

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛЄШКОВ
“__” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ** **ВИЩОЇ ОСВІТИ**

на тему:

«Підвищення енергоефективності в подрібнювачах рослинних відходів при виробництві біопалива»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ЕНМ-23М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Сергій ДУТЧАК

«__» _____ 2024 р.

Керівник роботи доцент, канд. техн. наук,

_____ Руслан ТЕЛЮТА

«__» _____ 2024 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

 Петро ПЛІШКОВ

“ “ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУ- ВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Дутчак Сергій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Підвищення енергоефективності в подрібнювачах рослинних відходів при виробництві біопалива

Improving energy efficiency in shredders of plant waste in biofuel production

2. керівник роботи (проекту) Телюта Руслан Васильович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 16.12.2024 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів та зменшення втрат активної енергії в системі «електродвигун – робоча машина» за рахунок використання електромеханічних систем управління на базі розроблених енергозберігаючих режимів роботи електродвигунів. Завдання роботи: 1. Огляд технологій виробництва твердого біопалива та шляхи зниження енерговитрат; 2. Дослідження втрат активної потужності в електродвигуні робочої машини; 3. Розробка енергоефективної системи керування електроприводом подрібнення твердих рослинних відходів; 4. Розглянути та запропонувати заходи з охорони праці.

5. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		

6. Дата видачі завдання 09. 10. 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Видача та узгодження тематики роботи</i>	<i>4.10.2024</i>	
2	<i>Складання змісту магістерської роботи</i>	<i>11.10. 2024</i>	
3	<i>Анотація. Вступ.</i>	<i>21.10.2024</i>	
4	<i>Огляд технологій виробництва твердого біопалива та шляхи зниження енерговитрат</i>	<i>28.10. 2024</i>	
5	<i>Дослідження втрат активної потужності в електродвигуні робочої машини</i>	<i>11.11. 2024</i>	
6	<i>Розробка енергоефективної системи керування електроприводом подрібнення твердих рослинних відходів</i>	<i>25.11. 2024</i>	
7	<i>Розглянути та запропонувати заходи з охорони праці на підприємстві</i>	<i>2.12. 2024</i>	
8	<i>Висновки</i>	<i>9.12. 2024</i>	
9	<i>Перелік посилань</i>	<i>11.12. 2024</i>	
10	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>13.12. 2024</i>	
11	<i>Оформлення презентації магістерської роботи та подання магістерської роботи до захисту</i>	<i>14.12. 2024</i>	

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника _____ Руслан ТЕЛЮТА

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____ Сергій ДУТЧАК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 96 с.; 19 рис.; 8 табл.; 24 джерел.

Дутчак С. В. Підвищення енергоефективності в подрібнювачах рослинних відходів при виробництві біопалива. – Рукопис.

Метою роботи є підвищення енергоефективності подрібнювачів рослинних відходів для виробництва біопалива через розробку енергозберігаючих режимів роботи електроприводів та впровадження систем управління, що знижують втрати енергії.

Проаналізовано втрати активної потужності асинхронних електродвигунів у системі «електродвигун – робоча машина», враховуючи втрати у обмотках, магнітопроводах та при нагріванні. Визначено коефіцієнт втрат потужності для оцінки ефективності роботи двигунів. Розроблено методику дослідження втрат потужності за допомогою кругових діаграм та математичних моделей, які враховують ковзання двигуна залежно від навантаження.

Запропоновано нові підходи до діагностики асинхронних двигунів, що включають аналіз механічних втрат та оптимальні режими роботи. Створено математичну модель енергозберігаючих режимів роботи та алгоритм її використання.

Робота актуальна через зростання потреби у відновлюваних джерелах енергії. Біопаливо сприяє енергетичній незалежності України, знижуючи залежність від викопного палива та екологічне навантаження.

Наукова новизна полягає у розробці енергозберігаючих режимів роботи, що знижують енергоспоживання та підвищують ресурсність обладнання. Результати можуть бути використані для створення нових зразків техніки, орієнтованої на ефективну переробку біомаси.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, електропривод, робоча машина, енергозбереження, рослинні відходи, математична модель.

ABSTRACT

Qualification work: 96 p.; 19 fig.; 8 tables; 24 sources

Dutchak S..V. Improving energy efficiency in shredders of plant waste in biofuel production. - Manuscript.

The aim of the work is to improve the energy efficiency of plant waste shredders for biofuel production by developing energy-saving modes of electric drives and implementing control systems that reduce energy losses.

The active power losses of asynchronous electric motors in the system “electric motor - working machine” are analyzed, taking into account losses in the windings, magnetic circuit, and heating. The coefficient of power losses is determined to assess the efficiency of the motors. A methodology for studying power losses using pie charts and mathematical models that take into account the slip of the motor depending on the load is developed.

New approaches to the diagnostics of induction motors are proposed, including the analysis of mechanical losses and optimal operating modes. A mathematical model of energy-saving modes of operation and an algorithm for its use have been created.

The work is relevant due to the growing need for renewable energy sources. Biofuels contribute to Ukraine's energy independence by reducing dependence on fossil fuels and environmental burden.

The scientific novelty lies in the development of energy-saving modes of operation that reduce energy consumption and increase the service life of equipment. The results can be used to create new models of equipment focused on efficient biomass processing.

