

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО

Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

проф., д.т.н. /КАПЛУН В.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

” ” 2026 р.
число місяць рік

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

” ” 2026 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему: „ ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ПРИВОДНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ”

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Синявський О.Ю.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Федосейкін В.М.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

⊥

«_____» 2024 г.

Завдання прийняв до виконання _____ **Федосейкін В.М.**
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 80 с., 15 рис., 3 табл., 40 джерел.

Об'єкт досліджень – електромеханічні процеси в електроприводах сільськогосподарських машин при відхиленні напруги.

Предмет досліджень – закономірності зміни технологічних характеристик сільськогосподарських машин при відхиленні напруги.

Методи дослідження та експериментальна база.

У процесі виконання поставлених завдань застосовувалися як теоретичні, так і експериментальні методи досліджень із використанням сучасного метрологічного обладнання, зокрема цифрового мультиметра DMK-32, переносного аналізатора електроенергії AR5 та цифрового осцилографа Vellman. Теоретична частина досліджень базується на фундаментальних положеннях теорії електропривода та електромеханічного перетворення енергії.

У роботі виконано аналіз рівня надійності електропостачання та дотримання нормативних показників якості електроенергії в сільських електричних мережах. Встановлено вплив відхилення напруги на режими роботи трифазних асинхронних електродвигунів.

Теоретично та експериментально досліджено вплив відхилення напруги на зміну кутової швидкості асинхронних електродвигунів.

Проведені дослідження перехідних процесів електроприводів сільськогосподарських машин показали, що відхилення напруги суттєво впливає на технологічні параметри їх роботи, зокрема призводить до зміни продуктивності робочих машин та якості оброблюваної продукції.

Встановлено, що при зниженні напруги живлення зростає питома витрата електричної енергії, що негативно впливає на енергетичну ефективність системи електропривода.

У результаті досліджень також визначено економічні наслідки, зумовлені неякісним електропостачанням.

Галузь застосування – сільське господарство.

Ключові слова: технологічні характеристики робочої машини; кутова швидкість електропривода; відхилення напруги живлення; продуктивність сільськогосподарської машини; питома витрата електричної енергії.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА СПОЖИВАЧІВ.....	9
1.1. Показники якості електричної енергії	9
1.2. Вплив якості електроенергії на роботу електроприймачів.....	14
1.3. Контроль якості електричної енергії	17
РОЗДІЛ 2 ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА АСИНХРОННІ ДВИГУНИ.....	22
2.1 Вплив відхилення показників якості електричної енергії на момент асинхронного електродвигуни	22
2.2 Вплив відхилення напруги на кутову швидкість асинхронного двигуна	24
РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИВ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ РОБОЧИХ МАШИН.....	32
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	42
4.1 Вплив відхилення напруги на енергетику електроприводів в усталеному режимі	42
4.2. Енергетика перехідних процесів в електроприводах сільськогосподарських машин	46
4.3. Енергетика перехідних процесів в електроприводах з ударним навантаженням при відхиленні напруги	49
РОЗДІЛ 5 ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИРОБНИЧИХ МАШИН.....	52
РОЗДІЛ 6 ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН	60
РОЗДІЛ 7 ВИЗНАЧЕННЯ ЗБИТКУ ВІД ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ.....	65
ВИСНОВКИ	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ω – кутова швидкість;

s – ковзання двигуна;

K_3 – коефіцієнт запасу;

J – момент інерції;

T_e – електромагнітна стала часу;

T_m – електромеханічна стала часу;

n – частота обертання;

P – потужність двигуна;

μ – кратність моменту;

M – момент;

R – активний опір;

x – реактивний опір;

t – час;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

ВСТУП

За останні роки питання якості електричної енергії набуває дедалі більшої актуальності та активно досліджується у багатьох країнах світу. Це зумовлено, з одного боку, формуванням енергетичного ринку, де електрична енергія розглядається як товар, а з іншого — зростанням вимог до стабільності та якості електропостачання у зв'язку з широким впровадженням сучасного електрообладнання та технологій, чутливих до параметрів живлення.

Згідно з прогнозними оцінками, споживання електроенергії у сільському господарстві на виробничі потреби може досягти близько 10095 млн кВт·год у 2030 році. Сільські розподільні електричні мережі, через які здійснюється електропостачання споживачів, включають приблизно 1 млн км повітряних і кабельних ліній електропередач та близько 200 тис. трансформаторних підстанцій. Водночас недостатній рівень фінансування ускладнює проведення модернізації, реконструкції та оновлення електричних мереж усіх класів напруги, а також будівництво нових енергетичних об'єктів. Такий технічний стан мереж спричиняє підвищення аварійності в регіонах і призводить до того, що перерви електропостачання можуть становити до 10 % тривалості технологічних процесів.

Порушення безперервності електропостачання та відхилення показників якості електричної енергії від нормативних значень викликають низку негативних наслідків. Серед них — зупинки технологічних процесів, втрати продукції, зниження її якості, скорочення ресурсу електрообладнання та побутових пристроїв, зростання енергетичних втрат і ймовірність аварійних ситуацій. Особливо суттєво це впливає на сільськогосподарські машини з електроприводом, у яких зміна параметрів електроживлення безпосередньо призводить до зміни кутової швидкості та, відповідно, порушення технологічного режиму роботи.

Метою дослідження є встановлення впливу відхилення напруги на технологічні та енергетичні характеристики сільськогосподарських машин.

Об'єкт досліджень – електромеханічні процеси в електроприводах сільськогосподарських машин при відхиленні напруги.

Предмет досліджень – закономірності зміни технологічних та енергетичних характеристик сільськогосподарських машин при відхиленні напруги.

Методи дослідження та апаратура.

У роботі застосовано комплекс теоретичних та експериментальних методів із використанням сучасних засобів вимірювальної техніки, зокрема цифрового мультиметра DMK-32, переносного аналізатора електроенергії AR5 та цифрового осцилографа Vellman. Теоретичні дослідження ґрунтуються на базових положеннях теорії електропривода та електромеханічного перетворення енергії.

Теоретична цінність отриманих результатів полягає у встановленні залежностей продуктивності, кутової швидкості та питомої витрати електроенергії сільськогосподарської машини від напруги.

Практична цінність отриманих результатів полягає у визначенні технологічної складової збитку при відхиленні напруги від нормованих значень.

На захист магістерської роботи виносяться:

1. Аналіз стану проблеми якості електричної енергії в сільських електричних мережах.
2. Результати дослідження впливу відхилення напруги на кутову швидкість трифазних асинхронних електродвигунів.
3. Результати дослідження впливу відхилення напруги на технологічні характеристики сільськогосподарських машин.
4. Розроблений прилад для автоматичного контролю напруги і обліку перерв електропостачання.
5. Методика визначення збитку при відхиленні напруги.

У цій магістерській роботі проведено аналіз рівня надійності електропостачання і дотримання показників якості електроенергії в сільських електромережах.

Встановлений вплив відхилення напруги на роботу трифазних асинхронних електродвигунів.

Теоретично та експериментально визначено вплив відхилення напруги на кутову швидкість асинхронних електродвигунів.

Проведені дослідження впливу відхилення напруги на електроприводи сільськогосподарських машин. Встановлено, що відхилення напруги впливають на технологічні та енергетичні характеристики сільськогосподарських машин. Це викликає зміну продуктивності робочої машини, якості перероблюваної продукції та питомої витрати електроенергії.

Розроблена методика визначення збитку від неякісного електропостачання.

Публікації: 1. Федосейкін В.М. Вплив якості електроенергії на енергетичні характеристики робочих машин. Тези доповідей 78-ої науково-практичної конференція студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м. Київ, 24 квітня 2025 р. С.44.

2. Федосейкін В.М. Вплив відхилення та несиметрії напруги на енергетичні характеристики робочих машин. Тези доповідей 79-ої науково-практичної конференція студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м. Київ, 30 квітня 2026 р. С.106.

3. Синявський О. Ю., Савченко В. В., Пруднікова Н.Д., Федосейкін В. М. Вплив несиметрії напруги на енергетичні характеристики відцентрових молочних насосів. Енергетика і автоматика. 2025. №1.

4. Федосейкін В. М. Вплив несиметрії напруги на енергетичні характеристики змішувачів кормів. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: наукові пошуки молоді: матеріали III Всеукраїнської наук.-практ. конф., 3 квітня 2025 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків, 2025. С.

РОЗДІЛ 1

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА СПОЖИВАЧІВ

1.1. Показники якості електричної енергії

Електроенергія в сучасних умовах розглядається не лише як ресурс, а як повноцінний товар, що бере участь у всіх виробничих процесах і безпосередньо впливає на формування якості кінцевої продукції. Її роль є системоутворюючою, оскільки вона забезпечує функціонування як промислових, так і побутових споживачів.

На відміну від традиційних видів продукції, оцінювання електроенергії не може здійснюватися за класичними критеріями якості. Для кожного електроприймача задається певний діапазон допустимих параметрів живлення — насамперед напруги, частоти та струму. Відхилення від цих умов призводить до порушення нормальної роботи обладнання, тому якість електроенергії фактично визначається здатністю мережі забезпечувати стабільні умови роботи споживачів.

Важливо враховувати, що параметри електроенергії в точці її генерації та в точці споживання не є однаковими. Підключення навантаження змінює електричний режим мережі, що може призводити до погіршення показників якості. У зв'язку з цим у сучасній енергетиці широко використовується поняття електромагнітної сумісності, яке відображає здатність обладнання працювати в загальній мережі без створення небажаних завад для інших пристроїв.

Проблема сумісності особливо загострилася із впровадженням силової електроніки та потужних нелінійних споживачів, таких як перетворювачі, дугові печі та зварювальні установки. Хоча такі технології підвищують ефективність виробництва, вони одночасно є джерелом спотворень електричних режимів.

Подібні вимоги поширюються і на побутові електроприймачі, оскільки вони є частиною єдиної електричної системи та повинні працювати без погіршення параметрів мережі.

Оцінювання наслідків погіршення якості електроенергії у виробничих умовах здійснюється через економічні показники втрат. До них відносять технологічні збитки, пов'язані з порушенням процесів, браком продукції та зниженням продуктивності, а також електромагнітні втрати, що проявляються у збільшенні енергоспоживання, відмовах обладнання та порушеннях роботи систем керування і зв'язку.

Таким чином, якість електроенергії безпосередньо пов'язана з надійністю електропостачання, яка передбачає безперервну подачу енергії у необхідному обсязі та з нормативними параметрами, узгодженими між постачальником і споживачем.

Нормування показників якості електричної енергії регламентується відповідним стандартом ГОСТ 13109-97, який встановлює допустимі та гранично допустимі значення основних параметрів якості електроенергії.

До основних показників якості електричної енергії відносять:

- усталене відхилення напруги δU_y ;
- розмах коливань напруги δU_t ;
- дозу флікера P_t ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт вищих гармонійних складових напруги $K_U(n)$;
- коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U} ;
- відхилення частоти Δf ;
- тривалість провалу напруги t_p ;
- імпульсні перенапруги U_{imp} ;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{перU}$.

Для окремих показників стандарт додатково визначає допоміжні характеристики, до яких належать інтервали між змінами напруги, глибина та частота виникнення провалів напруги, тривалість імпульсних процесів за рівнем половини амплітуди, а також тривалість режимів тимчасових перенапруг.

Слід зазначити, що вимоги ГОСТ 13109-97 не поширюються на електричні мережі спеціального призначення (контактні, тягові, системи зв'язку), а також на пересувні електроустановки, зокрема авіаційні, залізничні та суднові енергосистеми. Крім того, стандарт не регламентує показники якості електроенергії для режимів, що виникають унаслідок надзвичайних ситуацій, таких як стихійні лиха або екстремальні погодні умови.

Частина показників характеризує усталені режими роботи електричних мереж та електрообладнання і використовується для кількісної оцінки якості електропостачання на всіх етапах — від генерації до споживання. До цієї групи відносять усталене відхилення напруги, коефіцієнти гармонійних спотворень, показники несиметрії напруги, відхилення частоти та розмах коливань напруги. Для них встановлюються як нормально допустимі, так і гранично допустимі значення.

Інша група показників описує короточасні електромагнітні збурення, що виникають унаслідок комутаційних процесів, атмосферних явищ або аварійних режимів. До них належать провали напруги, імпульсні перенапруги та короточасні перенапруги. Для цих параметрів стандарт не задає жорстких числових нормативів, а передбачає їх вимірювання за амплітудою, тривалістю та частотою появи з подальшою статистичною обробкою результатів.

Оцінювання відповідності показників якості електроенергії нормативним вимогам (за винятком окремих параметрів, таких як тривалість провалів та імпульсів напруги) здійснюється на базі мінімального розрахункового періоду тривалістю 24 години. Враховуючи випадковий характер зміни навантаження в електричних мережах, повне дотримання норм у кожний момент часу є практично недосяжним, тому стандартом введено ймовірнісний підхід до оцінювання.

Зокрема, вважається, що вимоги до якості електроенергії виконуються, якщо перевищення нормально допустимих значень не перевищує 5 % часу спостереження, що відповідає ймовірності 0,95 за встановлений період. Це

означає допустимість короточасних відхилень за умови, що їх сумарна тривалість не є значною.

Рекомендована тривалість вимірювань показників якості електроенергії становить не менше семи діб, що забезпечує врахування як робочих, так і вихідних режимів функціонування електричних мереж.

У нормативних документах також визначаються найбільш ймовірні джерела погіршення показників якості електричної енергії. Зокрема, відхилення частоти регулюється виключно енергосистемою та залежить від її загального режиму роботи. Індивідуальні електроприймачі, як промислові, так і побутові, практично не впливають на цей параметр через незначну частку їх потужності порівняно із сумарною потужністю генерації електростанцій.

На відміну від цього, коливання напруги, її несиметрія та спотворення синусоїдальності переважно формуються внаслідок роботи потужних нелінійних або несиметричних навантажень на промислових підприємствах. При цьому рівень впливу зазначених спотворень значною мірою залежить від потужності та жорсткості електричної мережі в точці підключення споживача.

Відхилення напруги визначається як станом електропостачання з боку енергосистеми, так і режимами роботи окремих електроприймачів, особливо тих, що споживають значну реактивну потужність. У зв'язку з цим питання забезпечення якості електроенергії безпосередньо пов'язане з необхідністю компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

Параметри короточасних збурень, такі як провали напруги, імпульсні перенапруги та тимчасові перенапруги, здебільшого визначаються режимами роботи енергосистеми та аварійними чи перехідними процесами в ній.

Низька якість електроенергії призводить до виникнення економічних втрат, які умовно поділяють на дві складові — електромагнітну та технологічну. Електромагнітна складова пов'язана зі збільшенням втрат активної потужності та скороченням ресурсу електрообладнання. Технологічна складова, у свою чергу, зумовлена впливом якості електроенергії на продуктивність технологічних процесів та собівартість продукції.

Найбільш критичний вплив на роботу електроприводів здійснюють відхилення та несиметрія напруги, а також перерви електропостачання.

За результатами обробки понад 170 експериментальних вимірювань встановлено, що у 32 % випадків показники якості електроенергії виходили за межі нормативних значень. Найчастіше перевищення допустимих меж спостерігалось за відхиленням напруги (68 % випадків) та коефіцієнтом несиметрії за нульовою послідовністю (38 % випадків).

Для умов України характерними є як занижені значення напруги (у ряді населених пунктів 170–190 В), так і підвищені рівні (до 300 В), що свідчить про нестабільність параметрів електропостачання.

Перерви електропостачання спричиняють часті пуски та зупинки електродвигунів, що призводить до їх підвищеного теплового навантаження. У разі раптової зупинки робочих механізмів можуть виникати аварійні режими. Наприклад, зупинка насосного обладнання здатна викликати гідравлічні удари, що призводить до пошкодження трубопроводів і запірної арматури.

У таблиці 1.1 наведено класифікацію властивостей електричної енергії, відповідних показників та найбільш ймовірних причин погіршення її якості.

Стандарт також регламентує підходи до розрахунку та методики визначення показників якості електричної енергії і допоміжних параметрів. Окрім цього, встановлюються вимоги до допустимих похибок вимірювань та інтервалів усереднення ПЯЕ, які повинні бути реалізовані у засобах контролю якості електроенергії під час проведення вимірювань і подальшої обробки отриманих даних.

**Властивості електричної енергії, показники і найбільш вірогідні
винуватці погіршення якості електроенергії**

Властивості електричної енергії	Показник якості електроенергії	Найбільш вірогідні винуватці погіршення якості електроенергії
Відхилення напруги	Стале відхилення напруги	Енергозабезпечуюча організація
Коливання напруги	Розмах зміни напруги Доза флікера	Споживач зі змінним навантаженням
Несинусоїдальність напруги	Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги Коефіцієнт n - ої гармонічної складової напруги	Споживач з нелінійним навантаженням
Несиметрія трифазної системи напруги	Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю Коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю	Споживач з несиметричним навантаженням
Відхилення частоти	Відхилення частоти	Енергозабезпечуюча організація
Провал напруги	Тривалість провалу напруги	Енергозабезпечуюча організація
Імпульс напруги	Імпульсна напруга	Енергозабезпечуюча організація
Тимчасове перенапруження	Коефіцієнт тимчасового перенапруження	Енергозабезпечуюча організація

1.2. Вплив якості електроенергії на роботу електроприймачів

Поряд із надійністю електропостачання одним із ключових показників функціонування електричних систем є якість електроенергії у споживачів. Вона безпосередньо впливає як на ефективність роботи електроприймачів, так і на техніко-економічні показники електричних мереж загалом. Забезпечення нормативного рівня якості електроенергії в сільських розподільних мережах залишається актуальною науково-технічною проблемою, яка повністю не вирішена до сьогодні.

Підтримання необхідного рівня якості електроенергії спрямоване на мінімізацію електромагнітних завад, за яких забезпечується нормальне функціонування електрообладнання систем електропостачання. Погіршення якості електроенергії, тобто зростання рівня електромагнітних збурень, зумовлюється сукупністю процесів виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії, які супроводжують роботу електроенергетичної системи.

Особливо чутливими до зміни параметрів напруги є асинхронні електродвигуни. Так, у великих тваринницьких комплексах із поголів'ям близько 10 тис. голів великої рогатої худоби використовується понад 800 електродвигунів різної потужності (від 0,3 до 100 кВт). За умов зниження напруги погіршуються умови пуску двигунів, можливе їх перевантаження або навіть «перекидання» режиму роботи. Одночасно зростають активні втрати, зменшується ресурс обладнання, тоді як підвищення напруги призводить до збільшення споживання реактивної потужності та додаткових енергетичних втрат.

У трифазних мережах через нерівномірний розподіл навантаження по фазах та неодночасне вмикання електроприймачів виникає несиметрія напруги і струмів. Для її оцінювання використовують коефіцієнти несиметрії за зворотною та нульовою послідовностями. Для симетричних трифазних електроприймачів допустиме значення коефіцієнта зворотної послідовності становить до 2 %. Коефіцієнт нульової послідовності повинен бути обмежений таким чином, щоб не призводити до виходу діючих значень напруги за допустимі межі.

Несиметрія напруги особливо негативно впливає на однофазні електроприймачі, для яких вона фактично еквівалентна зміні рівня живлення. Найбільш критичний вплив спостерігається у роботі асинхронних двигунів: виникнення струмів нульової послідовності призводить до додаткового нагрівання, зниження коефіцієнта корисної дії та скорочення строку служби. Відомо, що при рівні несиметрії близько 4 % ресурс повністю навантаженого двигуна може зменшуватися приблизно вдвічі.

Відхилення напруги суттєво впливають також на роботу освітлювальних установок, змінюючи світловий потік, рівень освітленості, споживану потужність, енергетичну ефективність та довговічність ламп. Перевищення номінальної напруги для ламп розжарювання та люмінесцентних джерел світла призводить до зростання світлового потоку, але одночасно скорочує термін їх експлуатації.

