної вдосконаленої моделі наведено в розділі 4 стандарту ISO 50001:2011. Водночас, використання в системі енергетичного менеджменту підсистеми моделювання та прогнозування ефективного функціонування електротехнічного комплексу дає можливість доповнити процес енергетичного планування новими ключовими етапами. На рис. 19 показано концептуальну схему, призначену для кращого розуміння процесу енергетичного планування та інструментів щодо підтримання і постійного поліпшення енергетичних характеристик харчових виробництв.



Рис. 19. Удосконалена концептуальна схема енергетичного планування (згідно ISO 50001:2011)

На етапі планування витрат окрім задач визначених стандартом, рекомендується за методом та стратегіями, що розроблені в дисертації, проводити сценарно-цільове прогнозування продуктивності та енергоефективності; для визначення можливостей покращення енергетичних

характеристик рекомендовано провести аналіз впливу нештатних ситуацій електротехнічного комплексу на енергоефективність; на кінцевому етапі планування виготовлення продукції необхідно також додатково ввести ідентифікатор ефективності використання обладнання, що є ключовим для оцінки енерго- і ресурсоефективності роботи електротехнічного комплексу харчових виробництв.

Підприємство, яке прийняло рішення про проведення енергетичного менеджменту, аудиту та сертифікації, отримує очевидну вигоду. Сертифікат 50001:2011 призведе до зменшення викидів в атмосферу парникових газів та інших впливів на довкілля, а також зменшення витрат завдяки систематизованому керуванню енергетичними ресурсами.

ВИСНОВКИ

У дисертації отримала подальший розвиток теорія керування електротехнічними комплексами харчових виробництв шляхом створення нової методики синтезу системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу. Отримані результати у сукупності є теоретичним узагальненням та вирішенням науково-прикладної проблеми створення нових методів прогнозування та запобігання виникненню нештатних ситуацій розробленням та впровадженням системи ефективного функціонування електротехнічних комплексів харчових виробництв, з урахуванням їх особливостей, як взаємопов'язаних організаційно-технологічних систем, що направлено на підвищення енергоефективності, ресурсоощадження та продуктивності. Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. На основі аналізу електротехнічних комплексів як складової технології харчового виробництва та наявних методів підвищення ефективності їх функціонування обґрунтовано доцільність розвитку теорії керування електротехнічними комплексами харчових виробництв шляхом створення нової методики синтезу системи їх ефективного функціонування. Запропоновано нову стратегію формулювання цілей функціонування електротехнічного комплексу, встановлення чітких взаємозв'язків між його складовими, визначення ключових технологічних апаратів та електротехнічного обладнання внаслідок системного аналізу та побудови факторно-цільової моделі електротехнічного комплексу харчових виробництв.

2. У результаті проведеного аналізу функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв, створено типовий класифікатор причин і наслідків виникнення нештатних ситуацій на підприємствах неперервного типу і розроблено стратегію синтезу системи моніторингу технологічного процесу та підтримки прийняття рішень, що дає змогу вирішувати задачі оперативного розпізнавання нештатної ситуації та інформаційної підтримки диспетчерського персоналу у прийнятті термінових і адекватних заходів з її локалізації.

3. Обґрунтовано формалізований процес формування комплексної програми технічного обслуговування та ремонту обладнання, що базується на принципах обслуговування на підставі надійності (Reliability-Centered

Maintenance ІЕС 60300-3-11:2009) з використанням підсистем прогнозування надійності первинних вимірювальних перетворювачів та електродвигунів. У результаті розроблено структуру системи реалізації програми технічного обслуговування, що включає не тільки процес аналізу стану електротехнічного обладнання, але й рекомендовані подальші дії, що необхідні для забезпечення цілей управління виробництвом.

4. Проведений аналіз функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв показав, що безперебійність роботи комплексу, його продуктивність, якість виготовленої продукції та очистки стічних вод визначають найбільш значні причини втрати ефективності виробництва. У результаті вдосконалено критерій оцінки ефективності використання обладнання за допомогою коефіцієнта якості очистки стічних вод, що покладено в основу вибору стратегії керування об'єктом.

5. Проведено систематизацію параметрів стоків для різнопрофільних підприємств харчового сегмента, створено перелік забруднювачів та визначено способи доведення їх до гранично допустимих концентрацій. Здійснено оцінку техногенних ризиків при виникненні нештатних ситуацій щодо водоскиду на харчових виробництвах та розроблено варіант комбінованого комплексу електротехнологічних процесів очищення стоків харчових виробництв із врахуванням дії нештатних ситуацій. Розроблено підсистему інтелектуального керування, що здатна у випадку виникнення нештатних ситуацій та залпових викидах стічних вод на очисні споруди, передбачити можливість оперативного збільшення витрат реагентів та включити у схему електротехнологічного комплексу очищення стоків харчових виробництв блок утилізації висококонцентрованих стоків, застосувавши у якості останнього електродіалізер.

6. Встановлено взаємозв'язки витрат електроенергії електротехнологічного комплексу очищення стоків харчових виробництв із врахуванням нештатних ситуацій в залежності від типу підприємства та об'єму стічних вод, що дає змогу в оперативному режимі визначити енергетичні та економічні показники функціонування такого комплексу.