Key words: induction motor, electric drive, working machine, energy saving, plant waste, mathematical model.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

А – асинхронний

АД – асинхронний електродвигун

ЕД – електродвигун

ЕЗ – енергозбереження

ЕП – електропривод

АД з КР – асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором

КМ - магнітний пускач;

КВП – комплект вимірювальних пристроїв

М - електродвигун

МТП – м'який тиристорний пускач

ПП – пристрій програмування

РЗ – ресурсозбереження

QF - автоматичний вимикач;

ТГ - тахогенератор

ТРВ - твердих рослинних відходів

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ЗМІСТ	
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА ТА ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ	12
1.1 Енергетичний потенціал рослинних відходів в Україні.....	12
1.2 Основні види та характеристики твердого біопалива з рослинних відходів.....	18
1.3 Аналіз сучасного стану обладнання та технологічних процесів для виготовлення палива з твердих рослинних відходів	20
1.4 Стан і шляхи вирішення проблеми енергозбереження в електроприводах виробництва твердого біопалива	27
1.4.1 Тенденції розвитку електропривода виробництва твердого біопалива	27
1.4.2 Визначення потужності електродвигунів	29
1.4.3 Обмеження холостого ходу електропривода, заміна недовантажених електродвигунів.....	29
1.4.4 Оптимізація режимів роботи електропривода при змінних навантаженнях	30
1.5 Висновки до першого розділу роботи	22
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОДВИГУНІ РОБОЧОЇ МАШИНИ.....	35
2.1. Дослідження втрат активної потужності в асинхронному ЕД у функції потужності на валу.....	35
2.2 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції ковзання	42
2.3 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції завантаження на валу з боку робочої машини	48

2.4 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції рівня напруги живлення й завантаження на валу з боку робочої машини	54
2.5 Висновки до другого розділу роботи	68
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОДРІБНЕННЯ ТВЕРДИХ РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ.....	70
3.1 Дослідження втрати активної потужності електродвигуна в робочої машини подрібнювача твердих рослинних відходів	70
3.2 Математична модель енергозберігаючого режиму роботи електродвигуна робочої машини подрібнювача твердих рослинних відходів.....	74
3.3 Перевірка математичної моделі втрат активної потужності в електродвигуні робочої машини подрібнювача твердих рослинних відходів	76
3.4 Розробка пристрою забезпечення енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна	80
3.5 Висновки до третього розділу роботи.....	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83
ДОДАТОК.....	86
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ	87

ВСТУП

В умовах сучасної енергетичної кризи, що супроводжується зростанням залежності України від імпорту енергоносіїв, розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) стає стратегічним напрямом забезпечення енергетичної безпеки. Україна покриває лише близько 50% власних енергетичних потреб, що змушує імпортувати значну частину газу, нафти та нафтопродуктів. Це не лише створює ризики для стабільності енергопостачання, а й обмежує можливості економічного розвитку. У цьому контексті зростає інтерес до альтернативних джерел енергії, серед яких біомаса демонструє значний потенціал. Вона не лише слугує екологічно чистим ресурсом, а й здатна замінити до 15% первинної енергії, необхідної для потреб країни [1,2].

Одним із ключових етапів використання біомаси є виробництво біопалива, що передбачає технологічну переробку рослинних відходів. Важливою складовою цього процесу є подрібнення відходів, яке впливає на якість готового біопалива, його фізико-механічні характеристики, а також ефективність всього виробничого ланцюга. Подрібнювачі рослинних відходів є критичними елементами цієї технології, адже саме їх конструкція та режими роботи визначають рівень енергоспоживання та загальну економічність процесу [3,4].

Однак, експлуатація подрібнювачів часто супроводжується проблемами, що впливають на ефективність їх роботи, зокрема:

- значні енергетичні витрати через низьку оптимізацію конструкцій;
- підвищений рівень зносу робочих органів через високі механічні навантаження;
- недостатня адаптивність до змінних умов експлуатації, що обмежує їх універсальність.

Висока енергоємність технологічного процесу подрібнення сприяє збільшенню собівартості біопалива, що знижує його конкурентоспроможність порівняно з традиційними викопними паливами. Таким чином, удосконалення

енергоефективності подрібнювачів є не лише технічною, але й економічною необхідністю.

Актуальність теми. Зростання потреби у відновлюваних джерелах енергії стимулює розвиток технологій, спрямованих на ефективне використання рослинних відходів. Біопаливо, отримане з біомаси, сприяє зменшенню викидів парникових газів, скороченню залежності від викопних палив та підтримці аграрного сектору, адже дозволяє переробляти відходи сільськогосподарського виробництва. Однак для широкого впровадження біопалива необхідно вирішити низку технічних завдань, пов'язаних із підвищенням ефективності технологічного обладнання, особливо подрібнювачів.

Енергоефективність цих пристроїв впливає на всі аспекти технологічного процесу, включаючи обсяги споживаної енергії, продуктивність та довговічність устаткування. Оптимізація конструкцій подрібнювачів та впровадження енергозберігаючих режимів роботи дозволить значно підвищити економічну ефективність виробництва біопалива.

Мета роботи: підвищення енергоефективності подрібнювачів рослинних відходів при виробництві біопалива шляхом розробки і впровадження енергозберігаючих режимів роботи.