Коливання напруги в освітлювальних системах викликають зміну світлового потоку у вигляді періодичних «миготінь», що негативно впливає на зорове сприйняття та призводить до підвищеної втомлюваності персоналу.

Таким чином, відхилення показників якості напруги впливають не лише на електротехнічні характеристики обладнання, але й на технологічні процеси сільськогосподарського виробництва. Зокрема, продуктивність тваринництва залежить від мікрокліматичних умов (температури, вологості, концентрації шкідливих газів, режиму освітлення та спектрального складу світла), які, у свою чергу, визначаються якістю електроенергії, що подається до відповідних установок.

У таблиці 1.2 наведено узагальнені наслідки зміни показників якості електроенергії для сільськогосподарських споживачів.

Таблиця 1.2.

Наслідки зміни показників якості електроенергії для сільськогосподарських споживачів

Показники якості напруги	Електроприймачі	Вплив на роботу електроприймачів	Наслідки для сільського господарства
Відхилення напруги	Асинхронні двигуни	Нестійкий пуск і робота, зміна терміну служби, споживаної потужності і ККД	Порушення технологічного режиму, додаткові витрати на перевитрату електроенергії і заміну двигунів
	Лампи освітлення і опромінювання	Нестійке включення, зміна освітленості і спектрального складу випромінювання, споживаної потужності і терміну служби	Зниження продуктивності тварин, додаткові витрати на перевитрату електроенергії і заміну ламп
Несиметрія напруги	Асинхронні двигуни	Додаткове нагрівання, зниження терміну служби і ККД	Додаткові витрати на заміну двигунів
	Лампи освітлення і опромінювання	Сприймається як відхилення напруги	Зниження продуктивності тварин, додаткові витрати на перевитрату електроенергії і заміну ламп
Коливання напруги	Асинхронні двигуни	Погіршення умов пуску асинхронних двигунів	Порушення технологічного режиму
	Лампи освітлення	«Миготіння ламп»	Швидка стомлюваність, дискомфорт
Несинусоїдальність	Трансформатори	Зниження терміну служби, споживаної потужності	Додаткові витрати на заміну електроустаткування, на перевитрату електроенергії

1.3. Контроль якості електричної енергії

Контроль якості електричної енергії включає комплекс завдань, спрямованих на забезпечення відповідності її параметрів встановленим

нормативним вимогам у електричних мережах. До основних з них належать перевірка виконання вимог стандартів щодо експлуатаційного контролю показників якості електроенергії у мережах загального призначення, а також оцінювання відповідності фактичних значень цих показників на межі розподілу мереж параметрам, визначеним у договорах електропостачання. Важливим напрямом є також формування технічних умов на приєднання споживачів із урахуванням вимог до якості електроенергії та контроль виконання договірних зобов'язань з визначенням допустимого внеску споживача у погіршення її показників. Окремо виділяються завдання розроблення організаційних і технічних заходів, спрямованих на підвищення якості електропостачання, а також встановлення тарифних механізмів стимулювання у вигляді знижок або надбавок залежно від рівня якості електроенергії. До системи контролю також входить сертифікація електричної енергії та визначення джерел спотворень показників якості з подальшим встановленням відповідальних сторін.

Залежно від цільового призначення контроль і аналіз якості електроенергії може здійснюватися у формах діагностичного, інспекційного, оперативного контролю та комерційного обліку. Діагностичний контроль спрямований на визначення джерел погіршення якості електроенергії на межі балансового розподілу між енергопостачальною організацією та споживачем, а також на встановлення допустимого внеску кожної сторони у загальне відхилення показників від нормативних значень. Отримані результати використовуються при формуванні або уточненні умов договорів електропостачання та для подальшої нормалізації режимів роботи електричних мереж.

Такий вид контролю застосовується під час видачі та перевірки технічних умов на приєднання споживачів, а також при контролі виконання договірних зобов'язань щодо електропостачання. У випадках спільного живлення групи споживачів визначається їх індивідуальний внесок у погіршення якості електроенергії. Вимірювання мають періодичний характер і виконуються, як правило, протягом коротких інтервалів часу, що не перевищують одного тижня,

із реєстрацією як нормованих, так і додаткових показників, включаючи струми, їх гармонійний склад та симетричні складові.

У разі встановлення факту впливу споживача на погіршення показників якості електроенергії спільно з енергопостачальною організацією розробляються технічні заходи щодо усунення порушень та визначаються строки їх реалізації. До моменту впровадження таких заходів застосовуються оперативні форми контролю та елементи комерційного обліку якості електроенергії.

Подальші вимірювання можуть здійснюватися на рівні шин районних підстанцій, до яких приєднані кабельні лінії споживачів. Такі точки контролю використовуються для аналізу роботи пристроїв регулювання напруги під навантаженням трансформаторів, накопичення статистики провалів та перенапруг, а також оцінювання ефективності роботи засобів компенсації реактивної потужності, релейного захисту та автоматики в електричних мережах.

Інспекційний контроль якості електроенергії здійснюється, як правило, органами сертифікації з метою отримання об'єктивної інформації щодо відповідності параметрів електроенергії встановленим вимогам протягом усього періоду дії сертифіката. Такий контроль дозволяє перевірити дотримання умов використання сертифікованої електроенергії в електричних мережах енергопостачальної організації та підтвердити, що її якість залишається стабільною і відповідає нормативним вимогам.

Оперативний контроль якості електроенергії застосовується в умовах експлуатації в тих точках електричних мереж, де наявні стійкі спотворення напруги, які в найближчій перспективі не можуть бути усунені технічними засобами. Він є особливо актуальним для вузлів приєднання тягових підстанцій залізничного та міського електротранспорту, а також для промислових підприємств із значною часткою нелінійних навантажень. Результати такого контролю передаються по каналах зв'язку до диспетчерських пунктів енергопостачальних організацій і систем електропостачання підприємств для оперативного аналізу та прийняття рішень.

Комерційний облік показників якості електроенергії здійснюється на межі розподілу електричних мереж між споживачем та енергопостачальною організацією і використовується як основа для формування тарифних коригувань у вигляді знижок або надбавок залежно від рівня якості електропостачання. Такий облік розглядається як економічний інструмент впливу на учасників електроенергетичного ринку, відповідальних за погіршення параметрів електроенергії.

Системи комерційного обліку якості електроенергії функціонують безперервно в точках розрахункового обліку і поєднують функції вимірювання електроенергії та контролю її якості. Інтеграція цих функцій в одному приладі дозволяє об'єднати оперативний контроль і комерційний облік, використовуючи спільні канали передачі даних, а також єдині засоби обробки, зберігання та відображення інформації в системах АСКУЕ.

Такі прилади повинні забезпечувати фіксацію частки часу перевищення як нормально допустимих, так і граничних значень показників якості електроенергії за розрахунковий період, що є основою для формування економічних санкцій або стимулюючих тарифів.

Контроль за дотриманням вимог стандартів з боку енергопостачальних організацій і споживачів здійснюється органами державного нагляду та акредитованими випробувальними лабораторіями, що спеціалізуються на оцінюванні якості електроенергії.

Вимірювання показників якості електроенергії у точках загального приєднання споживачів до мереж загального призначення проводяться енергопостачальними організаціями відповідно до встановлених нормативних вимог. Періодичність контролю визначається характером показників: для усталеного відхилення напруги — не рідше двох разів на рік з урахуванням сезонних змін навантаження, а за наявності автоматичного регулювання напруги — не рідше одного разу на рік; для інших показників якості — не рідше одного разу на два роки за умови стабільності схеми мережі та незначних змін характеру навантаження.

Споживачі, діяльність яких призводить до погіршення якості електроенергії, повинні здійснювати контроль у власних мережах у точках, найближчих до вузлів загального приєднання, а також безпосередньо на затискачах електроприймачів, що є джерелами спотворень.

Періодичність проведення контролю якості електроенергії визначається споживачем електричної енергії за погодженням з енергопостачальною організацією з урахуванням умов експлуатації електричних мереж.

Контроль якості електроенергії, що відпускається підстанціями змінного струму в мережі напругою 6–35 кВ, здійснюється у таких випадках:

- для електричних мереж напругою 6–35 кВ, які перебувають у віданні енергосистем, вимірювання виконуються у точках приєднання цих мереж до тягових підстанцій;
- для електричних мереж 6–35 кВ, що не належать до енергосистем, точки контролю визначаються за взаємною згодою між тяговими підстанціями та споживачами електроенергії; при цьому для новозбудованих або реконструйованих тягових підстанцій (зокрема із заміною трансформаторного обладнання) контроль здійснюється у точках приєднання споживачів до відповідних мереж.

РОЗДІЛ 2

ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

2.1 Вплив відхилення показників якості електричної енергії на момент асинхронного електродвигуни

Відхилення напруги та несиметрія напруги істотно впливають на режими роботи трифазних асинхронних електродвигунів [13, 14], що проявляється у зміні їх електромеханічних характеристик та погіршенні умов експлуатації.

Результати експериментальних досліджень, присвячених аналізу впливу відхилень і несиметрії напруги на роботу трифазних асинхронних двигунів, наведено на рис. 1.1.

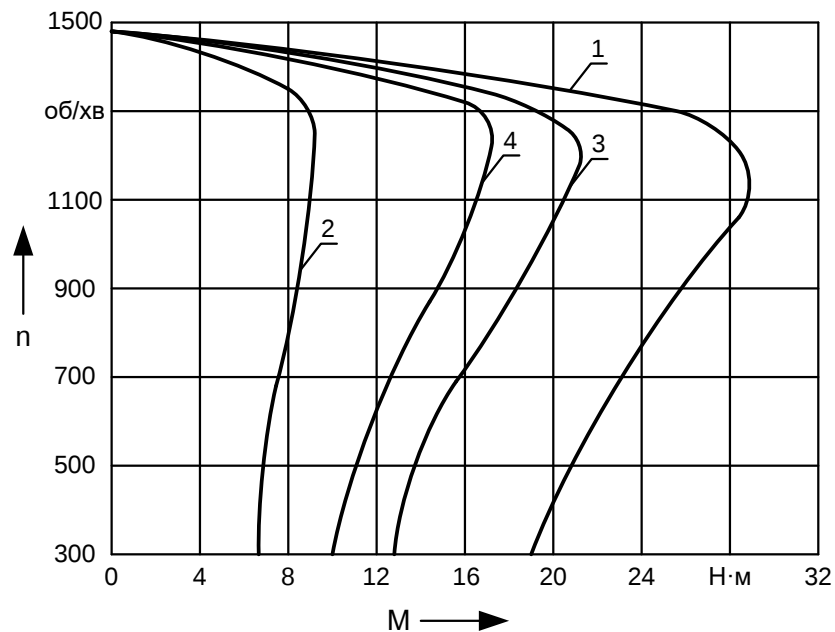


Рис. 2.1. Механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна: 1 – природна; 2 – при зниженій напрузі в $\sqrt{3}$ раз; 3 – при коефіцієнті несиметрії напруг 0,86; 4 – при коефіцієнті несиметрії напруг 0,8

За умов відхилення напруги живлення критичне ковзання асинхронного двигуна залишається практично незмінним, тоді як електромагнітний момент змінюється пропорційно квадрату прикладеної напруги [15].

$$M = M_{np}(U/U_n)^2, \quad (2.1)$$

де M – момент двигуна, Н·м; M_{np} – момент двигуна на природній механічній характеристиці, Н·м; U – напруга на двигуні, В; U_n – номінальна напруга, В.

Зниження напруги живлення на рівні близько 5 % призводить до зменшення електромагнітного моменту двигуна приблизно на 10 %. У результаті виникає режим перевантаження, оскільки для підтримання технологічного процесу двигун споживає підвищений струм, що прискорює зношування ізоляції та скорочує строк його експлуатації. При більш суттєвому зниженні напруги (приблизно на 25 %) максимальний момент двигуна зменшується майже у два рази, що може призвести до втрати стійкості роботи та «перекидання» двигуна.

Також встановлено, що при зниженні напруги на 10 % пусковий момент зменшується приблизно на 20 %. У випадках, коли кратність пускового моменту за номінальних умов становить близько 1,6, зменшення напруги призводить до того, що момент опору механізму перевищує пусковий момент двигуна, внаслідок чого запуск стає неможливим.

Зменшення напруги супроводжується зниженням кутової швидкості електродвигуна, що безпосередньо впливає на продуктивність робочих машин і призводить до збільшення втрат електроенергії, оскільки вони зростають зі збільшенням ковзання.

Водночас як зниження, так і підвищення напруги відносно номінального значення спричиняють погіршення коефіцієнта потужності. При підвищенні напруги зростають споживання реактивної потужності, струм навантаження та температура електродвигуна, що прискорює процес старіння та деградації ізоляції. При цьому зміни кутової швидкості та активної потужності залишаються незначними, однак енергетичні втрати в мережі зростають.

Отже, як підвищення, так і зниження напруги призводять до негативних наслідків, серед яких збільшення втрат електроенергії, скорочення ресурсу електродвигуна, відхилення кутової швидкості та погіршення продуктивності технологічних механізмів.

Експериментальні дослідження також підтверджують, що несиметрія напруги викликає зменшення електромагнітного моменту двигуна, що призводить до його перевантаження. У зв'язку з цим необхідно обмежувати допустиме навантаження електродвигунів: при рівні несиметрії 2 % допустиме навантаження зменшується приблизно на 2 %, а при 5 % — вже на 13 %.

Наявність несиметрії напруги спричиняє зростання струмів у фазах, збільшення втрат активної потужності в обмотках статора і ротора, а також додаткове теплове навантаження, що прискорює старіння ізоляції та скорочує строк служби двигуна. За даними досліджень, при коефіцієнті несиметрії близько 2 % ресурс електродвигуна зменшується на 10,8 %, а при 4 % — може скорочуватися приблизно вдвічі. Відомо також, що обрив або значна несиметрія фаз трифазної мережі є однією з причин виходу з ладу до 30–40 % електродвигунів.

Зміна частоти живильної мережі впливає на параметри роботи двигуна іншим чином: при її відхиленні змінюються критичне ковзання та максимальний момент, тоді як жорсткість механічної характеристики на робочій ділянці залишається практично сталою. Підвищення частоти супроводжується збільшенням кутової швидкості та зменшенням максимального моменту, тоді як її зниження призводить до протилежного ефекту — зменшення швидкості та зростання максимального моменту і критичного ковзання.

2.2 Вплив відхилення напруги на кутову швидкість асинхронного двигуна

Унаслідок відхилень напруги живлення або частоти електричної мережі відбувається зміна кутової швидкості асинхронного двигуна, що, у свою чергу, безпосередньо впливає на технологічні характеристики робочих машин. У зв'язку з цим виконано дослідження залежності кутової швидкості асинхронних двигунів від відхилень напруги та частоти живильної мережі.

При зміні напруги двигун функціонує на робочій ділянці механічної характеристики, яка обмежується значеннями ковзання від нуля до критичного значення ск. У межах цієї ділянки механічну характеристику асинхронного двигуна з достатньою точністю можна вважати лінійною [18], тобто:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta}(\omega_0 - \omega), \quad (2.2)$$

де M_{δ} – момент двигуна; β_{δ} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна; ω_0 – синхронна кутова швидкість; ω – задана кутова швидкість.

Механічна характеристика робочих машин описується рівнянням [19, 20]:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (2.3)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини при заданій кутовій швидкості; M_0 – початковий момент; $M_{сн}$ – момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості; ω і ω_n – задане і номінальне значення кутової швидкості; x – показник степеня.

При відхиленні напруги механічна характеристика електродвигуна на робочій ділянці опишеться рівнянням:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta} U_*^2 (\omega_0 - \omega), \quad (2.4)$$

де $U_* = U/U_n$ – напруга у відносних одиницях.

В усталеному режимі роботи

$$\beta_{\delta} U_*^2 (\omega_0 - \omega) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (2.5)$$

або

$$\beta_{\delta} U_*^2 (\omega_0 - \omega_n \omega_*) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^x, \quad (2.6)$$

де $\omega_* = \omega/\omega_n$ – кутова швидкість у відносних одиницях.

Після перетворень отримаємо:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^x}{\beta_{\delta} (\omega_0 - \omega_n \omega_*)}}. \quad (2.7)$$

Як впливає із виразу (2.7), кутова швидкість двигуна змінюється за складним алгоритмом.

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості ($x=0$), рівняння (2.7) прийме вигляд:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_{сн}}{\beta_o(\omega_0 - \omega_n \omega_*)}}, \quad (2.8)$$

звідки

$$\beta_o(\omega_0 - \omega_n \omega_*) = \frac{M_{сн}}{U_*^2} \quad (2.9)$$

або

$$\omega_* = \frac{\omega_0}{\omega_n} - \frac{M_{сн}}{\beta_o \omega_n U_*^2}. \quad (2.10)$$

Таким чином, для робочих машин із постійним моментом статичних опорів зміна кутової швидкості обернено пропорційна квадрату прикладеної напруги.

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів має лінійну залежність від кутової швидкості ($x=1$), рівняння (2.7) набуває вигляду:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0)\omega_*}{\beta_o(\omega_0 - \omega_n \omega_*)}}. \quad (2.11)$$

Для робочих машин з вентиляторною механічною характеристикою ($x=2$) рівняння (2.7) запишеться у вигляді:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0)\omega_*^2}{\beta_o(\omega_0 - \omega_n \omega_*)}}. \quad (2.12)$$

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів гіперболічно залежить від кутової швидкості ($x=-1$), рівняння (2.7) має вигляд:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0)/\omega_*}{\beta_o(\omega_0 - \omega_n \omega_*)}} = \sqrt{\frac{M_{сн} - M_0(1 - \omega_*)}{\beta_o(\omega_0 \omega_* - \omega_n \omega_*^2)}}. \quad (2.13)$$

Якщо знехтувати початковим моментом $M_0=0$, отримаємо

$$U_* = \sqrt{\frac{M_{сн} \omega_*^x}{\beta_o(\omega_0 - \omega_n \omega_*)}}. \quad (2.14)$$

Оскільки

$$M_{сн} = K_z M_{дн}, \quad (2.15)$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження двигуна,

$$\beta_o = \frac{M_{\partial n}}{\omega_0 - \omega_n} = \frac{M_{\partial n}}{\omega_0 s_n}, \quad (2.16)$$

де s_n – номінальне ковзання двигуна,

то вираз (2.14) можна записати як:

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 M_{\partial n} \omega_*^x \omega_0 s_n}{M_{\partial n} (\omega_0 - \omega_n \omega_*)}} = \sqrt{\frac{K_3 s_n \omega_*^x}{1 - \omega_* (1 - s_n)}}. \quad (2.17)$$

Вираз (2.17) також можна представити через ковзання у вигляді:

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 \omega_*^x s_n}{s}}. \quad (2.18)$$

Тоді для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості ($x=0$), рівняння (2.18) прийме вигляд:

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 s_n}{s}}, \quad (2.19)$$

звідки

$$s = \frac{K_3 s_n}{U_*^2}. \quad (2.20)$$

Таким чином, для робочих машин із постійним моментом статичних опорів ковзання асинхронного двигуна змінюється обернено пропорційно квадрату напруги живлення.