7. Доведено доцільність застосування методів функціональної діагностики для електротехнічного обладнання. З використанням генетичних алгоритмів вирішено оптимізаційну задачу розмірності простору вхідних параметрів моделі прогнозування надійності електродвигунів та визначено наступні важливі параметри діагностики: струм витікання, споживаний струм, навантаження, напруга живлення, частота обертання. Для прогнозування надійності електродвигунів розроблено структуру інтелектуальної системи прогнозування на основі нейронних мереж, результати моделювання якої показують ефективність прогнозу відмов 96 %. Для практичного використання синтезованої нейронної мережі в інтелектуальній системі діагностики та прогнозування надійності роботи електродвигунів згенеровано код мовою програмування «С++».

8. Розроблено структурно-логічну схему етапів виявлення несправностей первинних вимірювальних перетворювачів на ранніх стадіях діагностики, яка базується на результатах проведеного статистичного аналізу технологічних

вимірювань із використанням контрольних карт Шухарта, тестового діагностування і аналізу графіка ремонтних і профілактичних робіт технічних засобів, що на ранніх стадіях вказують на появу проблеми й дають час оператору для виявлення різних типів несправностей.

9. Для підвищення ефективності використання електротехнічного обладнання харчових виробництв шляхом оптимізації машинного часу використання обладнання, розвинуто ресурсно-процесний підхід скорочення тривалості машинного часу реалізації добової виробничої потужності підприємства, що дозволяє підвищити енерго- та ресурсоефективність харчових виробництв. Встановлено, що на підприємстві внаслідок значного сумарного холостого ходу електродвигунів, нагріву та охолодження печей, роботи компресорів місячна нераціональна витрата електроенергії сягнула 6,8 % їх номінальної потужності.

10. Розроблено схему взаємозв'язку управлінських рівнів підприємства на основі факторно-цільової моделі електротехнічного комплексу харчових виробництв. Реалізовано стратегію вибору типу системи керування технологічним процесом для забезпечення стійкості в умовах виникнення нештатних ситуацій із використанням в нештатному режимі робастних систем керування. На прикладі хлібопекарської печі продемонстровано кращі властивості системи з робастним регулятором в умовах виникнення нештатних ситуацій, а саме область параметричної та структурної невизначеності, за якої система залишається стабілізованою ширше на 11–18 %.

11. Створено узагальнену структуру нечіткої когнітивної карти та побудовано сценарно-когнітивну модель для визначення ефективних стратегій та сценаріїв функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв і прогнозу його поведінки за різних керуючих впливів. У результаті проведених досліджень запропоновано нову стратегію узагальнення експертної оцінки взаємовпливів концептів на основі методів кластерного аналізу. Отримані результати сценарно-когнітивного моделювання цукрового заводу показали, що зупинки виробництва та нештатні ситуації, що пов'язані із відмовою електротехнічного обладнання, відхиленням технологічного режиму та якістю очищення стічних вод мають суттєвий вплив на динаміку зміни продуктивності, енергоефективності та ефективності використання обладнання.

12. Вірогідність розробленого методу ефективного функціонування електротехнічного комплексу із функцією прогнозування та можливість його впровадження на різнопрофільних підприємствах харчової промисловості ґрунтується на послідовному та коректному використанні запропонованої універсальної методики синтезу системи ефективного функціонування електротехнічного комплексу та алгоритмічно-програмного забезпечення. Адекватність підтверджується проведеними розрахунками на основі аналізу експериментальних даних, отриманих на цукровому заводі:

12.1. Результати порівняння реальних даних продуктивності, енергоефективності та ефективності використання обладнання із прогнозом сценарно-когнітивної моделі нечіткої когнітивної карти показали, що відносна похибка прогнозу цільових критеріїв функціонування електротехнічного

комплексу не перевищує 7 %, що, враховуючи складність електротехнічного комплексу як організаційно-технологічної системи, невизначеність його елементів та сценаріїв розвитку ситуації, підтверджує адекватність моделі та дає змогу використовувати її для стратегічного управління підприємством із можливістю в реальному часі прогнозувати величину цільових показників функціонування підприємства в залежності від прийнятих рішень.

12.2. Оскільки в реальних даних режимних параметрів роботи електродвигунів відсутні значення струму витікання, нейромережа отримала недостатню кількість вхідних даних у порівнянні із етапом створення, що викликало ситуацію параметричної невизначеності стосовно вхідної інформації. У результаті такої розмитості вхідних даних якість прогнозу погіршилася та в середньому дорівнює 54 %.

12.3. Розрахунок економічної ефективності підприємства виконано, припустивши, що розроблювана система вірно спрогнозує та зможе запобігти виникненню 54 % несправностей:

– шляхом збільшення фактичного робочого часу обладнання на 12,9 % загальний обсяг продукції збільшився на 4,7 %, а енергоефективність зросла на 1,5 %, що призвело до збільшення чистого прибутку підприємства на 4,5 %, на суму 1,266 млн грн за незмінної ціни за одиницю товару;

– показник продуктивності роботи збільшився на 10,2 % ($T = 89,6\%$), а показники ОЕЕ – ОЕЕФР на 8,1 % і склали ОЕЕФР (ОЕЕ) = 70,93 %. Запропоновані заходи дозволили перевести підприємство за цільовим показником ефективності використання обладнання харчових виробництв із середнього рівня на високий.