Завдання дослідження:

Провести аналіз існуючих типів подрібнювачів та їх конструктивних особливостей;

Виявити основні фактори, що впливають на рівень енергоспоживання у процесі подрібнення;

Визначити основні причини втрат енергії у процесі подрібнення;

Розробити рекомендації щодо оптимізації подрібнювачів для зниження енергоспоживання;

Моделювати енергозберігаючі режими роботи та оцінити їх ефективність.

Об'єкт дослідження: процеси перетворення енергії в електроприводі подрібнювача рослинних відходів.

Предмет дослідження: закономірності впливу режимних факторів на ефективність енергоспоживання подрібнювачів.

Наукова новизна та практичне значення.

Розробка нових підходів до оптимізації подрібнювачів дозволить значно скоротити витрати енергії на виробництво біопалива, підвищити ресурсність обладнання та розширити масштаби використання рослинних відходів. Результати дослідження можуть бути використані для створення нових зразків подрібнювальної техніки, адаптованої до умов сучасного аграрного виробництва та енергетики.

Реалізація поставлених завдань сприятиме підвищенню енергетичної незалежності України, розвитку технологій переробки біомаси та зниженню екологічного навантаження на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА ТА ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ

1.1 Енергетичний потенціал рослинних відходів в Україні

Біомаса – це органічна речовина, яка здатна до біологічного розкладу. До неї належать продукти, залишки та відходи, що утворюються в аграрній сфері, лісовому господарстві та дотичних галузях, а також частина побутових і промислових відходів, які можуть розкладатися під впливом мікроорганізмів.

Джерела біомаси є різноманітними: відходи сільського господарства, харчової промисловості, побутові залишки, а також матеріали, що утворюються у процесах деревообробки чи лісової промисловості. Серед основних джерел – відходи деревини, зокрема у деревообробній та целюлозно-паперовій промисловостях, а також залишки рослинного походження, які формуються в агропромисловому комплексі.

Вагоме значення у виробництві біомаси мають спеціально вирощувані енергетичні культури. Це швидкозростаючі види дерев, такі як тополя, верба або платан, а також трав'янисті рослини, наприклад, міскантус, сорго чи просо. Ці рослини відзначаються високою врожайністю та енергетичним потенціалом, що робить їх ідеальними для використання у виробництві біопалива. Крім того, до енергетичних культур можна зарахувати ріпак і соняшник, які широко застосовуються для отримання рідких моторних палив.

Культури на зразок кукурудзи та сорго є важливими компонентами для отримання не лише твердого біопалива, але й біогазу. Їхній потенціал активно використовується для зменшення залежності від викопних енергоресурсів. Енергетичне використання таких культур є ефективним рішенням для зниження викидів парникових газів та розвитку екологічно чистих технологій.

Біомасою є речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу – продукти, відходи та залишки сільського господарства, лісового господарства та пов'язаних з ними галузей, а також частина промислових та побутових відходів, що зазнає біологічного розкладу.

Походження біомаси може бути досить різноманітним, починаючи з відходів та залишків сільського господарства, харчової промисловості, домашнього господарства і закінчуючи відходами комунального господарства. Джерелом біомаси є також відходи деревини в лісовому господарстві, деревообробній та целюлозно-паперовій промисловості. Для виробництва біомаси використовуються також спеціальні енергетичні культури, що дають швидкий приріст маси (верба, тополя, платан), або певних сортів трав'янистих рослин (міскантус, просо, сорго та інші). До енергетичних культур також можна віднести ріпак, соняшник для виробництва рідких моторних палив. З метою енергетичного використання може вирощуватися і кукурудза та сорго, як для виробництва твердого біопалива так і біогазу.

Біомаса (рис. 1.1) має широкий потенціал використання в енергетичній сфері, зокрема через її безпосереднє спалювання або переробку в різні види біопалива. Це можуть бути рідкі біопалива, такі як ефіри ріпакової олії, біоетанол або рідкі продукти піролізу, а також газоподібні види, включаючи біогаз. Біогаз отримують із відходів сільського господарства, рослинництва, осаду стічних вод і твердих побутових відходів, а також у процесі газифікації твердих палив.