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів має лінійну залежність від кутової швидкості ($x = 1$), рівняння (2.18) набуває вигляду:

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 (1-s) s_n}{(1-s_n) s}}, \quad (2.21)$$

звідки

$$s = \frac{K_3 s_n}{K_3 s_n + U_*^2 (1-s_n)}. \quad (2.22)$$

Для електродвигунів із жорсткою механічною характеристикою номінальне ковзання невелике, тому

$$s \approx \frac{K_3 s_n}{U_*^2}. \quad (2.23)$$

Для робочих машин з вентиляторною механічною характеристикою ($x=2$) рівняння (2.18) матиме вигляд:

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 \omega_*^2 s_n}{s}} = \frac{1-s}{1-s_n} \sqrt{\frac{K_3 s_n}{s}}. \quad (2.24)$$

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів зменшується із зростанням кутової швидкості ($x=-1$), рівняння (2.18) запишеться як:

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 s_n}{s \omega_*}} = \sqrt{\frac{K_3 s_n (1-s_n)}{s(1-s)}}. \quad (2.25)$$

Для робочих машин із вентиляторним або гіперболічним характером навантаження процес зміни ковзання асинхронного двигуна при відхиленні напруги є багатofакторним і суттєво нелінійним. Це пов'язано з тим, що момент опору таких механізмів змінюється залежно від швидкості, а отже, реакція системи на зміну напруги визначається одночасно як властивостями двигуна, так і характером навантаження.

У практичних дослідженнях встановлено, що навіть за однакових умов живлення характер перехідних процесів та ступінь зміни кутової швидкості суттєво відрізняються для різних типів механічних характеристик. Зокрема, для двигунів із номінальними значеннями ковзання 0,02; 0,05 та 0,1 зміна кутової швидкості при відхиленні напруги проявляється по-різному залежно від типу робочого механізму.

Отримані залежності для різних умов навантаження подано на графіках: для машин із постійним моментом статичних опорів — на рис. 2.2, а; для механізмів

із лінійною залежністю моменту від швидкості — на рис. 2.2, б; для робочих машин із вентиляторною характеристикою — на рис. 2.3, а; для систем із гіперболічним характером навантаження — на рис. 2.3, б.

Аналіз цих залежностей показує, що найбільш чутливими до відхилення напруги є механізми з вентиляторним та гіперболічним характером навантаження, де навіть незначні зміни електроживлення призводять до помітного відхилення кутової швидкості від номінального режиму.

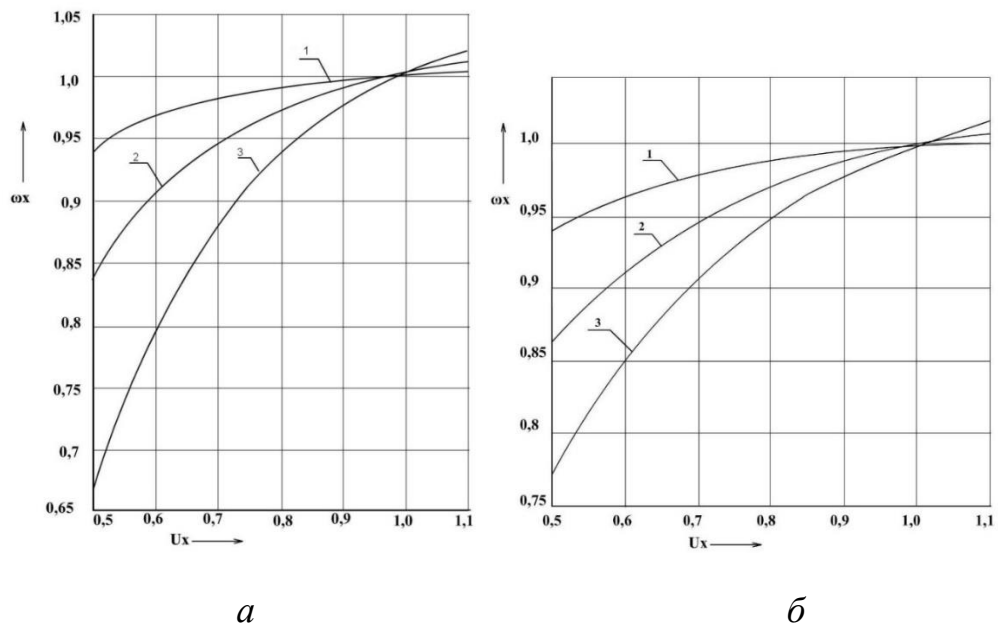


Рис. 2.2. Зміна кутової швидкості від напруги в електроприводах робочих машин з моментом статичних опорів не залежним від кутової швидкості (а) та лінійно залежним від кутової швидкості (б) при номінальному ковзанні двигуна:

1 – 0,02; 2 – 0,05; 3 – 0,1

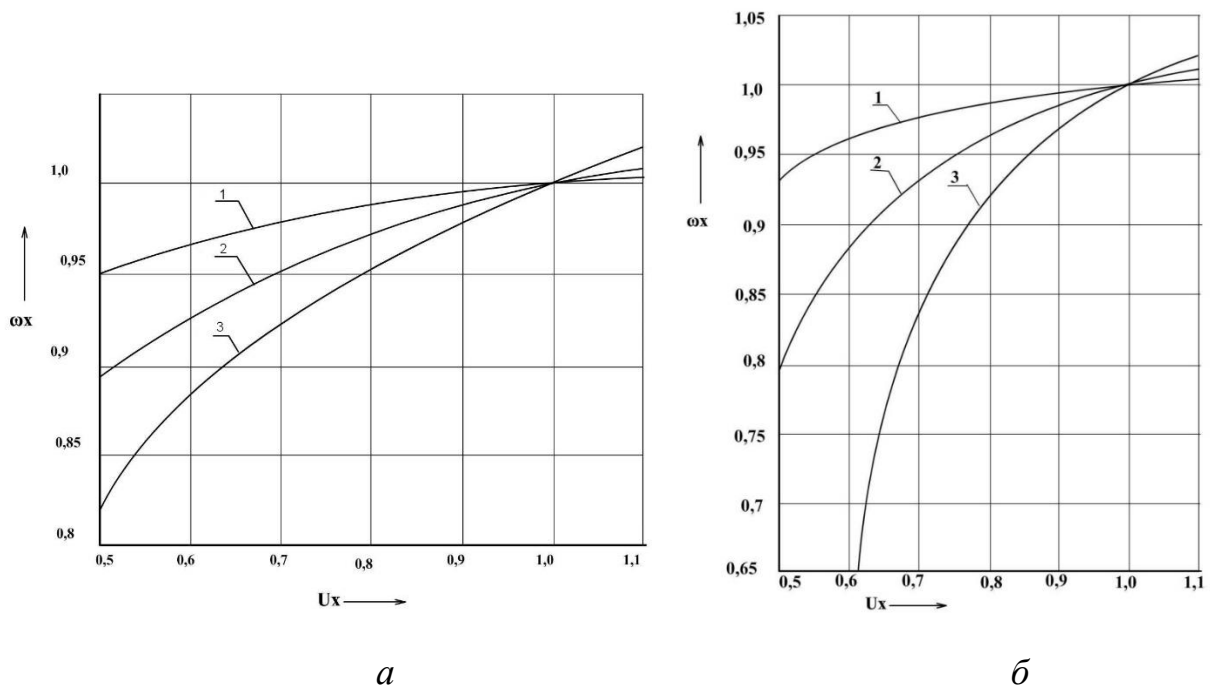


Рис. 2.3. Зміна кутової швидкості від напруги в електроприводах робочих машин з вентиляторною (а) та гіперболічною (б) механічною характеристикою при номінальному ковзанні двигуна:

1– 0,02; 2 – 0,05; 3 – 0,1

Аналіз наведених залежностей свідчить, що кутова швидкість приводних електродвигунів із жорсткою механічною характеристикою зазнає значно менших змін у порівнянні з двигунами, що працюють на м'яких механічних характеристиках. Це пояснюється вищою стійкістю таких систем до зовнішніх збурень, зокрема відхилень напруги живлення.

Залежності зміни кутової швидкості асинхронного двигуна з номінальним ковзанням 0,05 при відхиленні напруги для робочих машин із різними типами механічних характеристик наведено на рис. 2.4. Отримані результати підтверджують, що ступінь зміни кутової швидкості зростає у міру зменшення показника степеня x у рівнянні механічної характеристики, тобто для більш «м'яких» механічних систем.

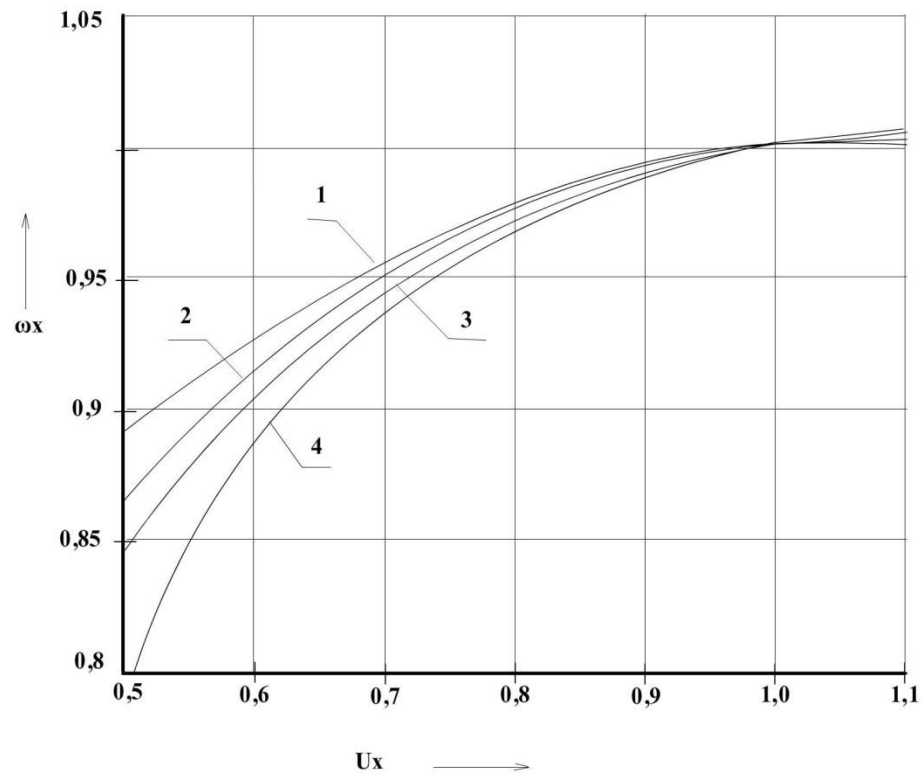


Рис.2.4. Зміна кутової швидкості електродвигуна з номінальним ковзанням 0,05 при зміні напруги, який застосовується для приводу робочих машин з показником степеня у рівнянні механічної характеристики:

1 – $x=2$; 2 – $x=1$; 3 – $x=0$; 4 – $x=-1$

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИВ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ РОБОЧИХ МАШИН

Для подальшого аналізу доцільно розглянути вплив відхилення напруги живлення на характер перехідних процесів в асинхронному електроприводі в умовах змінного навантаження. У такому режимі електродвигун працює на робочій ділянці механічної характеристики, яка з достатньою точністю може бути представлена лінійною апроксимацією [15]:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta}(\omega_0 - \omega), \quad (3.1)$$

де M_{δ} – момент двигуна; β_{δ} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна; ω_0 – синхронна кутова швидкість; ω – задана кутова швидкість.

При відхиленні напруги момент асинхронного двигуна:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta} U_*^2 (\omega_0 - \omega), \quad (3.2)$$

де $U_* = U/U_n$ – напруга у відносних одиницях.

Для більшості сільськогосподарських машин електромагнітні перехідні процеси не впливають на перебіг механічних [1]. Тоді можна записати:

$$\frac{dM_{\delta}}{dt} = -\beta_{\delta} \cdot U_*^2 \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.3)$$

Вихідним при розгляді перехідних процесів є рівняння руху електропривода:

$$M_{\delta} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.4)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини; J – зведений момент інерції електропривода.

Розглянемо перехідні режими в електроприводі за умови, що момент статичних опорів робочої машини залишається сталим ($M_c = \text{const}$). Такий режим характерний для ряду технологічних механізмів, у яких навантаження практично не змінюється залежно від кутової швидкості.

Підставивши співвідношення (3.3) до загального рівняння руху електропривода (3.4), одержуємо наступний вираз:

$$M_{\partial} - M_c = -J \frac{d\omega}{dt} = -\frac{J}{\beta_{\partial} \cdot U_*^2} \cdot \frac{dM_{\partial}}{dt}. \quad (3.5)$$

Рівняння (3.5) можна записати у вигляді:

$$T_m \frac{dM_{\partial}}{dt} + M_{\partial} = M_c, \quad (3.6)$$

де T_m – електромеханічна стала часу:

$$T_m = \frac{J}{\beta_{\partial} \cdot U_*^2}. \quad (3.7)$$

З аналізу виразу (3.7) випливає, що зменшення рівня напруги живлення призводить до збільшення електромеханічної сталої часу електропривода, що характеризує уповільнення перехідних процесів у системі.

За початкових умов, коли $t = 0$, а $M_d = M_{поч}$, диференціальне рівняння описуваного процесу має аналітичний розв'язок у вигляді:

$$M_{\partial} = M_c (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) + M_{поч} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.8)$$

Криві перехідного процесу $M_{\partial}=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 3.1.

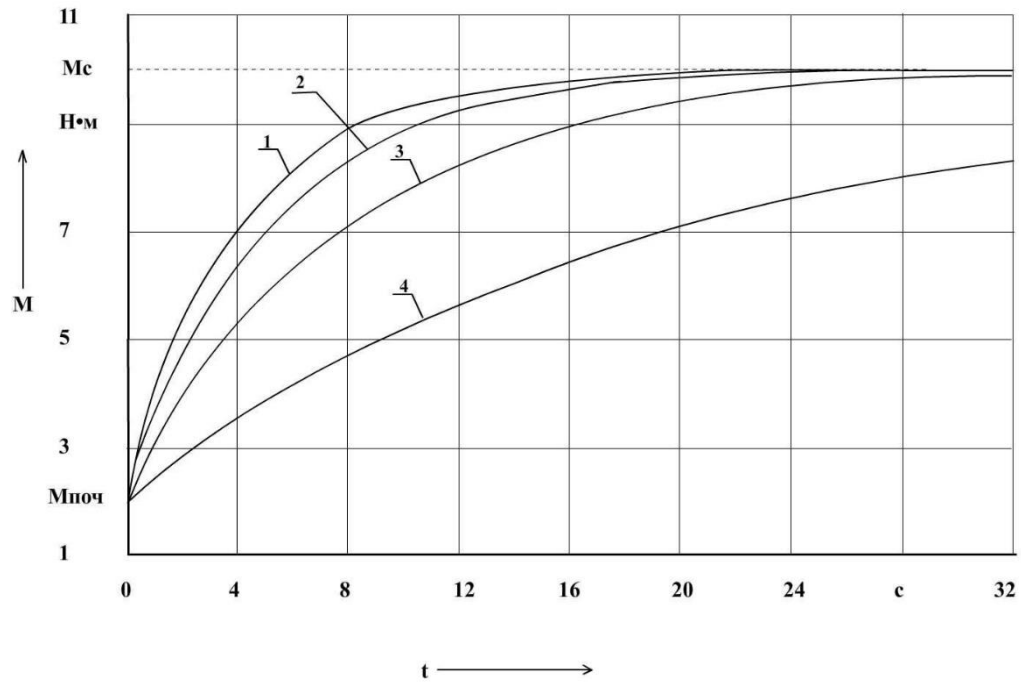


Рис. 3.1. Зміна моменту двигуна у часі при $M_c = \text{const}$ і напрузі:

1 – 1,1; 2 – 1,0; 3 – 0,8; 4 – 0,5 від номінальної

Закон зміни кутової швидкості у часі за (3.2) і (3.8) буде мати вигляд:

$$\omega = \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) + \omega_{\text{поч}} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (3.9)$$

де ω_c – усталена кутова швидкість при заданій напрузі:

$$\omega_c = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_\phi \cdot U_*^2}. \quad (3.10)$$

Криві перехідного процесу $\omega_\phi = f(t)$ показані на рис. 3.2.

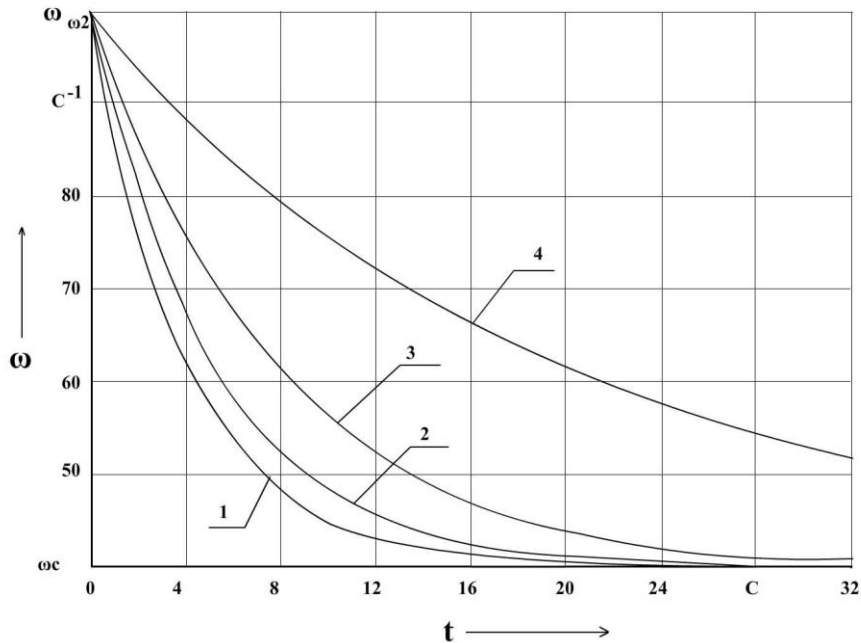


Рис.3.2. Зміна кутової швидкості двигуна у часі при $M_c = \text{const}$ і напрузі:

1 – 1,1 ; 2 – 1,0; 3 – 0,8; 4 – 0,5 від номінальної

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що для електроприводів робочих машин із незмінним моментом статичних опорів зменшення напруги живлення призводить до збільшення тривалості перехідних процесів. Водночас підвищення напруги сприяє скороченню часу встановлення режиму роботи електропривода.

У подальшому аналізі розглянемо перехідні процеси в електроприводі для випадку, коли момент статичних опорів змінюється в часі за лінійним законом:

$$M_c(t) = M_{0\text{поч}} + \mu t, \quad (3.11)$$

де $M_{0\text{поч}}$ – початкове значення моменту робочої машини; μ – швидкість зміни моменту.

Підставивши (3.11) у рівняння руху електропривода (3.5), отримаємо:

$$M_\delta - M_{0\text{поч}} - \mu t = J \frac{d\omega}{dt} = - \frac{J}{\beta_\delta \cdot U_*^2} \frac{dM_\delta}{dt}. \quad (3.12)$$

У даному випадку електромеханічна стала часу обернено пропорційна квадрату напруги:

$$T_{\text{м}} = \frac{J}{\beta_{\text{д.}} \cdot U_*^2}. \quad (3.13)$$

Тоді вираз (3.12) запишеться у вигляді:

$$M_{\text{д}} - M_{\text{ноч}} - \mu t = -T_{\text{м}} \frac{dM_{\text{д}}}{dt}, \quad (3.14)$$

або

$$T_{\text{м}} \frac{dM_{\text{д}}}{dt} + M_{\text{д}} = M_{\text{ноч}} + \mu t. \quad (3.15)$$

Частинний розв'язок диференційного рівняння (3.15), у якому права частина має лінійну залежність від часу, визначаємо у вигляді:

$$M_{\text{д}} = a + bt, \quad (3.16)$$

де a і b – невизначені коефіцієнти.