13. Удосконалено концепцію визначення інтегрованих цілей досягнення ефективного функціонування електротехнічного комплексу підприємств харчової промисловості, що створює передумови для отримання сертифікату ISO 50001:2011 і, відповідно, зменшення викидів в атмосферу парникових газів та інших впливів на довкілля, а також зниження фінансових витрат шляхом зменшення витрати енергії через систематизоване керування енергетичними ресурсами.

Результати роботи рекомендуються до подальшого впровадження на різнопрофільних підприємствах харчового сегменту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Лисенко В. П., Головінський Б. Л., Решетюк В. М., Штепа В. М., **Заєць Н. А.** та ін. Природні збурення біотехнічних об'єктів, їх моделювання та прогнозування. К., 2014. 112 с. *(Здобувачем досліджено застосування інтелектуальних систем та нейронних мереж для прогнозування природних збурень, також запропоновано використовувати генетичні алгоритми для пошуку оптимальних значень вагових коефіцієнтів нейронної мережі).*

2. Лисенко В. П., Решетюк В. М., Штепа В. М., **Заєць Н. А.**, Мірошник В. О., Дудник А. О. Системи штучного інтелекту: нечітка логіка, нейронні мережі, нечіткі нейронні мережі, генетичний алгоритм. К., 2014. 336 с.

(Здобувачем досліджено існуючі типи нейронних мереж та проаналізовано їх використання для вирішення задач прогнозування, часових рядів та керування, також досліджено методи оптимізації за допомогою генетичних алгоритмів).

3. Ладанюк А. П., **Заєць Н. А.**, Власенко Л. О. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів: [монографія]. К., 2016. 312 с. *(Здобувачем досліджено особливості та характеристики процесів функціонування неперервних виробництв, використання методів координації, адаптації, нейронних мереж та генетичних алгоритмів при керуванні ними).*

Статті в наукових фахових виданнях України:

4. **Заєць Н. А.**, Глущенко М. С. Розробка системи керування вакуум-апаратами періодичної дії з елементами ситуаційного управління та адаптацією. Вестник Херсонського Національного технічного університету. 2008. № 33. С. 65–68. *(Здобувачем розроблено структуру системи оптимального керування з елементами ситуаційного управління та адаптацією).*

5. Савчук О. В., Ладанюк А. П., **Заєць Н. А.** Когнітивний аналіз системи інформаційного забезпечення молокопереробного підприємства. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2010. Вип. 102. С. 62–65. *(Здобувачем розроблено структуру нечіткої когнітивної карти інформаційного забезпечення молокопереробного комплексу регіону).*

6. Лисенко В. П., **Заєць Н. А.**, Штепа В. М., Дудник А. О. Нейромережеве прогнозування часових рядів температури навколишнього природного середовища. Біоресурси і природокористування. 2011. Т. 3. № 3–4. С. 102–107. *(Здобувачем розроблено оптимальні архітектури нейронних мереж для прогнозування часових рядів).*

7. Луцька Н. М., **Заєць Н. А.** Моделювання процесу випарювання для синтезу автоматизованої системи управління. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 161. С. 180–186. *(Здобувачем встановлено залежність критерію оптимальності від коефіцієнтів настроювання регулятора).*

8. Решетюк В. М., **Заєць Н. А.**, Штепа В. М., Пуха В. М. Клімат-комп'ютер для енергоефективного управління технологічними об'єктами. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 166. Ч. 3. С. 113–119. *(Здобувачем розроблено електричну схему з'єднань клімат-комп'ютера).*

9. **Заєць Н. А.**, Штепа В. М. Використання генетичного алгоритму для вирішення оптимізаційних задач в електротехніці. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 166. Ч. 4. С. 157–164. *(Здобувачем розроблено алгоритм роботи генетичного алгоритму та проведено експериментальні дослідження електрокоагуляції стічних вод).*

10. **Заєць Н. А.**, Шворов С. А., Штепа В. М., Осипа В. О. Використання генетичних алгоритмів для розрахунку оптимальних налаштувань функціонування робототехнічного комплексу. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Т. Шевченка. 2012. Вип. 38. С. 41–45. *(Здобувачем розроблено блок-схему генетичного алгоритму для пошуку оптимальних параметрів налаштування регулятора).*

11. Глущенко М. С., **Заєць Н. А.** Визначення оптимальних значень змінних керування за допомогою генетичних алгоритмів. Енергетика і автоматика. 2012. № 1. *(Здобувачем досліджено можливість використання генетичних алгоритмів при вирішенні задач оптимізації для визначення оптимальних значень змінних керування при автоматизованому управлінні утфельним вакуум-апаратом).*

12. Шворов С. А., Штепа В. М., Болбот І. М., **Заєць Н. А.**, Дудник А. О. Методичні засади розпізнавання образів із використанням багатошарового перцептрона. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2012. Вип. 35. С. 66–72. *(Здобувачем розроблено структуру нейронної мережі та програмний код нейромережевого класифікатора образів для системи розпізнавання образів).*