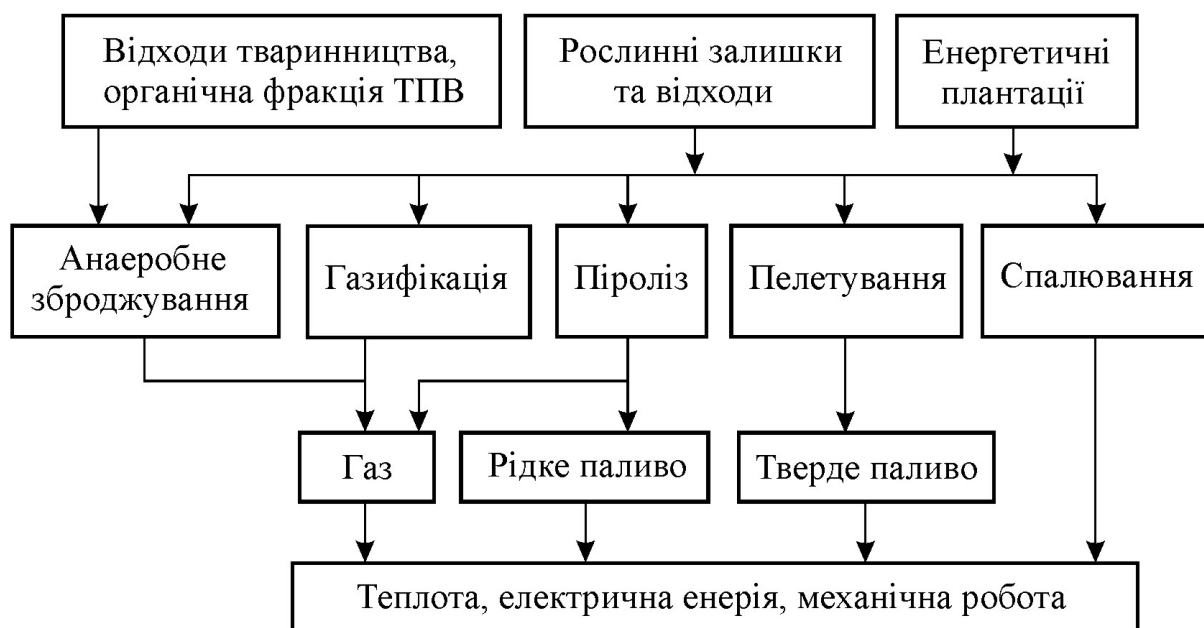


Рисунок 1.1 – Способи виробництва енергії з біомаси

Конверсія біомаси у форму кінцевої енергії – теплової або електричної – здійснюється за допомогою фізичних, хімічних або біохімічних методів. Ці підходи дозволяють оптимізувати використання енергетичного потенціалу біомаси та зробити її застосування більш ефективним і екологічно чистим.

Основними джерелами потенціалу біомаси в Україні є первинні аграрні відходи та енергетичні культури, які активно впроваджуються у промислове виробництво. До первинних агровідходів належать солома, залишки після збирання кукурудзи на зерно, соняшника та інших культур. Ці матеріали залишаються на полях як побічні продукти після збору врожаю основних сільськогосподарських культур. Особливе значення серед цих відходів має солома, яку отримують після збору врожаю однорічних злакових або лігноцелюлозних культур. Щорічно в Україні виробляється близько 25 мільйонів тонн соломи, з яких щонайменше 20% можна використовувати для виробництва біопалива [5]. У порівнянні з деревинними відходами та тирсою, солома вирізняється високим вмістом летких речовин, меншою щільністю та збільшеним часом горіння.

Вторинні аграрні відходи утворюються в процесі переробки сільськогосподарських культур для харчового чи кормового виробництва. Серед них – лущиння соняшника, рису, горіхова шкаралупа, залишки бобових культур та інші подібні види біомаси. В Україні загальний економічний потенціал таких вторинних відходів оцінюється у 12,2 млн тонн умовного палива на рік, а енергетичних культур – у 10 млн тонн умовного палива на рік [3]. Ці ресурси становлять значну частину енергетичного потенціалу біомаси, сприяючи розвитку відновлюваної енергетики та ефективному використанню залишкової сировини. Докладні дані про складові потенціалу біомаси наведені у табл. 1.1.

На сьогодні для енергетичних потреб в Україні використовують лише близько 10% загального потенціалу біомаси, що еквівалентно 2,7 млн тонн умовного палива на рік. Основну частку займає деревна біомаса, яка представлена дровами, тріскою, гранулами та брикетами – це становить 86% від загального обсягу використання. Друге місце посідає лущиння соняшника, яке складає 8% від загального обсягу. Використання рослинних відходів, зокрема соломи, є найменш

активним – лише 94 тисячі тонн на рік, що становить менше ніж 1% від її економічного потенціалу.

Дані щодо енергетичного потенціалу біомаси за 2020 рік представлені у вигляді графічної інформації (рис. 1.2 і 1.3). Найбільший потенціал деревної біомаси зосереджений у найбільш лісистих регіонах України: Житомирській, Львівській, Рівненській, Київській областях, а також у Карпатах і Криму. Загальний потенціал деревної біомаси у цей період оцінювався в 1378 тисяч тонн нафтового еквіваленту (н.е.), тоді як агробіомаса мала значно більший потенціал – 8039 тисяч тонн н.е.

Рівень використання деревної біомаси залежить від кількох ключових факторів. Один із них – розвиток деревообробної промисловості у певних регіонах, що визначає обсяги відходів деревини, які можуть бути спрямовані на енергетичні потреби. Іншим важливим фактором є інтенсивність лісозаготівель, яка наразі становить приблизно 50% від річного приросту деревини. Цей показник демонструє значний потенціал для розширення використання деревної біомаси, зважаючи на її стійке відновлення.

Таблиця 1.1 – Енергетичний потенціал біомаси в Україні (2020 р.)

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн. т	Економічний потенціал, млн. т у.п.
Солома зернових культур	30,6	4,54
Солома ріпаку	4,2	0,84
Відходи виробництва кукурудзи	40,2	4,39
Відходи виробництва соняшника	20,9	1,72
Вторинні відходи с/г	6,8	0,69
Деревна біомаса	4,6	1,97
Енергетичні культури: верба, тополя, міскантус	11,5	6,28

На даний час для задоволення енергетичних потреб в Україні використовується лише близько 10% від загального потенціалу біомаси, що становить 2,7 млн тонн умовного палива на рік (табл. 1.2) [3]. Основну частину споживаної

біомаси складає деревина, представлена у вигляді дров, тріски, гранул або брикетів, що сумарно становить 86% від загального обсягу. Лушпиння соняшника займає друге місце, надаючи 8% річного використання біомаси. Використання рослинних відходів, таких як солома, залишається мінімальним: лише 94 тисячі тонн на рік, що становить менше ніж 1% від її економічного потенціалу.