Підставивши (3.16) в (3.15), отримаємо:

$$bT_{\text{м}} + a + bt = M_{\text{ноч}} + \mu t, \quad (3.17)$$

звідки

$$a = M_{\text{ноч}} - \mu T_{\text{м}}; \quad (3.18)$$

$$b = \mu. \quad (3.19)$$

Загальний розв'язок рівняння (3.15) знаходять у вигляді ($k = -\frac{1}{T_{\text{м}}}$):

$$M_{\text{д}} = M_{\text{ноч}} - \mu T_{\text{м}} + \mu t + Ae^{\frac{t}{T_{\text{м}}}}. \quad (3.20)$$

Коефіцієнт A визначаємо із початкових умов при $t = 0$, $M_{\text{д}} = M_{\text{ноч}}$. В результаті отримаємо

$$A = M_{\text{ноч}} - M_{\text{ноч}} - \mu T_{\text{м}}. \quad (3.21)$$

Тоді закон зміни моменту двигуна запишеться у вигляді:

$$M_{\text{д}} = \mu t + (M_{\text{ноч}} - \mu T_{\text{м}})(1 - e^{\frac{t}{T_{\text{м}}}}) + M_{\text{ноч}} e^{\frac{t}{T_{\text{м}}}}. \quad (3.22)$$

Коли $M_{\text{ноч}} = M_{\text{ноч}}$, рівняння (3.22) прийме вигляд:

$$M_{\text{д}} = \mu t + M_{\text{ноч}} - \mu T_{\text{м}} + \mu T_{\text{м}} e^{\frac{t}{T_{\text{м}}}}. \quad (3.23)$$

Криві перехідного процесу $M_d = f(t)$ для випадку лінійного закону зміни моменту робочої машини в часі представлені на рис. 3.3. Проведений аналіз відповідних залежностей свідчить, що навантажувальні діаграми електродвигуна суттєво різняться між собою залежно від рівня прикладеної напруги, що визначає відмінний характер перебігу перехідних процесів у електроприводній системі.

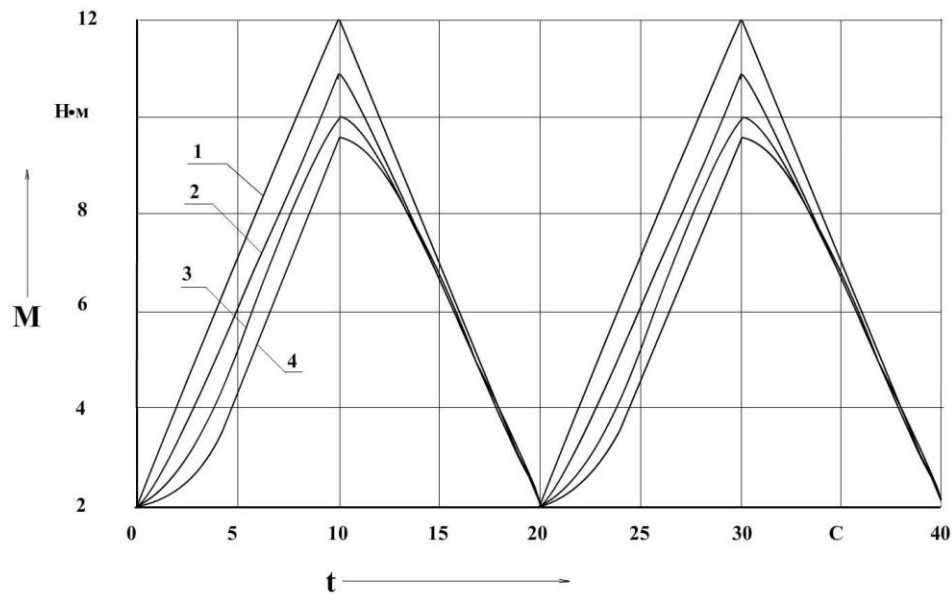


Рис. 3.3. Зміна моменту двигуна в електроприводах при лінійному законі зміни моменту статичних опорів робочої машини у часі (1) і напрузі: 2 – 0,8; 3 – 1,0; 4 – 1,1 від номінальної

Закон зміни кутової швидкості за (3.2) і (3.22) буде мати вигляд:

$$\omega = \left(\omega_0 - \frac{M_{0\text{поч}}}{\beta_0} + \frac{\mu T_M}{\beta_0} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + \omega_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_M}} - \frac{\mu}{\beta_0} t. \quad (3.24)$$

Коли $M_{0\text{поч}} = M_{\text{поч}}$, рівняння (24) запишеться у вигляді:

$$\omega = \omega_{\text{поч}} + \frac{\mu T_M}{\beta_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) - \frac{\mu}{\beta_0} t. \quad (3.25)$$

Криві перехідного процесу $\omega = f(t)$ для випадку лінійної зміни моменту робочої машини в часі наведено на рис. 3.4. Отримані залежності показують, що характер зміни кутової швидкості електродвигуна значною мірою визначається

рівнем прикладеної напруги: при її підвищенні відхилення кутової швидкості є менш вираженими порівняно з режимом зниження напруги.

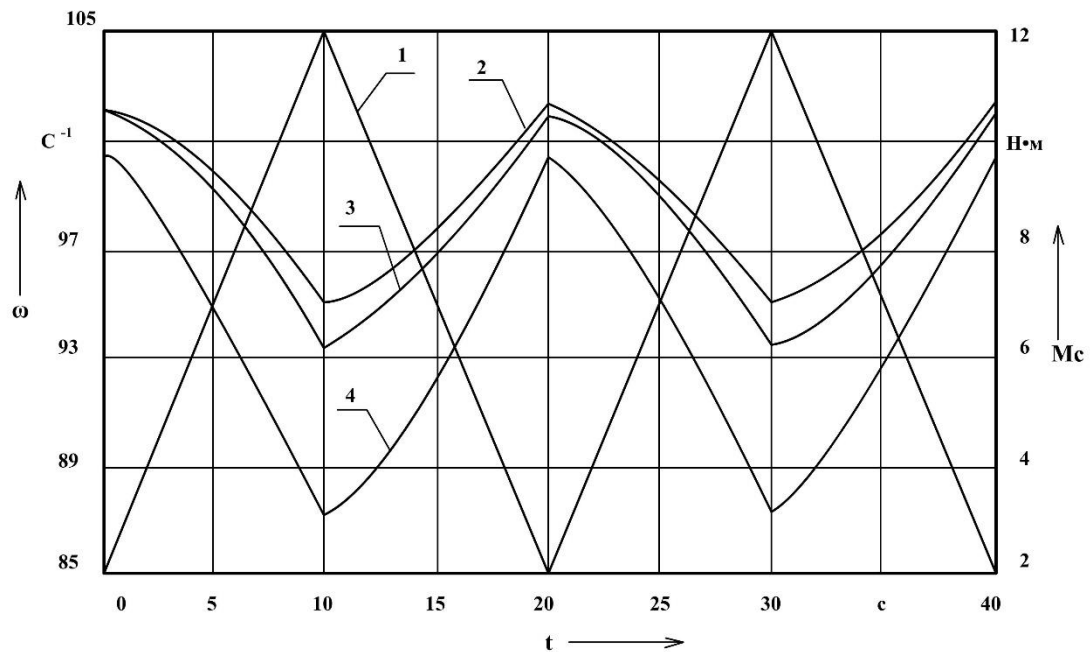


Рис. 3.4. Зміна кутової швидкості двигуна в електроприводах при лінійному законі зміни моменту статичних опорів робочої машини у часі (1) і напрузі:

2 – 0,8; 3 – 1,0; 4 – 1,1 від номінальної

Суттєвий науковий інтерес становить аналіз перехідних процесів в електроприводах із трифазними асинхронними двигунами з урахуванням нелінійного характеру (кривизни) їх механічної характеристики, яка у спрощеному вигляді може бути подана таким рівнянням [18]:

$$M_{\partial} = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}}, \quad (3.26)$$

де M_{κ} – максимальний момент двигуна; s_{κ} – критичне ковзання.

При відхиленні напруги механічна характеристика двигуна запишеться у вигляді:

$$M_{\partial} = \frac{2M_{\kappa} \cdot U_*^2}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}}. \quad (3.27)$$

Оскільки електромагнітні перехідні процеси характеризуються значно вищою швидкістю протікання порівняно з механічними, їх вплив у подальших розрахунках можна не враховувати. Це дає змогу істотно спростити математичний опис динаміки електропривода та зосередитися на основних механічних складових процесу.

Розглянемо перехідні режими за умови відсутності моменту статичних опорів ($M_c = 0$). На практиці подібний випадок може мати місце, наприклад, під час пуску на холостому ході потужних дробарок, які характеризуються значним зведеним до валу двигуна моментом інерції та відносно невеликим моментом опору робочого механізму.

Використовуючи спрощене подання механічної характеристики асинхронного двигуна, запишемо рівняння руху електропривода у вигляді:

$$\frac{2M_{\kappa} \cdot U_*^2}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.28)$$

Виконавши заміну

$$d\omega = -\omega_0 ds, \quad (3.29)$$

отримаємо:

$$\frac{2M_{\kappa} \cdot U_*^2}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}} = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (3.30)$$

Звідси:

$$dt = -\frac{J\omega_0}{2M_{\kappa} \cdot U_*^2} \left(\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s} \right) ds. \quad (3.31)$$

Проінтегрувавши вираз (3.31), можна знайти час перехідних процесів пуску привода при зміні ковзання від $s_{поч}$ до $s_{кін}$:

$$t_{no} = \frac{J\omega_0}{2M_K \cdot U_*^2} \int_{s_{кин}}^{s_{поч}} \left(\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} \right) ds = \frac{J\omega_0}{2M_K \cdot U_*^2} \left(\frac{s_{поч}^2 - s_{кин}^2}{2s_K} + s_K \ln \frac{s_{поч}}{s_{кин}} \right) \quad (3.32)$$

або

$$t_{no} = \frac{T_M}{2} \left(\frac{s_{поч}^2 - s_{кин}^2}{2s_K} + s_K \ln \frac{s_{поч}}{s_{кин}} \right), \quad (3.33)$$

де $T_M = \frac{J\omega_0}{M_K \cdot U_*^2}$ – електромеханічна стала часу.

Таким чином, зі зменшенням напруги живлення відбувається збільшення тривалості пускового режиму електродвигуна, а також відповідне зростання електромеханічної сталої часу. При цьому встановлена залежність має обернено пропорційний характер відносно квадрата прикладеної напруги. Отриманий результат є особливо важливим для аналізу роботи електроприводів із тривалими пусковими процесами, зокрема в технологічних установках типу молочних сепараторів.

Експериментальні криві перехідного процесу $n = f(t)$ під час пуску молочного сепаратора СОМ-3-1000М [20], який має вентиляторний характер механічного навантаження, наведено для номінального та зниженого рівнів напруги на рис. 3.5. Аналіз отриманих залежностей показує, що зниження напруги практично не впливає на кінцеве значення частоти обертання, однак суттєво збільшує тривалість розгону, що може призводити до перегріву електродвигуна та підвищення ймовірності його виходу з ладу.

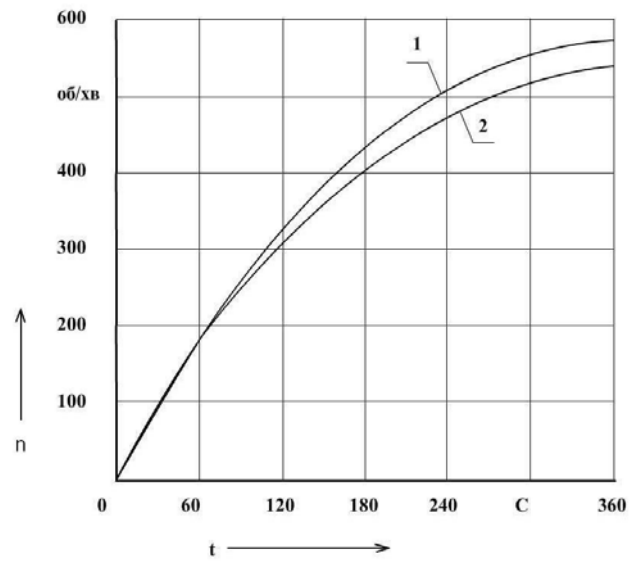


Рис.3.5. Криві розгону молочного сепаратора COM-3-1000M при номінальній (1) і зниженій у $\sqrt{3}$ раз напрузі (2)

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

4.1 Вплив відхилення напруги на енергетику електроприводів в усталеному режимі

Постійні втрати потужності в двигуні постійного струму незалежного або паралельного збудження формуються сукупністю втрат у колі збудження, а також механічних втрат і втрат у магнітопроводі. При цьому дві останні складові можуть бути оцінені з достатньою точністю за наближеною залежністю [2]:

$$\Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ст}} \approx (\Delta P_{\text{мн}} + \Delta P_{\text{стн}}) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (4.1)$$

де $\Delta P_{\text{мн}} + \Delta P_{\text{стн}}$ – механічні втрати і втрати в сталі при номінальній кутовій швидкості.

В усталеному режимі роботи:

$$M_{\delta} = M_c = \beta_{\delta} (\omega_0 - \omega), \quad (4.2)$$

де M_{δ} – електромагнітний момент двигуна при кутовій швидкості ω ; M_c – момент статичних опорів робочої машини; β_{δ} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна; ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу.

Звідси

$$\omega = \frac{U}{C} - \frac{M_c}{\beta_{\delta}}. \quad (4.3)$$

При жорсткій механічній характеристиці електродвигуна величиною M_c/β_{δ} можна знехтувати, тоді

$$\Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ст}} \approx (\Delta P_{\text{мн}} + \Delta P_{\text{стн}}) U_*^2 \quad (4.4)$$

В усталеному режимі роботи змінні втрати в колі якоря двигуна постійного струму за умови незмінного моменту статичних опорів робочої машини ($M_c = \text{const}$) визначаються відповідно до виразу:

$$\Delta P_v = M_{\delta} (\omega_0 - \omega) = M_c^2 / \beta_{\delta}. \quad (4.5)$$

У цьому випадку змінні втрати потужності можна вважати сталими, оскільки вони відповідають номінальному режиму роботи двигуна, тобто є рівними номінальним значенням.

Якщо знехтувати початковим моментом робочої машини ($M_0 = 0$), вираз для змінних втрат потужності може бути поданий у наступному вигляді:

$$\Delta P_v = M_{cn} \omega_*^x (\omega_0 - \omega), \quad (4.6)$$

де M_{cn} – момент статичних опорів робочої машини при номінальній кутовій швидкості; x – показник степеня в рівнянні механічної характеристики робочої машини.

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості, $x=1$ і $\omega_* \approx U_*$, тоді вираз (3.6) запишеться у вигляді:

$$\Delta P_v \approx M_{cn} \omega_* \frac{U}{C} \frac{\beta_c}{\beta_\phi + \beta_c} = \Delta P_{vн} U_*^2. \quad (4.7)$$

Таким чином, для робочих машин із лінійною залежністю моменту статичних опорів від кутової швидкості змінні втрати потужності мають квадратичну залежність від зміни напруги живлення, тобто зростають або зменшуються пропорційно квадрату її відхилення.

У випадку нелінійної залежності моменту статичних опорів від кутової швидкості в межах невеликих відхилень режиму роботи від номінального значення допустимою є лінеаризація механічної характеристики робочої машини, що дозволяє застосовувати залежності для оцінювання втрат потужності, наведені у виразі (4.7).

Отримані закономірності свідчать, що при зниженні напруги живлення загальні втрати в електроприводах із двигунами постійного струму мають тенденцію до зменшення, тоді як при підвищенні напруги спостерігається їх зростання.

У асинхронних двигунах до складу постійних втрат відносять механічні втрати, втрати в сталі статора і ротора, а також втрати в обмотці статора, зумовлені струмом намагнічування [15]:

$$\Delta P_c = \Delta P_m + \Delta P_{cm1} + \Delta P_{cm2} + 3I_\mu^2 R_1. \quad (4.8)$$

Механічні втрати визначаються за наближеною формулою:

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{м.н}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2, \quad (4.9)$$

де $\Delta P_{\text{м.н}}$ – механічні втрати при номінальній швидкості.

Втрати в сталі від вихрових струмів і гістерезису визначаються за формулою [3]:

$$\Delta P_{\text{см}} = \Delta P_{\text{см1}} + \Delta P_{\text{см2}} \approx \Delta P_{\text{см1н}} \left(\frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^{1,3} (1 + s^{1,3}), \quad (4.10)$$

де $\Delta P_{\text{см1н}}$ – втрати в сталі статора при номінальних значеннях частоти і напруги живлення.

При відхиленні напруги $f_1 = f_{1\text{н}}$ і вираз (4.10) матиме вигляд:

$$\Delta P_{\text{см}} \approx \Delta P_{\text{см1н}} U_*^2 (1 + s^{1,3}). \quad (4.11)$$

Для робочих машин, у яких $M_c = \text{const}$, вираз (4.11) матиме вигляд:

$$\Delta P_{\text{см}} \approx \Delta P_{\text{см1н}} \left(U_*^2 + \frac{K_3^{1,3} s_{\text{н}}^{1,3}}{U_*^{0,6}} \right). \quad (4.12)$$

Змінні втрати потужності при зміні напруги живлення асинхронного електродвигуна

$$\Delta P_{\text{в}} = \Delta P_{\text{в2}} + \Delta P_{\text{в1}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) M (\omega_0 - \omega), \quad (4.13)$$

де $\Delta P_{\text{в2}}$, $\Delta P_{\text{в1}}$ – змінні втрати потужності в колах ротора і статора; R_1 – активний опір обмотки ротора; R_2' – опір обмотки ротора, зведений до обмотки статора; M – момент двигуна; ω_0 – синхронна кутова швидкість.

У випадку, коли момент статичних опорів робочої машини не залежить від кутової швидкості ($M_c = \text{const}$), вираз (4.13) може бути представлений у наступній формі:

$$\Delta P_{\text{в}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \frac{M_c^2}{\beta_{\text{д}}}. \quad (4.14)$$

При відхиленні напруги живлення змінні втрати потужності в асинхронному двигуні

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \frac{M_c^2}{\beta_o U_*^2}, \quad (4.15)$$

або

$$\Delta P = \Delta P_n / U_*^2, \quad (4.16)$$

де ΔP_n – змінні втрати при номінальній напрузі.

Таким чином, змінні втрати потужності в асинхронному двигуні мають обернено пропорційну залежність від квадрата напруги живлення. При підвищенні напруги їх величина зменшується відносно номінального режиму, тоді як при зниженні напруги спостерігається їх зростання.

Постійні втрати потужності, у свою чергу, при зменшенні напруги дещо зменшуються, однак їх внесок у загальний баланс є незначним, оскільки вони істотно менші за змінні втрати. У результаті сумарні втрати потужності зростають при зниженні напруги та зменшуються при її підвищенні, що ілюструється на рис. 4.1.