13. Штепа В. М., **Заєць Н. А.**, Ленков О. В., Шворов С. А. Методичні засади застосування нейронних мереж для визначення важливості вхідних електронних документів. Сучасна спеціальна техніка. 2013. № 3 (34). С. 58–64. *(Здобувачем розроблено архітектуру нейронної мережі та виведено аналітичні вирази, що описують виходи нейронної мережі).*

14. Охріменко П. Г., **Заєць Н. А.**, Шворов С. А., Штепа В. М. Системи інтелектуального управління опаленням об'єктів з обробкою даних від модулів датчиків реєстрації температури. Системи обробки інформації. 2014. Вип. 6 (122). С. 63–67. *(Здобувачем розроблено архітектуру системи управління об'єктами з розосередженими параметрами із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу).*

15. Шворов С. А., Штепа В. М., **Заєць Н. А.** Нейромережеве розпізнавання оптичних образів у системах спеціального призначення. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Т. Шевченка. 2014. Вип. 45. С. 102–108. *(Здобувачем проведено визначення оптимальних вагових коефіцієнтів нейронної мережі типу багатошаровий перцептрон за допомогою генетичного алгоритму).*

16. Штепа В. Н., Вертай С. П., Кот Р. Є., Морголь О. В., **Заєць Н. А.** Підвищення безпеки об'єктів продовольчої індустрії у випадку виникнення надзвичайних ситуацій. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв». 2016. № 179. С. 271–278. *(Здобувачем проаналізовано вплив водних ресурсів на ефективність та безпеку об'єктів продовольчої індустрії в умовах дії надзвичайних ситуацій техногенного та природного походження).*

17. Лисенко В. П., **Заєць Н. А.**, Опришко О. О., Комарчук Д. С. Використання нейронних мереж для оцінки станів рослинних насаджень.

Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. 2016. № 2 (5). С. 52–55. *(Здобувачем розроблено алгоритм синтезу нейронних мереж та створено нейронну мережу типу радіальна базисна функція для розпізнавання образів).*

**Статті у наукових фахових виданнях України,
включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

18. Козирський В. В., Момотюк В. В., **Заєць Н. А.** Використання нечітких мереж Петрі для формування навчальних вибірок синтезу нейронних мереж. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. Т. 22. № 6. С. 28–33. *(Здобувачем розроблено нейронну мережу для визначення енергозатратності процесів на виробництві з метою енергоефективного управління).*

19. Заєць Н. А. Синтез ефективних стратегій управління технологічними комплексами харчових виробництв за допомогою нейромережевої ідентифікації параметрів нечітких когнітивних карт. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природо-користування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 252. С. 121–131.

20. Козирський В. В., Момотюк В. В., **Заєць Н. А.** Обґрунтування створення нейронної мережі оцінки витрат виробничих енергетичних ресурсів хлібокомбінату. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2017. Т. 23. № 3. С. 7–14. *(Здобувачем проведено навчання нейронної мережі оцінки виробничих енергетичних витрат процесу випічки хлібу при різних параметрах оптимізаційного градієнтного методу та оцінено якість навчання).*

21. Лисенко В. П., **Заєць Н. А.**, Опришко О. О., Комарчук Д. С. Статистичний аналіз оптичних образів об'єктів рослинних насаджень. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2017. Т. 26. № 6. С. 28–33. *(Здобувачем запропоновано замість значної за обсягами вибірки на вхід нейронної мережі подавати статистичні характеристики вибірки, що скорочує обчислювальний ресурс, адекватно представляючи при цьому зображення).*

22. **Заєць Н. А.**, Штепа В. М. Концепція використання водоочисного електродіалізного обладнання при нештатних ситуаціях на харчових виробництвах. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2017. Т. 23. № 3. С. 160–170. *(Здобувачем проаналізовано існуючі технічні рішення глибокого водоочищення та запропоновано при нештатних ситуаціях використовувати електротехнологічний комплекс електродіалізної установки; проведено імітаційну оцінку енергетичних параметрів використання електродіалізного обладнання при різних статичних значеннях якості водного розчину та експлуатаційних показників).*

23. Lysenko V., Opryshko O., Komarchuk D., **Zaiets N.**, Dudnyk A. Information support of the remote nitrogen monitoring system in agricultural crops. International Journal of Computing. 2018. Vol. 17. No 1. *(Здобувачем розроблено*

нейронну мережу та структуру інтелектуальної системи розпізнавання образів).

24. Lutska N., **Zaiets N.**, Vlasenko L., Shtepa V. Effective robust optimal control system for a lamellar pasteurization-cooling unit under the conditions of intense external perturbation. Ukrainian Food Journal. 2018. Vol. 7. Issue 3. P. 511–521. *(Здобувачем проведено моделювання системи з синтезованим робастно-оптимальним регулятором та локальними регуляторами для номінальної моделі та моделі з максимальною мультиплікативною невизначеністю).*

25. **Заєць Н. А.**, Штепа В. М. Систематизація електротехнологічних комплексів водоочищення харчових виробництв. Енергетика і автоматика. 2018. № 4. С. 49–62. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/11554>. *(Здобувачем обґрунтовано, що обов'язковим для ефективного видалення забруднювачів є врахування дії нештатних ситуацій, що може призвести до виходу із ладу обладнання та викликати недопустимі забруднення навколишнього природного середовища; розроблено структуру електротехнологічного комплексу реалізації процесів ефективного очищення стоків харчових виробництв).*