Таблиця 1.2 – Використання біомаси для виробництва енергії

Вид біомаси/біопалива	Річний обсяг споживання		Частка в річному обсязі споживання, %	Частка використання економічного потенціалу, %
	Натуральні одиниці	тис. тон у.п.		
Солома зернових культур та ріпаку	94 тис. т	48	1,8	0,9
Дрова (населення)	5,0 млн. м ³	1200	45,1	>90
Деревна біомаса (крім споживання населенням)	3,2 млн. т	1089	40,9	
Лушпиння соняшника	380 тис. т	208	7,8	41

Енергетичний потенціал біомаси за 2020 рік детально представлений на рисунках 1.2 та 1.3. Найвищий потенціал деревної біомаси спостерігається у лісистих північних і північно-західних регіонах України, таких як Житомирська, Львівська, Рівненська, Київська області, а також у Карпатах та Криму. Загалом потенціал деревної біомаси у 2020 році оцінювався у 1378 тисяч тонн нафтового еквівалента (н.е.), тоді як потенціал агробіомаси був значно більшим і складав 8039 тисяч тонн н.е.

Використання деревної біомаси значною мірою залежить від стану деревообробної промисловості у регіонах, яка визначає обсяги доступних відходів для енергетичних потреб. Крім того, важливим фактором є інтенсивність рубок деревини. На сьогоднішній день обсяги рубок складають близько 50% від річного приросту деревини, що свідчить про наявність резервів для розширення використання деревної біомаси в енергетиці.

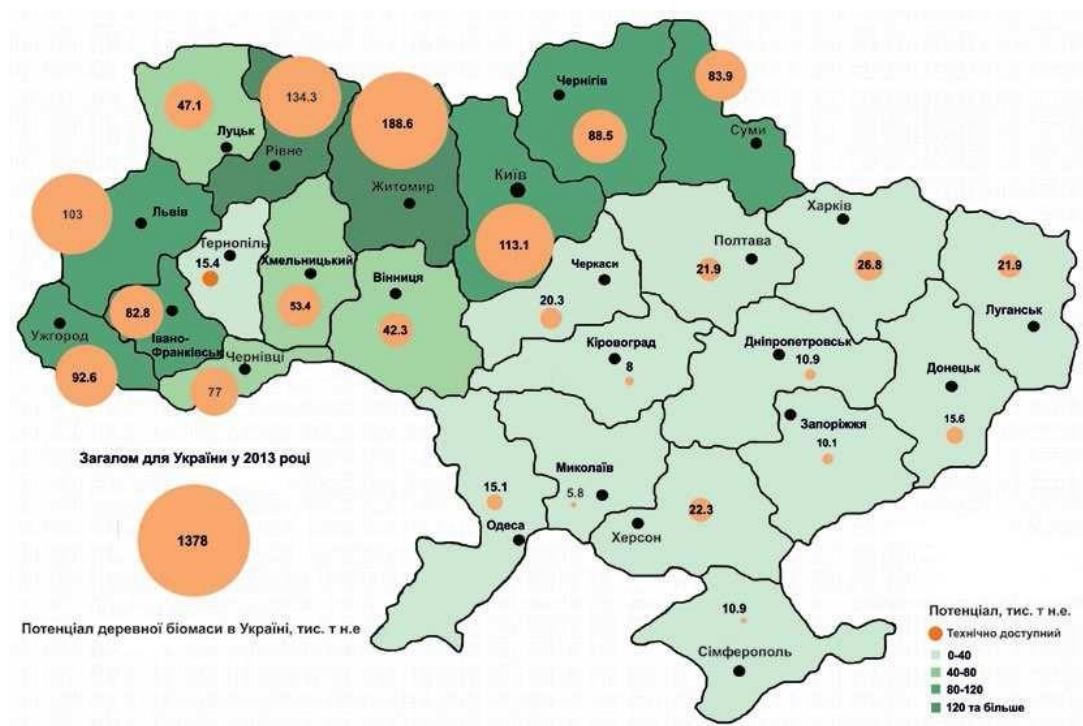


Рисунок 1.2 – Потенціал деревної біомаси в Україні у 2020 році

У центральних, південних і південно-східних регіонах України, де особливо розвинуте сільське господарство та харчова переробка, значний енергетичний потенціал біомаси припадає на агровідходи цих галузей.