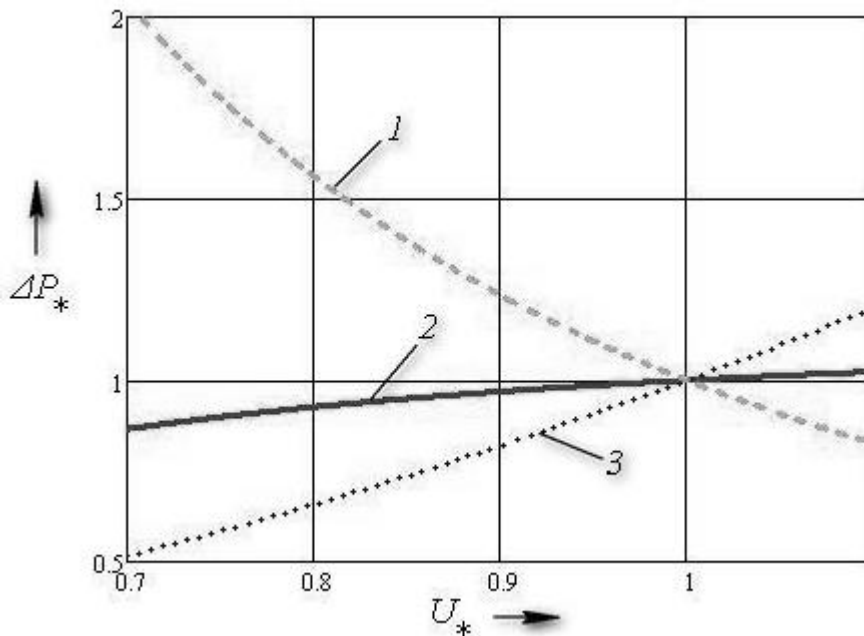


Рис. 4.1. Зміна втрат потужності в електродвигуні стрічкового транспортера при відхиленні напруги:

1 – змінні втрати; 2 – механічні втрати; 3 – втрати в сталі

4.2. Енергетика перехідних процесів в електроприводах сільськогосподарських машин

Оцінювання енергетичних показників роботи електропривода в перехідних режимах має суттєве значення, оскільки саме в цих режимах струми в обмотках електродвигуна можуть значно перевищувати номінальні значення, що призводить до підвищених втрат електроенергії та інтенсивного нагрівання машини. Особливо актуальним є аналіз таких втрат для електроприводів, у яких перехідні процеси є домінуючими режимами роботи і практично відсутній тривалий усталений стан. У загальному випадку втрати електроенергії за час перехідного процесу визначаються як:

$$\Delta A = \int_0^t \Delta P dt = \int_0^t (\Delta P_c + \Delta P_v) dt = \int_0^t \Delta P_c dt + \int_0^t \Delta P_v dt = \Delta A_c + \Delta A_v, \quad (4.17)$$

де ΔA_c і ΔA_v відповідно постійні і змінні втрати енергії.

Постійні втрати енергії ΔA_c за час перехідного процесу t_n визначаються за формулою:

$$\Delta A_c = \int_0^t \Delta P_c dt = \Delta P_c t_n, \quad (4.18)$$

де ΔP_c - постійні втрати потужності.

Таким чином, постійні втрати енергії визначаються тривалістю перехідного процесу та залежать від його динамічних характеристик.

Для асинхронних двигунів змінні втрати енергії можуть бути подані у вигляді:

$$\Delta A_v = \int_0^{t_n} M(\omega_0 - \omega) \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) dt, \quad (4.19)$$

де R_1 – активний опір обмотки статора; R_2' – зведений активний опір обмотки ротора.

Якщо знехтувати постійними втратами як такими, що мають незначний вплив у перехідних режимах, то втрати енергії в асинхронному електроприводі за умови роботи без навантаження ($M_c = 0$) можуть бути визначені у вигляді:

$$\Delta A_{v0} = J \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \int_{\omega_{пoc}}^{\omega_{кин}} (\omega_0 - \omega) d\omega = J \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left(\omega_0 (\omega_{кин} - \omega_{пoc}) - \frac{\omega_{кин}^2 - \omega_{пoc}^2}{2} \right). \quad (4.20)$$

Вираз (4.20) можна також представити через ковзання двигуна у вигляді:

$$\Delta A_{v0} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) (s_{пoc}^2 - s_{кин}^2). \quad (4.21)$$

Таким чином, втрати енергії в асинхронному електродвигуні під час перехідних процесів без навантаження не залежать від форми механічної характеристики, тривалості перехідного процесу, а також рівня прикладеної напруги.

У подальшому розглянемо випадок наявності навантаження, для якого визначення втрат енергії в асинхронному електроприводі здійснюється на основі співвідношень (4.19) і (4.20):

$$\Delta A_{vc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\int_0^{t_n} M_c (\omega_0 - \omega) dt + J \left((\omega_0 (\omega_{кин} - \omega_{пoc}) + \frac{\omega_{кин}^2 - \omega_{пoc}^2}{2}) \right) \right]. \quad (4.22)$$

Зазначене рівняння (4.22) не має аналітичного розв'язку, оскільки кутова швидкість, а в окремих випадках і електромагнітний момент двигуна M , є нелінійними функціями часу.

У випадку, коли зазначені залежності можна спростити, втрати енергії під час пуску двигуна визначаються наступним виразом:

$$\Delta A_{nc} = J \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\left(\omega_0 \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) + M_c \omega_0 t_n - M_c \int_0^{t_n} \omega dt \right]. \quad (4.23)$$

Аналогічно до двигунів постійного струму незалежного та паралельного збудження, втрати енергії в обмотках статора і ротора асинхронного двигуна

зумовлені процесом розгону до усталеної кутової швидкості ω_c , а також наявністю моменту статичних опорів.

Втрати енергії під час пуску двигуна з урахуванням відхилення напруги визначаються наступним виразом:

$$\Delta A_{nc} = J \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\left(\frac{\omega_0^2}{2} - \frac{M_c^2}{2\beta_0^2 U_*^4} \right) + M_c \omega_0 t_n(U) - M_c \int_0^{t_n} \omega dt \right]. \quad (4.24)$$

У таких умовах зменшення напруги живлення призводить до зниження електромагнітного моменту двигуна і, як наслідок, до збільшення тривалості пускового процесу. При цьому кутова швидкість усталеного режиму змінюється незначно, тому сумарні втрати енергії в асинхронному електроприводі зростають зі зниженням напруги.

У випадку гальмування електродвигуна способом противмикання втрати енергії визначаються залежністю:

$$\Delta A_{enc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[J \left(\omega_0 \omega_c + \frac{\omega_c^2}{2} \right) - M_c \omega_0 t_z - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right]. \quad (4.25)$$

Порівняно з режимом роботи на холостому ході втрати енергії в електродвигуні при гальмуванні зменшуються. Це пояснюється зміною енергетичного балансу в процесі гальмування та перерозподілом втрат у машині.

За умов відхилення напруги втрати енергії при гальмуванні електродвигуна способом противмикання можуть бути подані у вигляді залежності:

$$\Delta A_{enc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[J \left(\frac{3}{2} \omega_0^2 - 2\omega_0 \frac{M_c}{\beta_0 U_*^2} + \frac{M_c^2}{2\beta_0^2 U_*^4} \right) - M_c \omega_0 t_z(U) - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right]. \quad (4.26)$$

При гальмуванні електродвигуна способом противмикання зменшення напруги живлення призводить до збільшення тривалості процесу гальмування та одночасного зниження втрат енергії в системі.

У випадку динамічного гальмування втрати енергії в обмотках ротора визначаються наступною залежністю:

$$\Delta A_{\text{зодс}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left(\frac{J \omega_c^2}{2} - M_c \int_0^{t_z} \omega \, dt \right). \quad (4.27)$$

При відхиленні напруги втрати енергії в обмотках ротора при динамічному гальмуванні двигуна описуються залежністю:

$$\Delta A_{\text{зодс}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left(\frac{J}{2} \left(\omega_0 - \frac{M_c}{\beta_o U_*^2} \right)^2 - M_c \int_0^{t_z} \omega \, dt \right), \quad (4.28)$$

Аналіз наведених залежностей (3.79) і (3.80) показує, що втрати енергії в обмотках ротора при динамічному гальмуванні зменшуються зі зниженням напруги живлення, тоді як при її підвищенні спостерігається протилежна тенденція — їх зростання.

4.3. Енергетика перехідних процесів в електроприводах з ударним навантаженням при відхиленні напруги

При ударному характері навантаження момент статичних опорів робочої машини зазнає стрибкоподібної зміни від початкового значення $M_{\text{поч}}$ до нового сталого рівня M_c . В асинхронних електродвигунах такий перехідний процес відбувається на робочій ділянці механічної характеристики, яка, подібно до двигунів постійного струму незалежного та паралельного збудження, може бути з достатньою точністю апроксимована лінійною залежністю.

У цьому випадку кутова швидкість двигуна змінюється за наступним законом:

$$\omega = \omega_c (1 - e^{-t/T_m}) + \omega_{\text{поч}} e^{-t/T_m}. \quad (4.29)$$

Для визначення втрат енергії скористаємося формулою:

$$\Delta A_{\text{вс}} = \int_0^t M (\omega_0 - \omega) \, dt = \int_0^{t_n} M_c (\omega_0 - \omega) \, dt + J \left(\omega_0 (\omega_{\text{кін}} - \omega_{\text{поч}}) + \frac{\omega_{\text{кін}}^2 - \omega_{\text{поч}}^2}{2} \right). \quad (4.30)$$

Момент двигуна в початковий момент часу:

$$M_{\text{поч}} = \beta_o (\omega_0 - \omega_{\text{поч}}), \quad (4.31)$$

звідки кутова швидкість в даний момент часу становитиме:

$$\omega_{noch} = \omega_0 - \frac{M_{noch}}{\beta_\partial}. \quad (4.32)$$

Момент двигуна у кінцевий момент часу:

$$M_{noch} = \beta_\partial (\omega_0 - \omega_{кин}), \quad (4.33)$$

звідки кутова швидкість двигуна у даний момент часу визначиться за формулою:

$$\omega_{noch} = \omega_0 - \frac{M_{кин}}{\beta_\partial}. \quad (4.34)$$

Якщо вирази (4.32) і (4.34) підставити у формулу (4.30), то після перетворень отримаємо:

$$\Delta A_{vc} = \int_0^{t_{кин}} M_c (\omega_0 - \omega) dt + \frac{J}{2\beta_\partial^2} (M_{noch}^2 - M_{кин}^2). \quad (4.35)$$

Складову втрат енергії, викликану зміною навантаження, визначимо, підставивши у формулу (4.30) вираз для кутової швидкості (4.32):

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{кин}} M (\omega_0 - \omega) dt &= \int_0^{t_{кин}} M_c (\omega_0 - \omega_c (1 - e^{-t/T_m}) - \omega_{noch} e^{-t/T_m}) dt = \\ &= M_c \int_0^{t_{кин}} \left(\omega_0 - \left(\omega_0 - \frac{M_c}{\beta_\partial} \right) (1 - e^{-t/T_m}) - \omega_{noch} e^{-t/T_m} \right) dt. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Після перетворень отримаємо:

$$\int_0^{t_{кин}} M (\omega_0 - \omega) dt = \frac{M_c}{\beta_\partial} [M_c t_{кин} + T_m (M_{noch} - M_c) (1 - e^{-t_{кин}/T_m})]. \quad (4.37)$$

Тоді втрати енергії у асинхронному електроприводі складатимуть:

$$\Delta A_{vc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\frac{T_m}{2\beta_\partial} (M_{noch}^2 - M_c^2) + \frac{M_c^2}{\beta_\partial} t_{кин} + T_m \frac{M_c}{\beta_\partial} (M_{noch} - M_c) (1 - e^{-t_{кин}/T_m}) \right]. \quad (4.38)$$

.

При відхиленні напруги втрати енергії у асинхронному електроприводі при ударному навантаженні визначатимуться за формулою:

$$\Delta A_{vc} = \frac{1}{\beta_\partial U_*^4} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\frac{T_m}{2} (M_{noch}^2 - M_c^2) + M_c^2 t_{кин} + T_m M_c (M_{noch} - M_c) (1 - e^{-U_*^2 t_{кин}/T_m}) \right]. \quad (4.39)$$

Таким чином, втрати енергії у асинхронному електроприводі при ударному навантаженні обернено пропорційні напрузі у четвертій степені.

При зниженні напруги живлення зазначені показники мають тенденцію до зростання, тоді як при її підвищенні — спостерігається їх зменшення.

РОЗДІЛ 5

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИРОБНИЧИХ МАШИН

Для стрічкових і скребкових транспортерів, гноєприбиральних механізмів, а також вакуум-насосів характерно, що момент статичних опорів практично не залежить від кутової швидкості ($\chi = 0$), тоді як продуктивність таких машин є прямо пропорційною швидкості обертання робочих органів [19]. У зв'язку з цим

$$Q_* = \omega_* = \frac{\omega_0}{\omega_n} - \frac{M_{сн}}{\beta_0 \omega_n U_*^2}. \quad (5.1)$$

Таким чином, для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості, встановлено, що продуктивність змінюється обернено пропорційно квадрату напруги живлення та жорсткості механічної характеристики електродвигуна (рис. 5.1, 5.2).

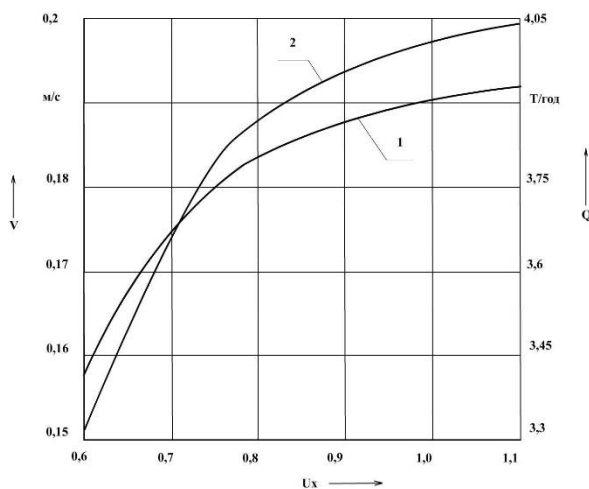


Рис. 5.1. Залежності швидкості руху скребоків (1) і продуктивності (2) гноєприбирального транспортера ТСН-2,0Б від напруги

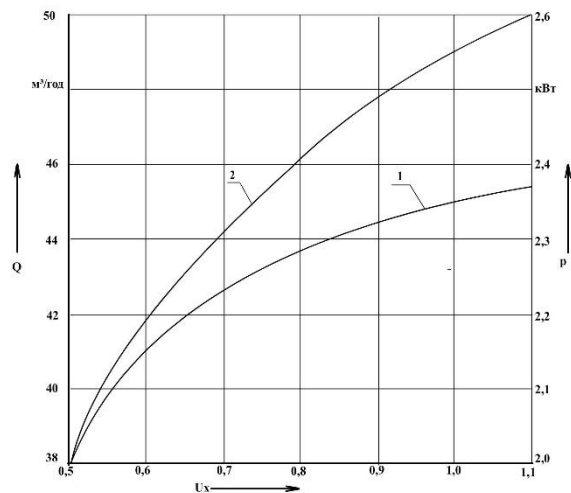


Рис. 5.2. Залежності продуктивності (1) і потужності (2) вакуум-насоса установки УВУ60/45 від напруги при вакуумі 53,32

Дослідження показують, що при підвищенні напруги живлення продуктивність гноєприбирального транспортера та вакуум-насоса зростає за нелінійним законом. Така залежність зумовлена тим, що зміна продуктивності визначається через кутову швидкість електродвигуна, яка, у свою чергу, є функцією рівня напруги живлення та характеристик механічного навантаження.

Отримані експериментальні результати свідчать, що зниження напруги на 20 % призводить до різкого падіння продуктивності зазначених механізмів — до рівня близько 3 % від номінального значення, що вказує на високу чутливість системи до якості електроживлення.

Для насосів і вентиляторних установок характерною є вентиляторна форма механічної характеристики [18, 19], що визначає специфіку зміни режимів роботи:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2. \quad (5.2)$$

У насосів і вентиляторів початковий момент не значний [20] і ним можна знехтувати. Тоді після перетворень отримаємо:

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 M_{\partial n} \omega_*^2 \omega_0 s_n}{M_{\partial n} (\omega_0 - \omega_n \omega_*)}} = \omega_* \sqrt{\frac{K_3 s_n}{1 - \omega_* (1 - s_n)}}. \quad (5.3)$$

Для насосних і вентиляторних установок встановлено такі узагальнені залежності: продуктивність є прямо пропорційною кутовій швидкості робочого органа, напір (тиск) змінюється пропорційно квадрату кутової швидкості, а споживана потужність — її кубу [19, 20]. Відповідно, закономірності зміни цих параметрів можуть бути представлені у вигляді:

для продуктивності —

$$U_* = Q_* \sqrt{\frac{K_3 s_n}{1 - Q_* (1 - s_n)}}, \quad (5.4)$$

тиску —

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 s_n p_*}{1 - \sqrt{p_*} (1 - s_n)}}, \quad (5.5)$$

потужності –

$$U_* = \sqrt[3]{P_*} \sqrt{\frac{K_3 s_n}{1 - \sqrt[3]{P_*} (1 - s_n)}} \quad (5.6)$$

Проведено експериментальні дослідження, спрямовані на визначення зміни продуктивності, тиску та споживаної потужності відцентрового насоса К8/18 і осьового вентилятора ВО-7,1М за умов відхилення напруги та частоти живлення. У ході експериментів регулювання напруги на електродвигуні здійснювали за допомогою автотрансформатора, а зміну частоти — із використанням частотного перетворювача фірми «Mitsubishi». При цьому фіксували кутову швидкість, продуктивність, тиск і електричну потужність відповідних робочих машин.

Аналіз отриманих результатів (рис. 5.5) свідчить, що при відхиленні напруги спостерігаються складні, нелінійні зміни продуктивності, тиску та потужності насосно-вентиляторних установок. При цьому найбільш чутливими до змін параметрів електроживлення виявилися осьові вентилятори ВО-7,1М, що працюють у складі електропривода з асинхронним двигуном АИРП80А6У2.