26. **Заєць Н. А.**, Роговик А. В., Штепа В. М. Визначення нештатних ситуацій на підприємствах харчової промисловості та розробка системи підтримки прийняття рішень. Енергетика і автоматика. 2018. № 5. С. 34–47. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/11725>. *(Здобувачем визначено класифікацію нештатних ситуацій, що виникають у результаті переходу із штатного до нештатного режиму функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв та розроблено структуру системи підтримки прийняття рішень для моніторингу технологічних процесів підприємства).*

27. **Заєць Н. А.**, Роговик А. В. Система моніторингу технологічного процесу для виявлення нештатних ситуацій на харчових підприємствах. Енергетика і автоматика. 2019. № 1. С. 91–106. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/12686> *(Здобувачем розроблено систему моніторингу технологічного процесу для виявлення нештатних ситуацій та підтримки прийняття рішень).*

Статті в наукових виданнях інших держав:

28. Штепа В. Н., Прокопеня О. Н., Кот Р. Е., Морголь А. В., **Заєць Н. А.** Особенности проектирования оборудования и систем управления очисткой производственных сточных вод предприятий лёгкой промышленности. Вестник Брестского государственного технического университета. 2016. № 4. С. 34–37. *(Здобувачем розроблено архітектуру системи керування електротехнічним обладнанням очистки стічних вод із інтелектуальним блоком).*

29. Штепа В. Н., Прокопеня О. Н., Кот Р. Е., Морголь А. В., **Заєць Н. А.** Исследование процессов образования и осаждения взвешенных в воде веществ с применением автоматизированного измерительного комплекса. Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2017.

№ 2 (104). С. 115–118. *(Здобувачем встановлено динаміку зміни концентрації речовин, що випали в осад, в контрольних пробах ємності при різних значеннях тиску).*

30. Гриценко Н. Г., **Заец Н. А.**, Смитюх Я. В. Интеллектуальная система управления процессом ректификации с прогнозированием нештатных ситуаций. Вестник Брестского государственного технического университета. 2017. № 4. С. 70–73. *(Здобувачем розроблено нейронну мережу та структуру інтелектуальної системи прогнозування нештатних ситуацій).*

31. Obstawski P., Kozyrskyi V., Momotyuk V., **Zaiets N.** Energy efficient intellectual control system of the electro-technological complex of a bread-baking plant. Annals of Warsaw University of Life Sciences. 2017. No 70. P. 95–103. *(Здобувачем розроблено архітектуру енергоефективної системи управління електротехнічного комплексу хлібокомбінату).*

32. Штепа В. Н., **Заец Н. А.**, Прокопеня О. Н., Луцкая Н. Н. Вероятностные нейронные сети в задачах управления комбинированными системами водоочистки. Вестник Брестского государственного технического университета. 2018. № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. С. 88–90. *(Здобувачем розроблено структурну схему використання ймовірнісної нейронної мережі при управлінні комбінованими системами водоочищення).*

33. **Заец Н. А.**, Вертай С. П., Штепа В. Н. Механизм управления электро-технологическим комплексом пищевых производств с учетом экономических критериев сборник научных трудов. Проблемы экономики. 2018. № 2 (27). С. 75–85. *(Здобувачем проаналізовано причини зменшення ефективності використання обладнання харчових виробництв та вдосконалено критерій розрахунку ефективності використання обладнання за рахунок врахування якості очистки стічних вод).*

34. **Заец Н. А.**, Власенко Л. О., Луцкая Н. Н., Штепа В. Н. Современные технологии оценивания режимов работы технологических комплексов пищевых производств. Вестник Брестского государственного технического университета. 2018. № 4 (112). С. 28–31. *(Здобувачем розроблено факторно-цільові моделі молокозаводу та сформовано оптимізаційну задачу для визначення оптимальних значень атрибутів).*

Стаття в іншому науковому виданні

35. Штепа В. М., **Заєць Н. А.**, Гончаров Ф. І., Желновач Г. М. Нечітка система автоматичного регулювання внесенням реагентів при очистці стічних вод промислових об'єктів. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2011. № 4. С. 287–291. *(Здобувачем розроблено архітектуру компонентів системи нечіткого керування дозатором).*

Патенти України на корисні моделі

36. Лисенко В. П., Штепа В. М., **Заєць Н. А.**, Дудник А. О. Патент 86252 UA, МПК (2013) G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природо-

користування України. № u201306656; заявлено 28.05.2013; опубліковано 25.12.2013. Бюл. № 24. *(Здобувачем розроблено підсистему прийняття рішень, що містить блок оптимізації нейронної мережі на основі використання генетичного алгоритму).*

37. Лисенко В. П., Штепа В. М., **Заєць Н. А.**, Болбот І. М., Дудник А. О., Лендел Т. І. Патент 92971 UA, МПК (2014.01) G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201404129; заявлено 17.04.2014; опубліковано 10.09.2014. Бюл. № 17. *(Здобувачем розроблено блок оптимізації нейронної мережі на основі використання генетичного алгоритму).*