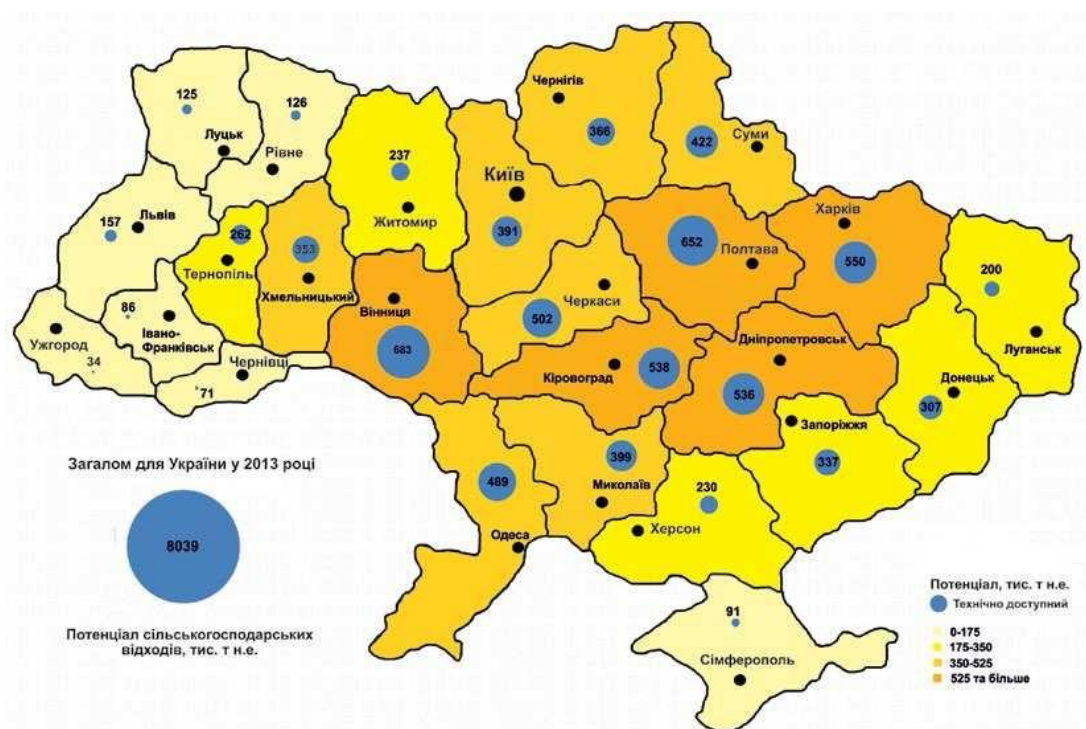


Рисунок 1.3 – Потенціал агробіомаси в Україні у 2020 році

Агробіомаса, отримувана з побічних продуктів вирощування та переробки сільськогосподарських культур, є одним із основних ресурсів для виробництва біопалива в цих регіонах.

Основним чинником, що визначає потенціал агробіомаси, виступає урожайність сільськогосподарських культур, яка значно змінюється залежно від кліматичних умов кожного року. Погодні аномалії або несприятливі метеоумови можуть суттєво вплинути на обсяги доступної агробіомаси. Водночас останніми роками в Україні спостерігається зростання урожайності завдяки впровадженню сучасних агротехнологій, поліпшенню якості насіннєвого матеріалу та оптимізації агротехнічних заходів.

Ці позитивні тенденції свідчать про перспективне збільшення потенціалу агробіомаси в найближчому майбутньому. Зростання цього ресурсу відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності шляхом активнішого використання агробіомаси для виробництва твердих, рідких та газоподібних біопалив, що сприятиме енергетичній незалежності країни.

1.2 Основні види та характеристики твердого біопалива зрослинних відходів

Тверде біопаливо є одним із найпоширеніших видів альтернативних енергоносіїв, яке активно застосовують для теплової енергетики. Найбільш популярними його формами є пелети та брикети, виготовлені з різних видів твердих рослинних відходів [3,5].

Пелети — це паливні гранули у формі циліндрів діаметром до 25 мм і завдовжки 10–50 мм. Сировиною для їх виготовлення можуть бути деревина, торф, солома, трава, лушпиння соняшнику, вугільний пил, а також суміші цих компонентів. Їх висока щільність, низький вміст вологи та компактність роблять пелети зручними для транспортування і зберігання. Водночас, завдяки їх циліндричній формі, забезпечується сипкість матеріалу, що дозволяє автоматизувати подачу палива в енергетичних установках (рис. 1.4) [6].



а) – лущиння гречки; б) – солома зернових культур; в – деревна стружка; г - торф; д – лущиння соняшника; ж – лущиння рису

Рисунок 1.4 – Зразки пелет із різної сировини

Ще одним важливим видом твердого біопалива є брикети. Вони зазвичай мають форму циліндрів, шестигранників або паралелепіпедів і виготовляються методом пресування подрібненої біомаси під високим тиском. Брикети мають більші розміри, ніж пелети, і здебільшого використовуються в стаціонарних енергетичних установках або як паливо для твердопаливних котлів.

Таблиця 1.3 [7] містить порівняльну характеристику різних видів твердого біопалива, враховуючи їх теплотворну здатність, вміст золи, щільність і вартість виробництва. Пелети, завдяки своїй високій енергоефективності та універсальності, є особливо перспективними для домогосподарств і промислових енергетичних потреб.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика різних видів твердого біопалива

Вид палива	Вологість матеріалу, %	Теплотворна здатність, МДж/кг	Вміст сірки, %	Вміст золи, %
Гілки плодових дерев	20	10,5	—	—
Виноградна лоза	20	14,2	—	—
Тріски дерев, тирса	40-45	10,5-12,0	0	2
Брикети з деревини	7-8	16,8-21,0	—	—
Пелети з деревини	9-10	17,5-19,5	0,1	1
Солома	20	10,5-12,5	—	—