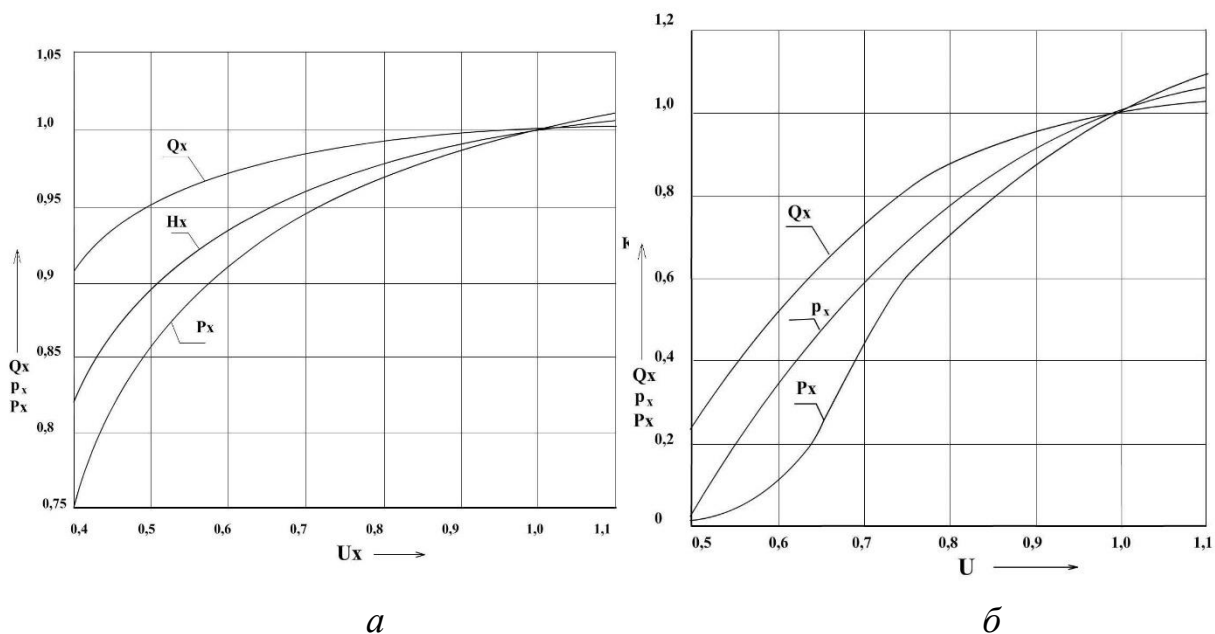
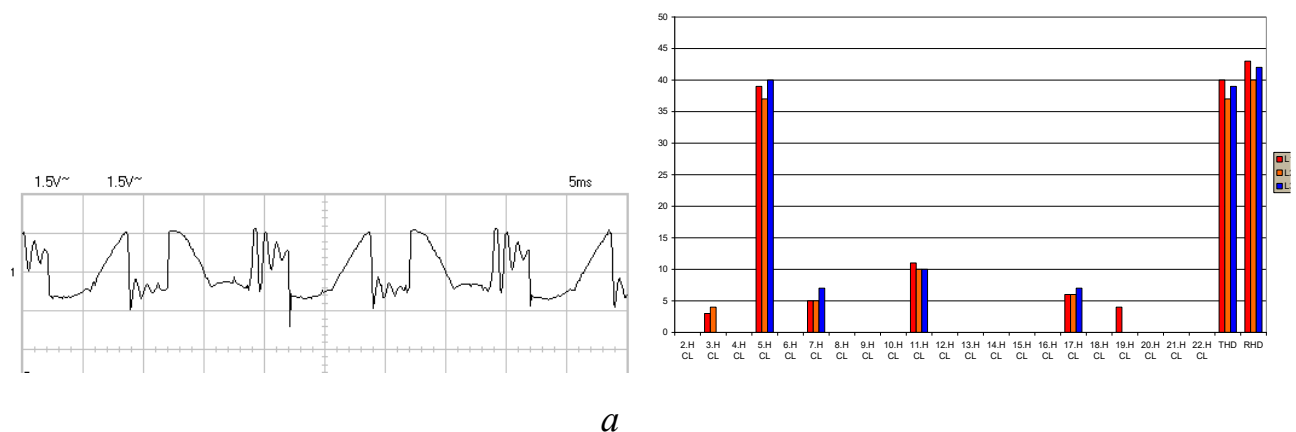


Рис. 5.5. Залежності продуктивності (Q), напору (H), тиску (p) і потужності (P) від напруги у відносних одиницях для насоса К8/18 (а) і вентилятора ВО-Ф-7,1М

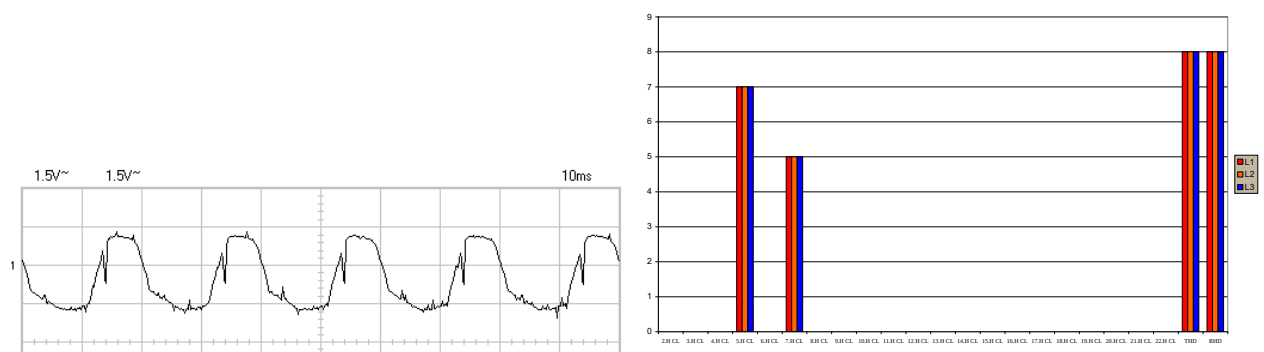
Вентиляційні установки «Климат-4М» отримують живлення від тиристорного перетворювача напруги станції керування «Кліматика-5» або від перетворювача частоти, при цьому вихідна напруга характеризується суттєвими несинусоїдальними спотвореннями.

Аналіз форми струму в мережі та результати його спектрального розкладу (рис. 5.6) свідчать, що склад гармонік залежить від рівня напруги живлення. Зокрема, при напрузі до 200 В у струмі присутні 5-а, 7-а, 11-а, 13-а, 17-а та 19-а гармонічні складові. У діапазоні 200–300 В спектр спрощується і містить 5-у, 7-у, 11-у та 13-у гармоніки, тоді як при напрузі понад 300 В залишаються переважно 5-а і 7-а гармоніки.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що зі збільшенням рівня напруги живлення спостерігається зменшення кількості вищих гармонічних складових у струмі.



a



б

Рис. 5.6. Крива струму та результати спектрального аналізу при живленні асинхронного електродвигуна від тиристорного перетворювача напруги:

$a - 160 \text{ В}$; $b - 380 \text{ В}$

Аналіз кривої струму в мережі при живленні електродвигуна від перетворювача частоти та результати спектрального аналізу (рис. 5.7) свідчать, що склад гармонічних складових суттєво залежить від частоти живлення. Зокрема, при частоті до 20 Гц у спектрі струму спостерігаються гармоніки в діапазоні від другої до дванадцятої. У проміжку 20–35 Гц наявні гармоніки з третьої по вісімнадцяту, а також двадцять перша складова. При частотах понад 35 Гц спектр суттєво звужується і включає переважно шістнадцяту та вісімнадцяту гармоніки.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що зі збільшенням частоти живлення спостерігається зменшення кількості вищих гармонічних складових у струмі мережі.

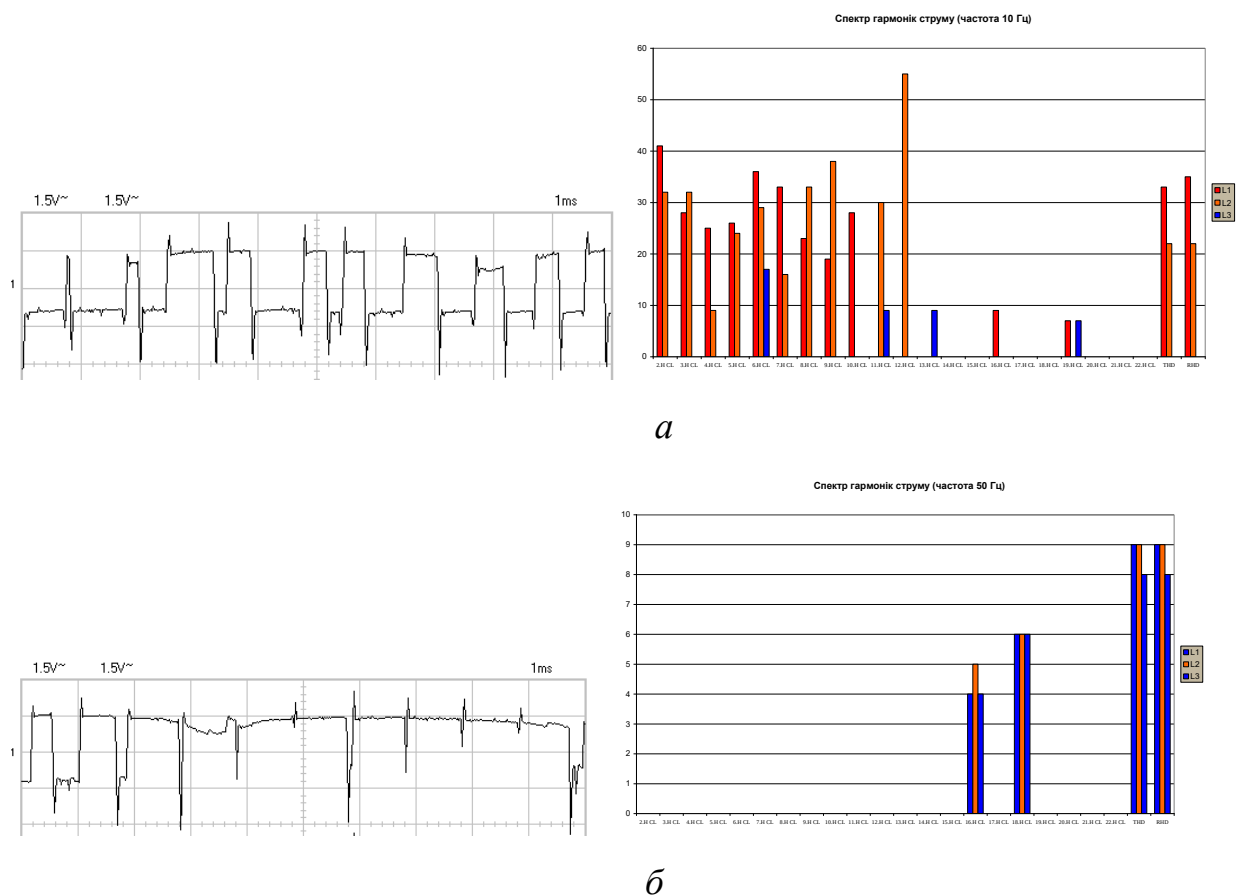


Рис. 5.7. Криві струму при живленні асинхронного електродвигуна від перетворювача частоти:

$a - 10 \text{ Гц}; b - 50 \text{ Гц}$

Встановлено, що при зниженні напруги на 20 % продуктивність насосів і вентиляторних установок зменшується до приблизно 3 % від номінального рівня, тоді як тиск становить близько 5 %, а споживана потужність — близько 9 %. При зміні частоти живлення на 2 % спостерігається відповідна зміна параметрів роботи: продуктивність коригується на 2 %, тиск — на 4 %, а потужність — на 6 %.

Окремі типи робочих машин, зокрема дробарки та змішувачі кормів, характеризуються нелінійною технологічною залежністю, що ускладнює аналіз їх режимів роботи.

З цією метою проведено експериментальні дослідження впливу відхилення напруги та частоти живлення на продуктивність, питому витрату енергії та модуль помелу молоткової дробарки КДУ-2 (у модифікованому виконанні). Результати показали, що продуктивність дробарки зменшується як при підвищенні, так і при зниженні напруги від номінального значення (рис. 5.8).

Крім того, встановлено, що при зниженні напруги питома витрата енергії зменшується, однак це супроводжується збільшенням модуля помелу. Навпаки, при підвищенні напруги зростає питома енергоємність процесу, що не забезпечує приросту продуктивності, а призводить лише до надмірного подрібнення матеріалу (рис. 5.9).

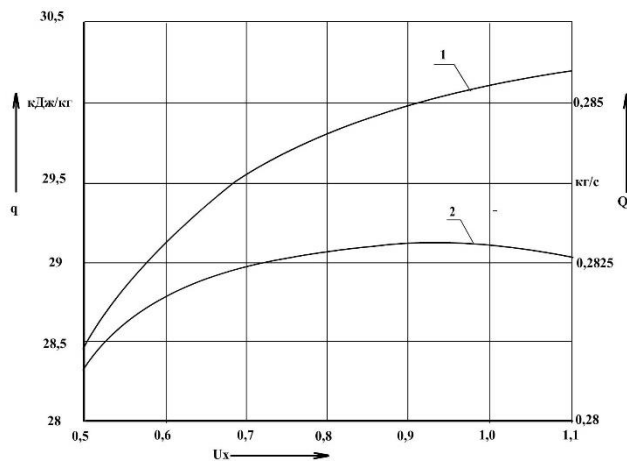


Рис. 5.8. Залежності питомої витрати енергії (1) та продуктивності (2) дробарки КДУ-2 від напруги для сіна конюшини

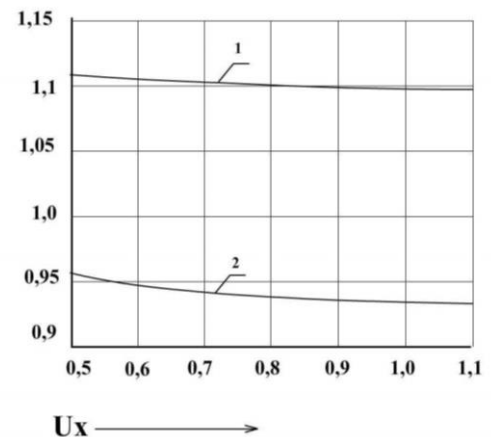


Рис. 5.9. Залежності модуля помелу дробарки від напруги: 1 – люпинове сіно; 2 – сіно конюшини

Таким чином, за результатами проведених досліджень встановлено, що при зниженні напруги на 20 % продуктивність дробарок зменшується до приблизно 2 %. При цьому спостерігається зниження питомих витрат енергії, а також зростання модуля помелу, що свідчить про зміну режиму подрібнення матеріалу.

Для норій та шнекових транспортерів характерною є залежність моменту статичних опорів від кутової швидкості зі спадним характером ($x = -1$) [19]. У цьому випадку...

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{ch} - M_0) / \omega_*}{\beta_o (\omega_0 - \omega_n \omega_*)}} = \sqrt{\frac{M_{ch} - M_0 (1 - \omega_*)}{\beta_o (\omega_0 \omega_* - \omega_n \omega_*^2)}}. \quad (5.7)$$

Якщо знехтувати початковим моментом ($M_0 \approx 0$), отримаємо:

$$U_* = \sqrt{\frac{K_3 s_n}{s \omega_*}} = \sqrt{\frac{K_3 s_n (1 - s_n)}{s (1 - s)}}. \quad (5.8)$$

Як впливає з виразу (5.12), зміна кутової швидкості машин із гіперболічною механічною характеристикою при коливаннях напруги живлення має складний нелінійний характер. Для таких умов характерною є підвищена чутливість до режиму навантаження.

При зниженні напруги в норій спостерігається зменшення продуктивності, тоді як момент статичних опорів зростає, що пояснюється збільшенням коефіцієнта заповнення ковшів (рис. 5.10).

У результаті проведених досліджень встановлено, що при зменшенні напруги на 20 % продуктивність норій знижується приблизно до 2 % від номінального значення.

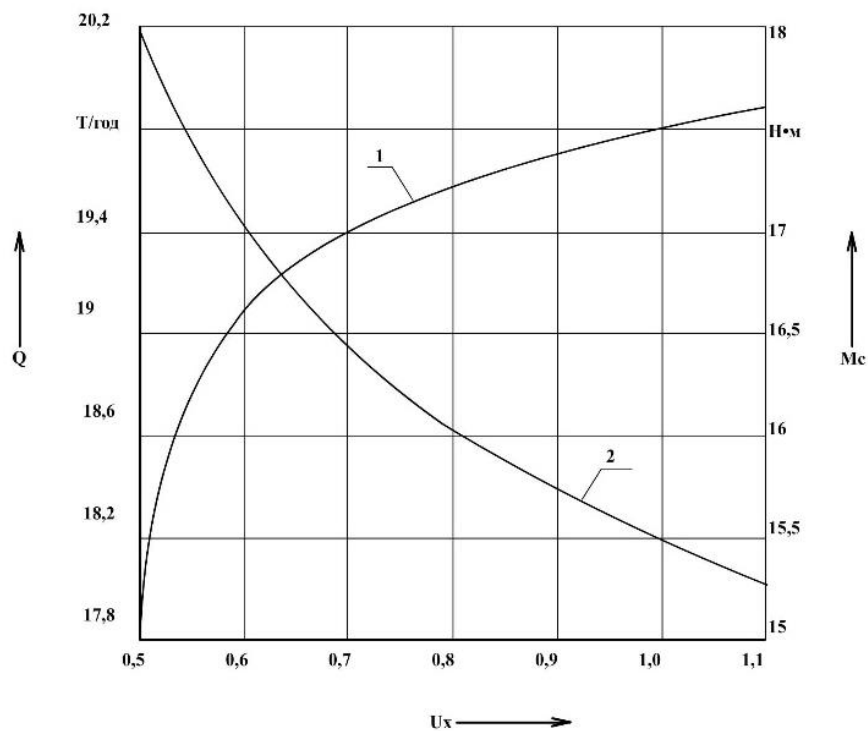


Рис. 5.10. Залежності продуктивності (1) і моменту статичних опорів (2) норії НЗ-20 від напруги

РОЗДІЛ 6

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Енергетичну ефективність електропривода виробничих машин в умовах відхилення та несиметрії напруги доцільно оцінювати за показником питомої витрати електричної енергії, який визначається за відповідною залежністю:

$$q = P_1 / Q, \quad (6.1)$$

де q – питома витрата електроенергії, кВт·год/м³; P_1 – потужність, споживана двигуном з мережі, кВт; Q – продуктивність, м³/год.

У відносних одиницях вираз (6.1) можна записати у вигляді:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2n} + \Delta P_{cn} + \Delta P_{vn}} \cdot \frac{Q_n}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{vn}(\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{vn})}{P_{2n} + \Delta P_{vn}(\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_n}{Q}, \quad (6.2)$$

де P_{2n} і P_2 – відповідно потужність на валу двигуна при номінальній і відмінній від номінальної напрузі, Вт; ΔP_{cn} і ΔP_c – постійні втрати, Вт; ΔP_{vn} і ΔP_v – змінні втрати, Вт; α – коефіцієнт втрат.

Для робочих машин із постійним моментом статичних опорів ($x = 0$), до яких належать стрічкові та скребкові транспортери, а також вакуум-насоси, характерним є прямопропорційний зв'язок між кутовою швидкістю, продуктивністю та споживаною потужністю.

У подальших перетвореннях, розділивши чисельник і знаменник виразу (6.2) на P_{vn} та враховуючи, що:

$$P_2 / P_{2n} = M_c \omega / M_c \omega_n = \omega_*, \quad (6.3)$$

$$\Delta P_n = P_{2n} \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} = \Delta P_{vn} (\alpha_n + 1), \quad (6.4)$$

де η_n – ККД двигуна при номінальній напрузі,

отримаємо

$$q_* = \frac{\omega_* + \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \cdot \frac{(\alpha + 1 / U_*^2)}{(\alpha_n + 1)}}{\omega_* \left(1 + \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right)} = \eta_n + \frac{1 - \eta_n}{(\alpha_n + 1)} \cdot \frac{(\alpha + 1 / U_*^2)}{Q_*}. \quad (6.5)$$

Таким чином, при зниженні напруги живлення спостерігається збільшення питомої витрати електроенергії в електроприводах машин із незмінним моментом статичних опорів, тоді як підвищення напруги, навпаки, призводить до незначного її зменшення.

Для робочих машин із вентиляторною механічною характеристикою ($x = 2$), до яких належать насоси та вентилятори, початковим моментом можна знехтувати через його відносно малу величину. У цьому випадку вираз для ковзання електродвигуна набуває вигляду:

$$s = \frac{K_s s_n \omega_*^2}{U_*^2}. \quad (6.6)$$

З урахуванням (6.6) змінні втрати потужності

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \beta_o U_*^2 \omega_*^2 s^2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \frac{\beta_o \omega_*^2 K_s^2 s_n^2 \omega_*^4}{U_*^4}, \quad (6.7)$$

або

$$\Delta P_v = \Delta P_{vH} \omega_*^4 / U_*^4. \quad (6.8)$$

У вентилятора та насоса продуктивність прямо пропорційна кутовій швидкості

$$Q = Q_H \omega_*, \quad (6.9)$$

а потужність пропорційна кубу кутової швидкості:

$$P_2 = P_{2H} \omega_*^3. \quad (6.10)$$

Тоді після перетворень вираз (6.2) матиме вигляд:

$$q_* = \eta_H Q_*^2 + \frac{1 - \eta_H}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{(\alpha U_*^2 + Q_*^4 / U_*^4)}{Q_*}. \quad (6.11)$$

Із залежності (6.11) випливає, що для машин із вентиляторною механічною характеристикою зниження напруги живлення призводить до збільшення питомої витрати електроенергії, тоді як її підвищення забезпечує лише незначне зменшення цього показника (рис. 6.1).