38. Штепа В. М., **Заєць Н. А.** Патент 133016 UA, МПК (2006) F04D 13/00. Автоматична насосна станція. Заявник і патентовласник В. М. Штепа, Н. А. Заєць Н.А. № u201809125; заявлено 04.09.2018; опубліковано 25.03.2019. Бюл. № 6. *(Здобувачем розроблено інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень та її програмне забезпечення, що реалізовує алгоритми нейронних мереж, мереж Петрі, когнітивних карт, генетичного алгоритму).*

Тези наукових доповідей:

39. Штепа В. Н., Кот Р. Е., **Заєць Н. А.** Автоматизация комбинированных систем очистки промышленных сточных вод. Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: III Международная научно-практическая конференция, г. Минск, Республика Беларусь, 23–24 марта 2017 года: тезисы доклада. С. 290–292. *(Здобувачем розроблена архітектура системи управління комбінованими комплексами водоочищення стоків промислових об'єктів).*

40. Штепа В. Н., Кот Р. Е., Морголь А. В., Вертай С. П., **Заєць Н. А.** Экологически безопасные полигоны бытовых и производственных отходов. Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Международная научно-техническая конференция, г. Могилев, Республика Беларусь, 27–28 апреля 2017 года: тезисы доклада. С. 278–279. *(Здобувачем проаналізовано відповідність біофізико-хімічного складу фільтрату полігонів твердих побутових відходів встановленим нормам).*

41. Луцька Н. М., **Заєць Н. А.** Робастно-адаптивні системи керування технологічними об'єктами. Основи автоматики 2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 13–15 вересня 2017 року: тези доповіді. С. 86–88. *(Здобувачем розроблено структурну схему системи керування з робастно-адаптивним регулятором).*

42. Korobiichuk I., Ladanyuk A., Vlasenko L., **Zaєc N.**, Kachniarz M. Modern development technologies and investigation of food production technological complex automated systems. XIX Polish Control Conference (Krajowa Konferencja Automatyki, KKA 2017) organized by the Department of Automatics and Biomedical Engineering, Cracow, Poland, on 18–21 June 2017. P. 115–120. *(Здобувачем сформовано сценарно-орієнтований підхід, що дає змогу забезпечити стабільну якість продукції та економію енергії в умовах зміни об'єктів).*

43. Штепа В., Заєць Н. Практичний досвід використання автоматизованого водоочищення на основі систем безпечного водопостачання. Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки: II Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 19–20 квітня 2018 року: тези доповіді. С. 166–169. *(Здобувачем розроблено об'єктно-орієнтований підхід створення промислових систем водоочищення).*

44. Штепа В. Н., Вертай С. П., **Заєц Н. А.** Усовершенствование проектных решений очистки коммунально-бытовых стоков экологически опасных производств. Галузеві проблеми екологічної безпеки: IV Міжнародна науково-практична конференція студентів, магістрантів та аспірантів, м. Харків, 19 жовтня 2018 року: тези доповіді. С. 225–228. *(Здобувачем розроблено структуру системи очистки стічних вод).*

45. Штепа В. Н., **Заєц Н. А.** Метрологические характеристики автоматизированных измерительных комплексов рабочей меры эффективности электротехнологической водоочистки. Современные проблемы машиноведения: XII Международная научно-техническая конференция, г. Гомель, Республика Беларусь, 22–23 ноября 2018 года: тезисы доклада. С. 114–116. *(Здобувачем встановлено взаємозв'язок сили струму на електролізері на якість очистки стічних вод від забруднювачів).*

46. Козырь А. В., Штепа В. Н., Заєц Н. А. Ресурсные потоки автоматизированных установок замкнутого водоснабжения. Новые технологии и материалы, автоматизация производства: Международная научно-техническая конференция, г. Брест, Республика Беларусь, 27–28 мая 2019 года: тезисы доклада. *(Здобувачем проведено аналіз ресурсних потоків автоматизованих установок замкнутого водопостачання необхідних для забезпечення технологічних процесів).*

47. Korobiichuk I., Ladanyuk A., Vlasenko L., **Zaiets N.** Modern Development technologies and investigation of food production technological complex automated systems. International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering (ICMSCE), Amsterdam, Netherlands, 21–23 February 2018. P. 52–57. *(Здобувачем проведено дослідження взаємозв'язків підсистем неперервних виробництв та параметрів технологічного процесу).*

48. **Zaiets N.**, Vlasenko L., Lutskaaya N., Usenko S. System Modeling for Construction of the Diagnostic Subsystem of the Integrated Automated Control System for the Technological Complex of Food Industries ICMRE 2019. The 5th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineerin, February 16–19, 2019, Rome, Italy. P. 93–99. *(Здобувачем проведено системний аналіз електротехнічних процесів в харчових виробництвах для можливості встановлення зв'язків між складовими електротехнічного комплексу, визначення ієрархічної структури технологічних апаратів та електротехнічного обладнання комплексів, формулювання єдиних цілей і завдань для подальшого визначення сценаріїв їх функціонування).*

49. **Zaiets N.**, Kondratenko I. Development of an Intelligent System for Predicting the Reliability of Electric Motors. IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 16–18, 2019, Kyiv, Ukraine.