Солома в тюках	14-17	14,2	—	—
Пелети з соломи	8-10	16,5-18,8	0,2	4
Брикети з соломи	6-10	15,4-21,0	—	—
Брикети з полови	—	16,7	—	—
Стебла соняшнику	20	12,5	—	—
Брикети з лушпиння соняшнику	6-8	21,0-21,8	—	—
Пелети з лушпиння соняшнику	6-8	18,5-20,0	—	—
Стебла кукурудзи	20	12,5	—	—
Брикети з качанів	—	18,0	—	—

1.3 Аналіз сучасного стану обладнання та технологічних процесів для виготовлення палива з твердих рослинних відходів

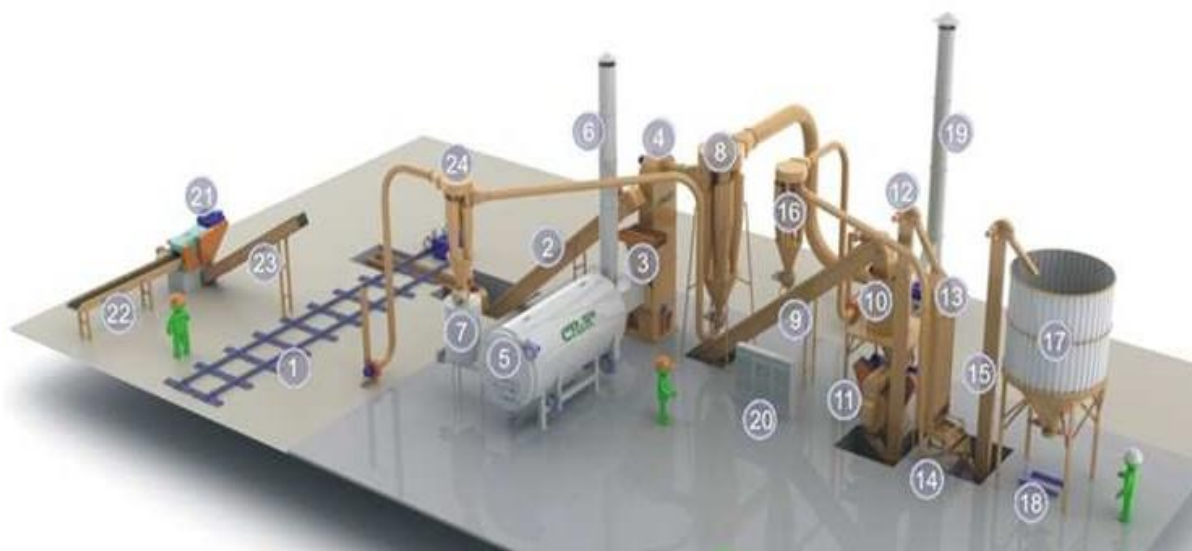
Процес виробництва пелет можна умовно поділити на кілька ключових етапів: подрібнення, сушіння, кондиціювання, пресування, охолодження, фасування та упаковка. Технологічна схема виготовлення пелет із рослинних відходів ілюструється на рисунку 1.5.

На першому етапі зібрані рослинні відходи подаються на попереднє подрібнення, яке зменшує розмір матеріалу до потрібної фракції. Потім відбувається сепарування, під час якого видаляються небажані домішки, як-от каміння, коріння чи інші сторонні частинки. Після цього сировина надходить на остаточне подрібнення, що забезпечує однорідність фракцій перед наступними етапами.

Далі біосировина піддається сушінню для зниження вологості до необхідного рівня. Наступним етапом є кондиціювання, що дозволяє досягти оптимального рівня вологості й температури перед пресуванням. Висушена і кондиціонована маса потрапляє до пресувальних машин, де формується гранули потрібної щільності та розміру. Після пресування пелети проходять охолодження, що стабілізує їх фізичні властивості, та просіювання, під час якого відділяються дрібні частки чи пил. Далі готові пелети дозуються на вагах і фасуються у зручну тару для транспортування. У фіналі продукція упаковується і складається для зберігання або відправлення споживачам.



Рисунок 1.5 – Технологічна послідовність виготовлення пелет з рослинних відходів



1 - рухомий склад; 2, 9, 22, 23 - транспортери; 3 - сепаратор; 4 – сушильно-подрібнювальний агрегат; 5 - теплогенератор; 6 – труба атмосферного повітря; 7 – бункер палива; 8, 16 - циклони; 10 - бункер пелетоутворювача; 11 - пелетоутворювач; 12, 15 – норії; 13 - охолоджувач; 14 - сортувальник; 17 - бункер готової продукції; 18 - ваги; 19 - димова труба; 20 - пульт управління; 21 - подрібнювальна машина; 24 – система пневмотранспорту

Рисунок 1.6 – Схемне рішення виробництва біопалива з твердих рослинних відходів.

Залежно від типу сировини та її характеристик, технологічна схема може коригуватися. Наприклад, якщо використовується сировина з низькою вологістю (до 12 %), як-от лущиння соняшника або суха стружка, етап сушіння може бути виключений із процесу. Це дозволяє оптимізувати виробництво та знизити енерговитрати, забезпечуючи ефективність технологічного циклу.

Змішування продуктів горіння і повітря: Продукти горіння з теплогенератора 5 подаються до агрегату сушки-подрібнювача 4 разом із холодним атмосферним повітрям, що засмоктується через трубу 6. Пропорція змішування регулюється автоматично для підтримки заданої температури теплоносія.