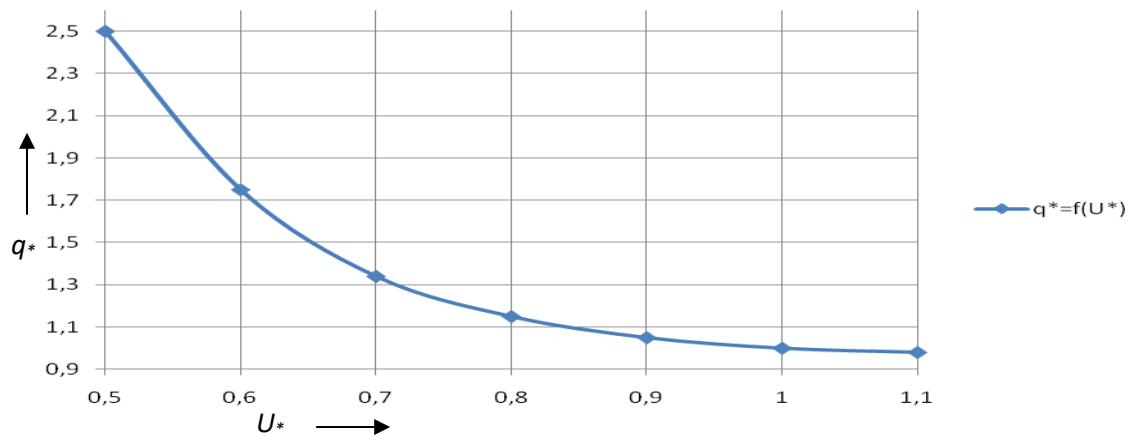


Рис. 6.1. Залежність питомої витрати електроенергії вентиляційних установок від напруги

Для машин із гіперболічною механічною характеристикою ($x = -1$), до яких належать ковшові та шнекові транспортери, а також легкі й середні металообробні верстати, характерним є режим роботи з відносно сталою потужністю.

У цьому випадку вираз для питомої витрати електроенергії для зазначеної групи машин може бути отриманий шляхом нормування вихідного співвідношення (6.2) на $P_{2н}$ з урахуванням залежності (6.4):

$$q_* = \frac{1 + \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \cdot \frac{(\alpha U_*^2 + 1)}{(\alpha + 1)}}{Q_* \left(1 + \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right)} = \frac{\eta_n}{Q_*} + \frac{1 - \eta_n}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{(\alpha U_*^2 + 1)}{Q_*}. \quad (6.12)$$

Із залежності (6.12) випливає, що для ковшових і шнекових транспортерів питома витрата електроенергії має тенденцію до зростання при відхиленні напруги живлення від номінального значення.

Лабораторні дослідження впливу відхилення напруги на енергетичні показники робочих машин виконувалися на експериментальній установці, створеній на базі універсальної молоткової дробарки КДУ-2, конструкція якої була доопрацьована з метою забезпечення можливості регулювання досліджуваних параметрів у заданих межах. Як робочий матеріал використовували сіно конюшини та люпину.

Отримані експериментальні залежності питомої витрати енергії та продуктивності дробарки від рівня напруги для сіна конюшини наведено на рис. 6.2, а для люпинового сіна — на рис. 6.3.

Аналіз результатів показав, що продуктивність дробарки зменшується як при підвищенні, так і при зниженні напруги від номінального значення. При цьому зниження напруги супроводжується зменшенням питомих витрат енергії, але одночасно призводить до збільшення модуля помелу. Навпаки, при підвищенні напруги спостерігається зростання питомої енергоємності процесу, однак це не забезпечує підвищення продуктивності та суттєвого покращення ступеня подрібнення, а лише викликає надмірне перетирання матеріалу.

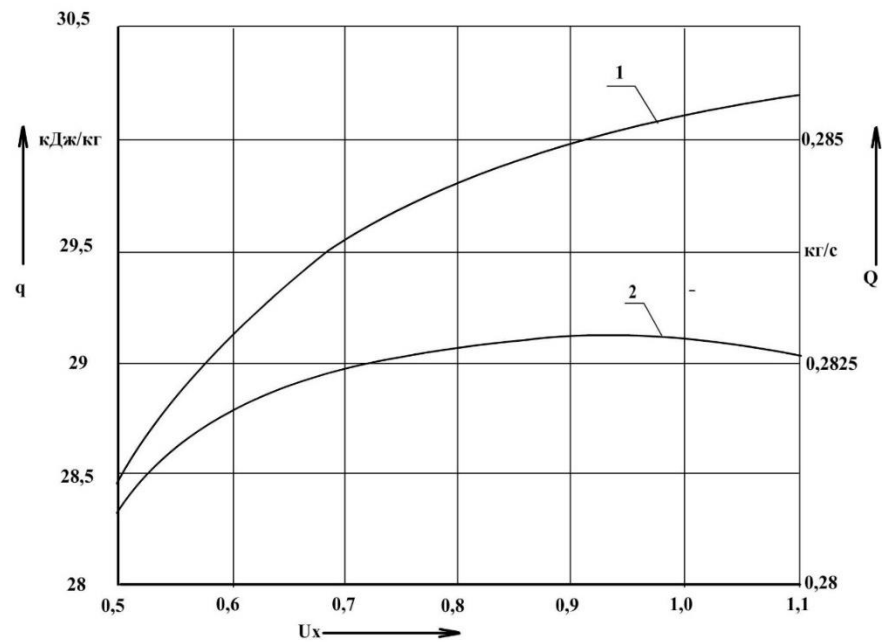


Рис. 6.2. Залежності питомих витрат енергії (1) та продуктивності (2) дробарки КДУ-2 від напруги для сіна конюшини

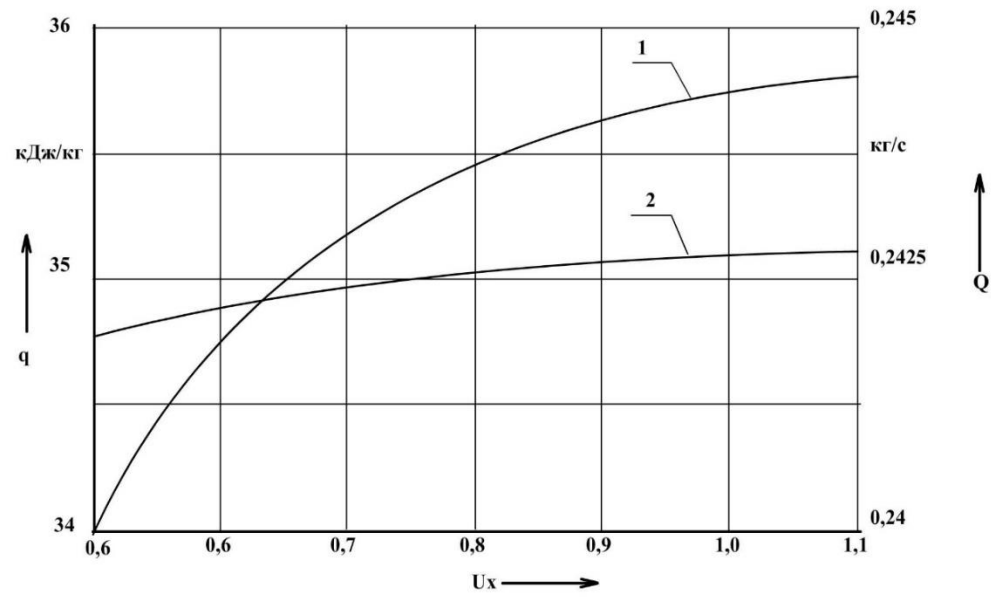


Рис. 6.3 Залежності питомих витрат енергії (1) та продуктивності (2) дробарки КДУ-2 від напруги для люпінового сіна

РОЗДІЛ 7

ВИЗНАЧЕННЯ ЗБИТКУ ВІД ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ

Відхилення показників якості електроенергії від встановлених нормативних значень призводить до комплексу негативних наслідків. Зокрема, виникають економічні втрати через порушення нормального перебігу технологічних процесів, скорочується ресурс електрообладнання, зростають втрати та витрати електроенергії, а також підвищується ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

Економічні збитки, зумовлені недостатньою якістю електричної енергії, умовно поділяються на дві основні складові: електромагнітну та технологічну. Електромагнітна складова переважно пов'язана зі збільшенням втрат активної потужності та прискореним старінням ізоляції електрообладнання, що призводить до скорочення терміну його служби. Технологічна складова відображає вплив якості електроенергії на продуктивність виробничих установок, продуктивність тваринництва, врожайність сільськогосподарських культур та собівартість продукції.

Розмір збитків у сільськогосподарському виробництві, спричинених раптовими перервами електропостачання, визначається тривалістю та моментом відключення в технологічному циклі, кліматичними умовами, а також прийнятою технологією виробництва, рівнем продуктивності тварин і врожайності культур.

Технологічні втрати, пов'язані з використанням електроприводів за умов неякісного електроживлення, включають:

- зниження продуктивності технологічних машин;
- зменшення продуктивності тварин і птиці;
- втрати, пов'язані із захворюваннями, загибеллю та передчасним вибракуванням тварин;
- зниження врожайності та втрати культур у захищеному ґрунті;
- збільшення втрат під час зберігання продукції;

- псування сировини та готової продукції;
- випуск продукції з пониженими якісними характеристиками.

Залежно від цілей аналізу та доступності вихідних даних розрізняють фактичні збитки та математичне очікування збитків. Фактичні збитки визначаються за даними підприємства при наявності достовірної інформації щодо обсягів втраченої продукції. Математичне очікування збитків застосовується у випадках відсутності повних даних, а також при проектуванні систем електропостачання з урахуванням надійності.

Фактичні збитки від живлення електроприводів сільськогосподарських машин електроенергією низької якості (Зел.пост, грн) з урахуванням рекомендацій [24, 25] можуть бути визначені за формулою:

$$Z_{\text{ел.пост}} = Z_{\text{прод маш}} + Z_{\text{с.г.прод}} + Z_{\text{втр}} + Z_{\text{загиб}} + Z_{\text{хвор}} + Z_{\text{акт}} + Z_{\text{реак}} + Z_{\text{служ}} + Z_{\text{робіт}} - Z_w \quad (7.1)$$

де: $Z_{\text{прод маш}}$ — складова збитків, зумовлена зменшенням продуктивності робочих машин;

$Z_{\text{с.г.прод}}$ — втрати, пов'язані з недоотриманням сільськогосподарської продукції;

$Z_{\text{втр}}$ — збитки, що виникають унаслідок псування, безповоротних втрат сировини, напівфабрикатів і готової продукції, а також випуску продукції з пониженими якісними показниками;

$Z_{\text{загиб}}$ — втрати, спричинені загибеллю тварин або рослинних культур;

$Z_{\text{хвар}}$ — збитки, пов'язані із захворюваннями, а також передчасним вибракуванням тварин;

$Z_{\text{акт}}$ — втрати, обумовлені зміною споживання активної потужності;

$Z_{\text{реак}}$ — втрати, пов'язані зі зміною споживання реактивної потужності;

$Z_{\text{служ}}$ — втрати, спричинені скороченням строку служби електродвигунів;

$Z_{\text{робіт}}$ — додаткові витрати на оплату праці основних та тимчасово залучених працівників;

Z_w — зменшення загальних збитків на величину вартості електроенергії, яка не була спожита під час перерви в електропостачанні.

Збитки, обумовлені зниженням продуктивності робочої машини (Зпрод маш), визначаються за наступною залежністю:

$$З_{прод маш} = Q_n(1 - Q^*) Ц \cdot t, \quad (7.2)$$

де Q_n – номінальна продуктивність робочої машини;

Q^* – продуктивність робочої машини при відхиленні показника якості електроенергії у відносних одиницях;

$Ц$ – ціна одиниці продукції, яка випускається даним механізмом;

t – час, за який визначаються збитки.

Збитки, пов'язані з недовипуском сільськогосподарської продукції ($З_{с.г.прод}$), визначаються на основі обсягу фактично недоотриманої продукції за досліджуваний період.

$$З_{с.г.прод} = Ц \cdot \Delta П, \quad (7.3)$$

де $Ц$ – закупівельна ціна одиниці продукції (м'яса, молока, овочів тощо);

$\Delta П$ – об'єм фактично недоотриманої продукції.

При отриманні продукції зниженої якості $З_{втр}$, яка може бути реалізована за нижчою ціною, збитки виникають із-за зниження закупівельних цін:

$$З_{втр} = П_3(Ц - Ц_3), \quad (7.4)$$

де $П_3$ – об'єм випущеної неповноцінної продукції, натуральних одиниць;

$Ц_3$ – закупівельна ціна продукції зниженої якості.

Збитки при вибракуванні тварин $З_{втвар}$ включають недоотриманий прибуток від реалізації продукції майбутніх періодів

$$З_{втвар} = \sum (Ц - C) \cdot П_{ni2}, \quad (7.5)$$

а у разі їх загибелі збитки складаються з вартості фактично втраченої продукції і недоотриманої продукції майбутніх періодів

$$З_{загиб тв} = \sum Ц_i П_{ni1} + (Ц - C) П_{ni2}, \quad (7.6)$$

де $П_{ni1}$ – об'єм продукції, отриманої до моменту загибелі тварин i -ї вікової групи (вага тварини на відгодівлі), натуральних одиниць;

$П_{ni2}$ – об'єм недоотриманої продукції майбутніх періодів від загиблих або вибракованих тварин i -ї вікової групи, натуральних одиниць.;

C_i - ціна продукції, отриманої від тварин i -ї вікової групи, грн;

C – собівартість виробництва повноцінної продукції, грн.

Збитки із-за загибелі рослин $Z_{\text{загиб росл}}$ дорівнюють вартості недоотриманої продукції

$$Z_{\text{загиб росл}} = \sum C_k \cdot P_{nk} \cdot S_k, \quad (7.7)$$

де C_k – ціна повноцінної k -ї культури, грн.;

P_{nk} – об'єм недоотриманої продукції з 1 м² із-за загибелі k -ї культури, натуральних одиниць.;

S_k – площа, що стала вільною із-за загибелі k -ї культури, м².

Втрати від зміни споживання електроприводом активної потужності $Z_{\text{акт}}$ визначають за формулою:

$$Z_{\text{акт}} = (\Delta P - \Delta P_n) b_e \cdot t, \quad (7.8)$$

де: ΔP — втрати активної потужності в електродвигуні при відхиленні показників якості електроенергії від номінальних значень;

ΔP_n — втрати активної потужності в електродвигуні за номінальних значень показників якості електроенергії;

b_e — тариф на електричну енергію, грн/кВт·год.

Розрахункові залежності для визначення втрат активної потужності в електродвигунах наведено у відповідному розділі роботи.

Додаткові втрати потужності, зумовлені наявністю вищих гармонічних складових струму I_v , визначаються за наступним виразом:

$$\Delta P_v = 3I_v^2 (R_1 + R_2'), \quad (7.9)$$

де R_1 – активний опір обмотки статора; R_2' – активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора при $f_2 \approx n f_1$.

Додатковий струм, створений гармонічною складовою, складе:

$$I_v = \frac{U_v}{U_{1H}} \frac{I_{1K3}}{v}, \quad (7.10)$$

де U_v – v -я гармоніка напруги; I_{1K3} – струм короткого замикання:

$$I_{1кз} \approx \frac{U_{1н}}{x_k}, \quad (7.11)$$

де $x_k = x_1 + x_2'$.

Загальні додаткові електричні втрати в обмотках машини отримаємо, підсумувавши втрати ΔP_v від всіх гармонік струму

Втрати від зміни споживання електроприводом реактивної потужності $З_{реак}$

$$З_{реак} = (Q - Q_n) b_e \cdot t \cdot k_{зв}, \quad (7.12)$$

де: Q — реактивна потужність, що споживається електродвигуном при відхиленні показників якості електроенергії від номінальних значень;

Q_n — реактивна потужність електродвигуна за номінальних умов якості електроенергії;

b_e — тариф на електричну енергію, грн/кВт·год;

$k_{зв}$ — коефіцієнт, що характеризує зміну втрат, кВт/кВАр.

У розрахунках допускається припущення, що кожен відсоток підвищення напруги супроводжується збільшенням споживання реактивної потужності електродвигуна приблизно на 3 %.

Втрати, пов'язані зі зміною строку служби електродвигуна ($З_{служ}$), визначаються за наступною залежністю:

$$З_{служ} = 1,2 \cdot k_n \cdot Ц_d (R - 1), \quad (7.13)$$

де: 1,2 — коефіцієнт, що враховує додаткові витрати, пов'язані з монтажем і демонтажем обладнання; k_n — коефіцієнт приведення преїскурантних цін до рівня поточних (сучасних) цін; $Ц_d$ — преїскурантна вартість електродвигуна; R — коефіцієнт, який враховує вплив величини та знака відхилення напруги, а також ступеня завантаження електродвигуна.

$$R = (1 + 47\delta U^2 - 7,55\delta U) m^2 \text{ при } -0,2 \leq \delta U < 0, \quad (7.14)$$

$$R = m^2 \text{ при } 0 < \delta U \leq 0,2, \quad (7.15)$$

де m — коефіцієнт завантаження двигуна.

Вартість невитраченої за час перерви електроенергії $З_w$, грн

$$Z_w = b_e W\tau,$$

де W – середньогодинне споживання електроенергії, кВт год;

τ – тривалість перерви в електропостачанні, годин.

Зміни технічних характеристик електроприймачів унаслідок відхилення показників якості електроенергії від нормативних значень призводять до варіації параметрів зовнішнього середовища, що безпосередньо формуються роботою цих електроприймачів. До таких факторів належать освітленість, температура та вологість повітря у тваринницьких приміщеннях і тепличних комплексах, температура питної води, рівень освітлення в приміщеннях, а також інтенсивність ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання і параметри електрообігріву.

Результати біологічних досліджень, виконаних різними авторами, підтверджують, що зазначені фактори зовнішнього середовища суттєво впливають на фізіологічний стан тварин і рослин, змінюючи їх продуктивність та загальний стан розвитку.

Узагальнено погіршення зоотехнічних та агротехнічних показників виробництва, виражене у вартісному еквіваленті, формує технологічну складову збитків.

Технологічна складова збитків, зумовлена відхиленням показників якості електроенергії, включає дві основні компоненти: втрати від зниження продуктивності тварин і втрати, пов'язані з перевитратою кормових ресурсів:

$$Z_{с.г.прод} = Z_{прод} + Z_{корм.} \quad (7.17)$$

де $Z_{прод}$ - збиток від зниження продуктивності тварин або врожайності рослин;
 $Z_{корм.}$ - збиток від зміни витрати кормів тваринами при відхиленні показників якості електроенергії на затисках технологічного устаткування.

Обидві складові технологічної частини збитків визначаються через обсяг недоотриманої продукції, зміну коефіцієнта її збереження, а також коригування витрат кормових ресурсів у процесі утримання тварин. Таким чином, економічні втрати від зниження продуктивності тварин або врожайності рослин унаслідок

відхилення показників якості електроенергії на затискачах технологічного обладнання визначаються за формулою (3), тоді як втрати, пов'язані з перевитратою кормів при порушенні технологічного режиму, оцінюються аналогічним підходом:

$$Z_{\text{корм}} = C_k \cdot \Delta K, \quad (7.18)$$

де C_k - ціна 1 ц кормової одиниці, грн/ц; ΔK - перевитрата кормів тваринами при порушенні технологічного процесу вирощування і відгодівлі тварин при відхиленні показника якості електроенергії, ц к.о.

Для коректного визначення технологічної складової збитків необхідно мати аналітичні залежності, що описують зміну продуктивності тварин або врожайності сільськогосподарських культур від показників якості електроенергії для конкретних технологічних процесів.

З цією метою у ВІЕСГ під керівництвом С.П. Кучера було проведено аналіз та узагальнення результатів відповідних біологічних досліджень. На основі отриманих даних побудовано усереднені залежності, що відображають зміну зоотехнічних показників виробництва під впливом зовнішніх факторів. Такі залежності апроксимовано поліноміальними функціями загального вигляду [4]:

$$P(\Phi) = a_0 \Phi^2 + a_1 \Phi + a_2, \quad (7.19)$$

де Φ – зовнішній фактор, залежний від якості роботи електрифікованого технологічного устаткування.