Р. 614–619. *(Здобувачем розроблено метод діагностики електротехнічного обладнання та прогнозування надійності його функціонування за допомогою теорії нейронних мереж для попередження відмов та зупинок технологічного процесу при керуванні електротехнічними комплексами харчових виробництв).*

АНОТАЦІЯ

Заєць Н. А. Наукові основи керування електротехнічними комплексами неперервних виробництв із прогнозуванням нештатних ситуацій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої актуальної науково-прикладної проблеми створення методів прогнозування для запобігання виникнення нештатних ситуацій шляхом розроблення та впровадження системи ефективного функціонування електротехнічних комплексів харчових виробництв з урахуванням їх особливостей як взаємопов'язаних організаційно-технологічних систем, що направлено на підвищення енергоефективності, ресурсоощадження та продуктивності.

Для визначення ефективних стратегій досягнення цільових критеріїв функціонування підприємства на основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень розроблено нові факторно-цільові моделі електротехнічного комплексу харчових виробництв. Обґрунтовано формалізований процес формування комплексної програми технічного обслуговування та ремонту обладнання з використанням підсистем прогнозування надійності первинних вимірювальних перетворювачів та електродвигунів. Вирішено оптимізаційну задачу розмірності простору вхідних параметрів моделі прогнозування надійності електродвигунів та розроблено математичні моделі прогнозування надійності електродвигунів, які дають змогу в оперативному режимі виявити дефекти, контролювати стан машин та прогнозувати термін їх роботи. Розвинуто ресурсно-процесний підхід скорочення тривалості машинного часу реалізації добової виробничої потужності підприємства, що дозволяє підвищити енерго- та ресурсоефективність харчових виробництв. Реалізовано стратегію вибору типу системи керування технологічним процесом для забезпечення стійкості в умовах виникнення нештатних ситуацій із використанням в нештатному режимі робастних систем керування. Побудовано сценарно-когнітивну модель для визначення ефективних стратегій та сценаріїв функціонування електротехнічного комплексу харчових виробництв і прогнозу його поведінки за різних керуючих впливів. У результаті проведених досліджень запропоновано нову стратегію узагальнення експертної оцінки взаємовпливів концептів на основі методів кластерного аналізу.

Проведено систематизацію параметрів стоків для різнопрофільних підприємств харчового сегменту, створено перелік забруднювачів і визначено

способи доведення їх до гранично допустимих концентрацій. Встановлено взаємозв'язок витрат електроенергії електротехнологічного комплексу очищення стоків харчових виробництв у залежності від типу підприємства та об'єму стічних вод із застосуванням за залпових викидів стічних вод блоку утилізації.

Науково обґрунтовано нову узагальнену структуру системи керування із функцією прогнозування та розроблено її алгоритмічно-програмне забезпечення, що дає змогу впровадження системи на різнопрофільних підприємствах харчової промисловості, оперативної оцінки взаємовпливів між станом та параметрами роботи електротехнічного комплексу та дозволяє підвищити енергоефективність, ресурсощадження та продуктивність виробництва.

Ключові слова: електротехнічний комплекс, електротехнічне обладнання, факторно-цільове моделювання, модель прогнозування, діагностика, стічні води, генетичні алгоритми, нейронні мережі, кластерний аналіз, когнітивна карта, нештатні ситуації.

АННОТАЦІЯ

Заец Н. А. Научные основы управления электротехническими комплексами непрерывных производств с прогнозированием нештатных ситуаций. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украина. Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению важной актуальной научно-прикладной проблемы создания методов прогнозирования для предотвращения возникновения нештатных ситуаций путем разработки и внедрения системы эффективного функционирования электротехнических комплексов пищевых производств с учетом их особенностей как взаимосвязанных организационно-технологических систем, направленных на повышение энергоэффективности, ресурсосбережения и производительности.

Для определения эффективных стратегий достижения целевых критериев функционирования предприятия, на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований, разработаны новые факторно-целевые модели электротехнического комплекса пищевых производств. Обоснован формализованный процесс формирования комплексной программы технического обслуживания и ремонта оборудования с использованием подсистем прогнозирования надежности первичных измерительных преобразователей и электродвигателей. Решены оптимизационные задачи размерности пространства входных параметров модели прогнозирования надежности электродвигателей и разработаны математические модели прогнозирования надежности электродвигателей, позволяющие в оперативном режиме выявить дефекты, контролировать состояние машин и прогнозировать

срок их работы. Развита ресурсно-процессный подход сокращения продолжительности машинного времени реализации суточной производственной мощности предприятия, что позволяет повысить энерго- и ресурсоэффективность пищевых производств. Реализована стратегия выбора типа системы управления технологическим процессом для обеспечения устойчивости в условиях возникновения нештатных ситуаций с использованием в нештатном режиме робастных систем управления. Построена сценарно-когнитивная модель для определения эффективных стратегий и сценариев функционирования электротехнического комплекса пищевых производств и прогноза его поведения при различных управляющих воздействиях. В результате проведенных исследований предложена новая стратегия обобщения экспертной оценки взаимовлияния концептов на основе методов кластерного анализа.