Зміна зоотехнічного показника або врожайності сільськогосподарських культур пов'язана із зміною зовнішніх факторів залежністю:

$$\Delta P(\Phi) = a_0 (\Delta \Phi)^2. \quad (7.20)$$

Значення коефіцієнта a_0 для окремих технологічних процесів наведені в таблиці 1.

Встановивши залежність зовнішнього фактору від відповідного показника якості електроенергії, можна отримати аналітичні вирази, що описують зміну продуктивності тварин і врожайності сільськогосподарських культур при

відхиленні параметрів електроживлення від номінальних значень, а також оцінити відповідні технологічні втрати.

Серед основних чинників, що визначають продуктивність молодняку тварин, птиці та рослин, ключове місце займає мікроклімат у виробничих приміщеннях.

У зимових тепличних комплексах підтримання необхідного температурного режиму здійснюється за допомогою трубної системи обігріву, де теплоносії подається циркуляційними насосами. Залежність температури повітря в теплиці від подачі насоса може бути описана таким рівнянням:

$$\theta_{\text{в}} = \theta_{\text{з}} + \frac{c_m \Delta t}{3600 \cdot KF \eta_{\text{огр}} \eta_{\text{інф}}} Q, \quad (7.21)$$

де $\theta_{\text{в}}$ – температура повітря всередині теплиці; $\theta_{\text{з}}$ – температура зовнішнього повітря; c_m – питома теплоємність води, кДж/кг·°C; Δt – різниця температури теплоносія; K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·°C); F – площа теплиці, м²; $\eta_{\text{огр}}$ – коефіцієнт огороження; $\eta_{\text{інф}}$ – коефіцієнт інфільтрації; Q – витрата теплоносія, м³/год.

Зміна продуктивності насоса викличе зміну температури в теплиці:

$$\Delta \theta_{\text{в}} = \frac{c_m \Delta t}{KF \eta_{\text{огр}} \eta_{\text{інф}}} \Delta Q, \quad (7.22)$$

або

$$\Delta \theta_{\text{в}} = \frac{c_m \Delta t Q_{\text{н}}}{KF \eta_{\text{огр}} \eta_{\text{інф}}} (1 - Q_*). \quad (7.23)$$

У тваринницьких приміщеннях формування необхідного мікроклімату забезпечується за рахунок роботи вентиляційних установок. При цьому температурний режим повітря в приміщенні є функцією продуктивності вентиляторного обладнання і може бути описаний наступним рівнянням:

$$\theta_{\text{в}} = \theta_{\text{з}} + \frac{q_m n}{C_v Q + q_0 V}, \quad (7.24)$$

де q_m – кількість вільної теплоти, що виділяється однією твариною чи птицею середньої для даного приміщення маси, кДж/год; n – кількість тварин або птиці у приміщенні, голів; C_v – питома об'ємна теплоємність повітря, кДж/(м³·град); Q – продуктивність, м³/год; q_0 – теплова характеристика приміщення, кДж/м³·град·год; V – об'єм будівлі, м³.

Так як при зміні показників якості електроенергії продуктивність вентилятора змінюється в невеликих межах, то можна вважати, що

$$\Delta\theta_{\epsilon} = \frac{\partial\theta_{\epsilon}}{\partial Q} \Delta Q. \quad (7.25)$$

Тоді

$$\Delta\theta_{\epsilon} = -\frac{C_v q_m n}{(C_v Q_n + q_0 V)^2} \Delta Q, \quad (7.26)$$

або

$$\Delta\theta_{\epsilon} = -\frac{C_v Q_n q_m n}{(C_v Q_n + q_0 V)^2} (1 - Q_*). \quad (7.27)$$

В овочесховищах для забезпечення стабільних технологічних умов зберігання продукції застосовуються вентиляційні установки, що дозволяють підтримувати необхідні параметри мікроклімату. У цьому випадку температура повітря в сховищі залежить від продуктивності вентиляторного обладнання і може бути описана наступним рівнянням:

$$\theta_{\epsilon} = \theta_3 + \frac{q_{np} \cdot m_{np} - Q_{ог}}{C_v Q}, \quad (7.28)$$

де q_{np} – тепловіддача картоплі, кДж/год·т; m_{np} – маса картоплі, т; $Q_{ог}$ – витрати теплоти через зовнішні огорожі, кДж/год.

Тоді

$$\Delta\theta_{\epsilon} = -\frac{q_{np} \cdot m_{np} - Q_{ог}}{C_v Q_n^2} \Delta Q, \quad (7.29)$$

або

$$\Delta\theta_{\epsilon} = -\frac{q_{np} \cdot m_{np} - Q_{oz}}{C_v Q_n} (1 - Q_*). \quad (7.30)$$

На основі отриманих аналітичних залежностей можна зробити висновок, що для установок штучного мікроклімату за умов відхилення показників якості електроенергії від номінальних значень виконується наступне співвідношення:

$$\Delta\Phi = b\Delta Q_n = bQ_n(1 - Q_*). \quad (7.31)$$

Значення коефіцієнта b для окремих типів сільськогосподарських приміщень, обладнаних системами штучного мікроклімату, наведено в таблиці 7.1.

Враховуючи співвідношення (20), залежність зміни продуктивності тварин або врожайності сільськогосподарських культур у загальному вигляді може бути представлена наступним чином:

$$\Delta\Pi = a_0 b^2 Q_n^2 (1 - Q_*)^2, \quad (7.32)$$

або

$$\Delta\Pi = a(1 - Q_*)^2. \quad (7.33)$$

Значення коефіцієнта a , що використовується для оцінювання технологічної складової збитків при відхиленні показників якості електроенергії від номінальних значень, наведено в таблиці 7.1.

Використовуючи аналітичні залежності зміни продуктивності робочих машин при відхиленні показників якості електроенергії, а також співвідношення (7.33), отримано відповідні залежності зміни продуктивності сільськогосподарських тварин, які представлені на рис. 7.1 та 7.2.

Отримані результати дозволяють кількісно оцінити ступінь впливу відхилення параметрів електроживлення на технологічні показники сільськогосподарського виробництва. Це дає можливість обґрунтовано визначати рівень технологічних втрат та формувати заходи щодо підвищення ефективності електроприводів у системах агропромислового комплексу.

Значення коефіцієнтів для розрахунку технологічної складової збитку при відхиленні показників якості електроенергії від номінального значення

Технологічна характеристика виробництва	Коефіцієнт a_0	Виробничий об'єкт з установками штучного мікроклімату	Коефіцієнт b	Коефіцієнт a
Молочна продуктивність корів	-0,03	Корівник на 400 голів	1,4	-50,18
Приріст маси телят	-0,3	Телятник	0,9	-207,5
Приріст маси свиней	-0,3	Свинарник-відгодівельник	1,5	-575,5
Яйценоскість кур	-0,12	Пташник на 10 тис. голів	0,8	-65,7
Споживання кормів свинями	0,7	Свинарник-відгодівельник	1,5	1342,9
Споживання кормів телятами	0,7	Телятник	0,9	484,2
Урожайність овочевих культур	-1,17	Зимова телиця площею 1 га	1,05	-46286,6
Збереженість овочів у овочесховищі	-0,89	Картоплесховище на 5 тис. т	4,72	-107,6

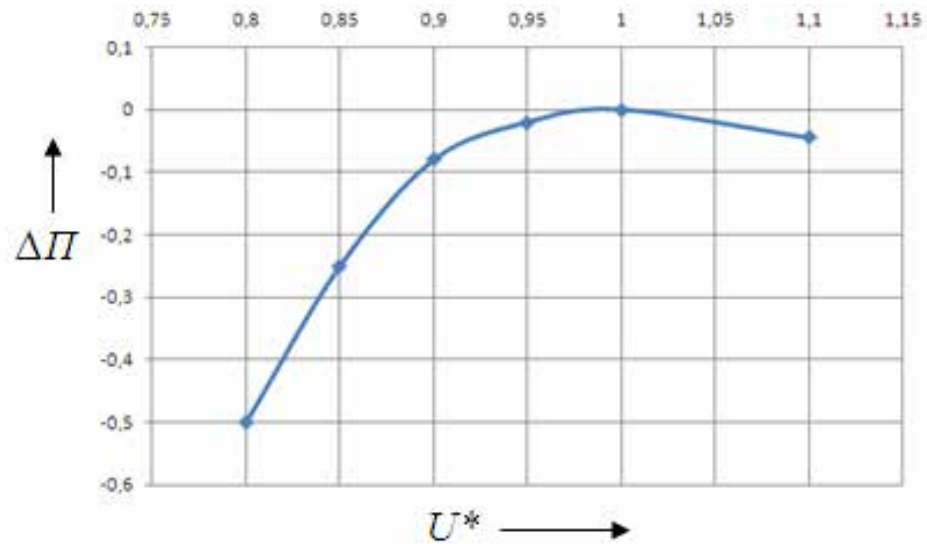


Рис. 7.1. Зміна продуктивності корів ($\Delta \Pi$) при відхиленні напруги в установках штучного мікроклімату

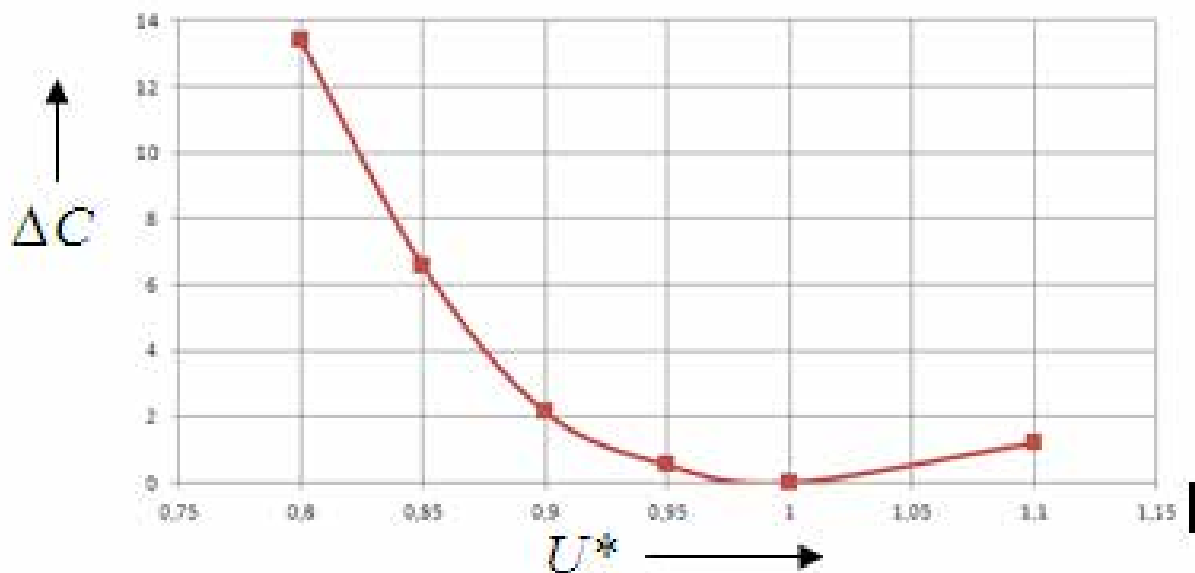


Рис. 7.2. Зміна споживання кормів (ΔC) коровами при відхиленні напруги в установках штучного мікроклімату

Встановлено, що при зниженні напруги на 20 % на затискачах електродвигунів установок штучного мікроклімату спостерігається зменшення приросту маси тварин: для свиней — на 5,8 %, для телят — на 2,1 %, молочної продуктивності корів — на 0,5 %, а яйценосності курей — на 0,65 %. Одночасно

фіксується збільшення витрат кормів: для телят — на 4,8 %, для свиней — на 13,4 %.

У рослинництві аналогічні зміни проявляються у зниженні врожайності овочевих культур у зимових теплицях на 4,6 %, а також у зменшенні збереженості картоплі в картоплесховищах на 1,1 %.

При цьому підвищення напруги викликає значно менші технологічні втрати порівняно зі зниженням. Водночас встановлено, що існуючі відхилення частоти живлення в електричних мережах не призводять до суттєвих технологічних втрат, які не перевищують 0,2 %.

ВИСНОВКИ

1. Відхилення напруги від нормативних значень спричиняють комплекс економічних втрат, пов'язаних зі зниженням продуктивності технологічних машин, скороченням ресурсу електрообладнання, а також зростанням споживання та втрат електроенергії.

2. Зміна рівня напруги впливає на електромеханічні параметри асинхронних двигунів, зокрема на момент, частоту обертання, коефіцієнт потужності, а також інтенсивність старіння і зносу ізоляційних матеріалів.

3. В електроприводах відхилення напруги призводить до зміни кутової швидкості двигуна, що безпосередньо визначає продуктивність робочої машини. Характер цієї зміни залежить від жорсткості механічної характеристики двигуна та показника степеня механічної характеристики робочого органа. Загалом процес зміни кутової швидкості має нелінійний характер; для електродвигунів, що приводять машини з постійним моментом опору, ковзання змінюється обернено пропорційно квадрату напруги.

4. Відхилення напруги істотно впливають на динамічні процеси в асинхронному електроприводі. Тривалість перехідних режимів і електромеханічна стала часу зростають при зниженні напруги за квадратичним законом. Це призводить до збільшення часу пуску та відповідного зростання енергетичних втрат.

5. Сучасні регульовані електроприводи з тиристорними перетворювачами напруги та перетворювачами частоти додатково погіршують якість електроенергії, викликаючи спотворення форми кривої напруги живлячої мережі.

6. Зміна рівня напруги впливає на продуктивність технологічних машин, причому характер цієї залежності визначається як механічною характеристикою робочого органа, так і жорсткістю електромеханічної характеристики двигуна.

7. Встановлено технологічну складову збитків при відхиленні напруги: при зниженні напруги на 20 % продуктивність дробарок і норій зменшується до 2 %, вакуум-насосів і гноєприбиральних транспортерів — до 3 %, насосів і вентиляторів — також до 3 %. Одночасно питома витрата електроенергії для дробарок знижується до 5 %, тоді як модуль помелу зростає до 2 %.

8. Відхилення напруги змінюють питому витрату електроенергії, величина якої залежить від типу механічної характеристики робочої машини. При зниженні напруги на 20 % питомі витрати зростають: для транспортерів — на 11 %, вентиляторів — на 15 %, насосів — на 12 %, тоді як для норій — лише на 0,5 %.

9. Для установок штучного мікроклімату встановлено, що при зниженні напруги на 20 % приріст маси свиней зменшується на 5,8 %, телят — на 2,1 %, молочна продуктивність корів — на 0,5 %, а яйценосність курей — на 0,65 %. Одночасно спостерігається збільшення витрат кормів: для телят — на 4,8 %, для свиней — на 13,4 %. Урожайність овочевих культур у зимових теплицях зменшується на 4,6 %, а збереженість картоплі — на 1,1 %. При цьому вплив відхилень частоти струму є незначним і не перевищує 0,2 % технологічних втрат.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ : УкрНДНЦ, 2016. – 16 с.
2. ГОСТ 13109-97. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. – Москва : Госстандарт, 1997.
3. EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. – CENELEC.
4. Войтюк Д. Г., Лисенко В. П., Мартиненко І. І. Вплив якості електроенергії на функціонування споживачів у сільському господарстві // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – №1(6). – С. 3–12.
5. Daniel O. Johnson, Kabiru A. Hassan. Issues of Power Quality in Electrical Systems // International Journal of Energy and Power Engineering. – 2016. – Vol. 5, No. 4. – P. 148–154.
6. Mirošević M., Maljković Z., Gašparac I. Effects of interruption in power supply of induction motors in isolated electrical grid // International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion. – 2011. – P. 732–735.
7. Sinyavsky O., Savchenko V., Dudnyk A. Development and Analysis Methods of Transporter Electric Drive for Electrotechnological Complex of Crop Seed Presowing by Electromagnetic Field // IEEE CPPE. – 2019. – P. 1–6.
8. Синявський О. Ю., Савченко В. В. Вплив відхилення напруги та частоти струму на технологічні характеристики сепараторів молока // Праці ТДАТУ. – 2013. – Вип. 13(2). – С. 63–68.
9. Sinyavsky O. Yu., Savchenko V. V. Основи електропривода. – К. : Компринт, 2017. – 598 с.
10. Savchenko V., Sinyavsky O., Lavrinenko Yu. et al. Електропривод виробничих машин і механізмів. – К. : ФОП Ямчинський, 2020. – 444 с.

11. Sinyavsky O. Yu., Savchenko V. V., Solomko N. O. Електропривод сільськогосподарських машин. – Ніжин : Лисенко, 2018. – 572 с.
12. Механізація і автоматизація у тваринництві і птахівництві / за ред. О. С. Марченка. – К. : Урожай, 1995. – 416 с.
13. Korchemny M. O., Fedoreiko V. S., Shcherban V. P. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. – Тернопіль, 2001. – 984 с.
14. Harmonic Mitigating Transformer Energy Saving Analysis. – MIRUS International Inc., 1999.
15. Victor A. Ramos Jr. Treating Harmonics in Electrical Distribution System. – 1999.
16. EN 50160:2015. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.
17. European Standard EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. – CENELEC.
18. Patil R. U., Chaudhari H. B. Behavior of Induction Motor at Voltage Unbalanced // IJERT. – 2015. – Vol. 4(5). – P. 1344–1348.
19. Hayamin P., Thongchaisuratkrul C. Effects of Induction Motor Using Unbalanced Voltage // International Journal of Computer, Internet and Management. – 2018. – Vol. 26(3). – P. 98–103.
20. Pakkawee H., Chaiyapon T. Effects of Induction Motor Using Unbalance Voltage // IJCIM. – 2018.
21. Korchemny M. O., Fedoreiko V. S., Shcherban V. P. Енергозбереження в АПК. – Тернопіль, 2001.
22. MIRUS International Inc. Harmonic Mitigating Transformer Energy Saving Analysis. – 1999.
23. Ramos V. A. Treating Harmonics in Electrical Distribution Systems. – 1999.
24. EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.

25. Лисенко В. П., Козирський В. В. Стан електричних мереж та надійність електропостачання. – Електрифікація АПК. – 2005.
26. Nejdawi I. M. et al. Harmonic Trend in the USA. – IEEE TPD. – 1999.
27. Donolo P. et al. Effects of Negative Sequence Voltage on Induction Motors. – IEEE ANDESCON. – 2016.
28. Zhang D., An R., Wu T. Effect of Voltage Unbalance and Distortion on Motor Losses. – IET Electr Power Appl. – 2018.
29. Neves A. B. F. et al. Effects of Voltage Unbalance on Torque and Efficiency. – ICHQP. – 2014.
30. Pokrovskiy K., Muzychak A. Voltage Deviations Influence on Asynchronous Generators. – Energy Engineering. – 2020.
31. Sinyavsky O., Savchenko V., Solomko N. Influence of Electricity Quality on Agricultural Machines. – Przegląd Elektrotechniczny. – 2021.
32. Goroshko A., Kashtalian A. Influence of Supply Voltage Unbalance. – Herald of Khmelnytskyi Univ. – 2025.
33. Savchenko V. et al. Influence of Voltage Deviation and Asymmetry on Transient Processes. – IEEE MEES. – 2021.
34. Anuj A. The Effect of Voltage from DC Motor... – ResearchGate. – 2022.
35. He D., Pang Y., Lodewijks G. Belt Conveyor Dynamics. – IJCESEA. – 2016.
36. Rajković B. et al. Transient Time of Belt Conveyor. – Mining and Metallurgy. – 2013.
37. Zablodskiy M. et al. Magnetic Field and Biological Objects. – IEEE ELNANO. – 2018.
38. He D., Pang Y., Lodewijks G. Acceleration for Belt Conveyor Control. – IJE&T. – 2016.
39. motor-net.com. AC Induction Motor Technical Data.
40. Lakhani H. Control of Electrical Drive. – 2018.