Проведена систематизация параметров стоков для разнопрофильных предприятий пищевого сегмента, создан перечень загрязнителей и определены способы доведения их до предельно допустимых концентраций. Установлена взаимосвязь затрат электроэнергии электротехнологического комплекса очистки стоков пищевых производств в зависимости от типа предприятия и объема сточных вод с применением блока утилизации при залповых выбросах сточных вод.

Научно обоснована новая обобщенная структура системы управления с функцией прогнозирования и разработано ее алгоритмически-программное обеспечение, что дает возможность ее внедрения на разнопрофильных предприятиях пищевой промышленности, оперативной оценки взаимовлияния между состоянием и параметрами работы электротехнического комплекса и позволяет повысить энергоэффективность, ресурсосбережение и производительность производства.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, электротехническое оборудование, факторно-целевое моделирование, модель прогнозирования, диагностика, сточные воды, генетические алгоритмы, нейронные сети, кластерный анализ, когнитивная карта, нештатные ситуации.

ANNOTATION

Zaiets N. A. Scientific Bases of Management of Electrotechnical Complexes of Continuous Productions with Forecasting of Unusual Situations. – The manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.09.03 «Electrotechnical Complexes and Systems». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the decision of the important actual scientific and applied problem of creating forecasting methods for prevention of occurrence of abnormal situations by developing and implementing a system of efficient functioning of electrical engineering complexes of food industries taking into account their features

as interrelated organizational and technological systems aimed at increasing energy efficiency, resource conservation and performance

According to the results of the research, it was found that obtaining the maximum profit of the enterprise is possible only in the absence of downtime, compliance with the technological regulations, timely detection of deviations of the regulated variables from the given values, as well as the absence of breakdown, determined by the appropriate technical condition.

To determine the effective strategies for achieving the target criteria for the functioning of the enterprise, based on the performed theoretical and experimental research, new factor-purpose models of the electrical complex of food production, which include modeling the interconnections of the electrical equipment of the enterprise, are based on the definition of the hierarchical structure of the subsystems of the electrotechnical complex, the formulation of unified goals and objectives.

The formalized process of forming a comprehensive program of maintenance and repair of equipment, based on the principles of service on the basis of reliability (Reliability-Centered Maintenance IEC 60300-3-11: 2009), is grounded using subsystems for predicting the reliability of primary measuring converters and motors.

The expediency of application of methods of functional diagnostics for electrotechnical equipment has been proved. Using the genetic algorithms, an optimization problem for the dimension of the space of the input parameters of the prediction model for the reliability of the electric motors is solved. With the help of the theory of neural networks, mathematical models of prediction of reliability of electric motors, which in the operational mode carry out the intellectual analysis of measurement data of sensors of the regime parameters, which allows to detect defects, control the state of machines and predict the term of their work.

The structural-logical scheme of fault detection stages of primary measuring transducers at the early stages of diagnostics is developed, which is based on the results of a statistical analysis of technological measurements using control maps of Shuhart, test diagnostics and analysis of the schedule of repair and preventive works of technical means, which at the early stages indicate the appearance problems and give time to the operator to detect various types of breakdowns.

The systematization of wastewater parameters for diversified food segment enterprises was made, a list of pollutants was created and methods for bringing them to limit-permissible concentrations were determined. An estimation of technogenic risks in the case of emergencies of abnormal situations concerning a spill in food production and the variant of the combined complex of electrotechnological processes of sewage treatment of food industries with the account of the action of unusual situations is developed. The interconnection of electricity consumption of the electrotechnological complex of sewage treatment of food industries depending on the type of the enterprise and the volume of waste water with the use of volley wastewaters of the utilization unit, which enables to determine in operational mode energy and economic indicators of the functioning of such a complex, is determined.

In order to increase the efficiency of the use of electrical equipment for food production by optimizing the machine-time use of equipment, a resource-process approach to reduce the machine time of the implementation of daily production

capacity of the enterprise is developed, which allows to increase the energy and resource efficiency of food production.

The scheme of interconnection of administrative levels of the enterprise on the basis of the factor-target model of the electrical complex of food production is developed. The strategy of choosing the type of control system for the technological process for ensuring stability in the conditions of occurrence of abnormal situations with the use in the non-regular mode of robust control systems is implemented.

A generalized structure of a fuzzy cognitive map was created and a scenario-cognitive model for establishing effective strategies and scenarios of the functioning of the electrical engineering complex of food industries and its behavioral forecast for various control influences was constructed. As a result of the conducted researches a new strategy of generalization of expert estimation of mutual influence of concepts on the basis of methods of cluster analysis is proposed.

The new generalized structure of the control system with the prediction function was scientifically substantiated and its algorithmic software was developed, which enables the introduction of the system at diverse enterprises of the food industry, the operational assessment of the interactions between the state and parameters of the electrical engineering system and allows to increase energy efficiency, resource conservation and productivity of production.

Key words: electrical engineering complex, electrical equipment, factor-purpose modeling, forecasting model, diagnostics, sewage, genetic algorithms, neural networks, cluster analysis, cognitive map, non-emergency situations.

Підписано до друку 03.09.19
Ум. друк. арк. 1,9
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Обл.-вид.арк. 1,9
Зам. № 190743

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55