Подрібнення та сушіння сировини: Сировина подрібнюється і потім піднімається потоком теплоносія до динамічного класифікатора (рис. 1.7), що знаходиться у головній секції агрегату сушки-подрібнювача 4. Класифікатор пропускає дрібну суху сировину, а більші частинки повертаються до ротора для додаткового подрібнення і сушіння.

Очищення та транспортування сировини: Після подрібнення і сушіння сировина засмоктується в осадочний циклон 8, де вона осідає завдяки відцентровій силі. Відпрацьований теплоносій викидається в димову трубу 19. З циклона сировина через шлюзовий затвор подається на транспортер 9 і потім у бункер пелету утворювача 10.

Кондиціонування сировини: У змішувачі (кондиціонері) сировина зволожується до необхідної вологості для пресування. Потім сировина проходить через віддільник феромагнітних домішок (рис. 1.6), що забезпечує чистоту матеріалу перед пресуванням.

Пресування в пелети: У камері пресування пелетоутворювача 11 сировина зтягується між обертовою матрицею та пресувальними роликами. Під великим тиском сировина продавлюється через матрицю, утворюючи гранули.

Охолодження та сортування: Гранули охолоджуються в охолоджувальній колонці 13, де вентилятор циклона 16 засмоктує повітря, що зменшує вологість пелет і видаляє незгранульовану сировину. Потім пелети сортуються на сортуванні 14, де кондиційні вироби відокремлюються від крихти, яка повертається на повторне гранулювання.

Упаковка та транспортування: Готові пелети подаються в бункер готової продукції 17, де здійснюється їх фасування в мішки або біг-беги для подальшого транспортування. Пелети завантажуються в мішки за допомогою ваг і транспортуються на склад готової продукції.

Автоматизоване поповнення бункера палива: Теплогенератор 5 автоматично поповнюється паливом з бункера палива 7, а сировина, що не пройшла пресування, повертається в систему пневмотранспорту 24 для подальшої обробки.

Попереднє подрібнення рослинних відходів, таких як очерет, стебла камішу, солома, сіно, люцерна тощо, до фракцій 5–10 мм виконується за допомогою спеціалізованих подрібнювальних і соломорізальних машин (рис. 1.7, 1.8) [8,9]. Цей етап є необхідним для зменшення розміру сировини, що покращує ефективність подальших операцій обробки та гранулювання.



Рисунок 1.7 – Подрібнювач рослинних відходів



Рисунок 1.8 – Соломорізальна машина

Для досягнення більш дрібної фракції (0,5–1,5 мм), яка є оптимальною для пресування в лініях гранулювання та брикетування, після попереднього подрібнення застосовуються різні типи дробарок. Ці дробарки дозволяють забезпечити необхідну гомогенність та розмір частинок, що критично важливо для стабільності і якості кінцевого біопалива. Процес остаточного подрібнення відходів може здійснюватися з використанням таких пристроїв, як роторні, молоткові або ударно-обертові дробарки (рис. 1.9, 1.10) [10-12].



Рисунок 1.9 – Дробарка молоткові Рисунок 1.10 – Дробарка подрібнення рослинних відходів

Інноваційні підходи до остаточного подрібнення, наприклад, застосування дробарок з регульованим тиском або додатковими фільтраційними системами, дозволяють значно покращити ефективність процесу. Також варто зазначити, що сучасні технології дроблення включають використання автоматизованих систем контролю, що дозволяють адаптувати параметри роботи дробарок під конкретні

типи сировини, враховуючи її вологість, щільність та інші фізичні характеристики.

У деяких процесах виготовлення пелет замість традиційних молоткових дробарок застосовуються дезінтегратори (рис. 1.11) [13]. Ці пристрої забезпечують подрібнення сировини до дуже дрібних частинок, досягнувши фракції 5–10 мкм, що є важливим для забезпечення оптимальної структури матеріалу. Дезінтегратори здатні обробляти сировину з вологістю до 40 %, що дозволяє знизити витрати енергії на подальше сушіння та підвищує ефективність технологічного процесу.

Для коригування вологості матеріалу до необхідних стандартів у виробничому процесі використовуються різні типи сушарок. Серед них найбільш популярними є сушарки барабанного, стрічкового та трубчастого типу (рис. 1.12). Трубчаста сушарка (рис. 1.12) є особливо ефективною для обробки соломи, стебел зернових культур, стружки та інших рослинних відходів. Вона дозволяє рівномірно висушити сировину до оптимального рівня вологості, що необхідно для подальшого процесу гранулювання або брикетування, забезпечуючи стабільність і якість кінцевого біопалива [14].



Рисунок 1.11 – Дезінтегратор



Рисунок 1.12 – Сушарка трубчаста

Для малих господарств і підприємств, що займаються виробництвом біопалива, оптимальним може бути використання компактного комплексу обладнання для виготовлення пелет, яке представлено на рисунку 1.13 [15]. Такий комплекс зазвичай включає в себе основні етапи виробничого процесу, від подрібнення сировини до виготовлення готових пелет, і призначений для ефективної

обробки невеликих обсягів рослинних відходів. Використання такого обладнання дозволяє забезпечити високу якість продукції при мінімальних витратах енергії та ресурсів, що є важливим для малих господарств з обмеженими фінансовими можливостями.



Рисунок 1.13 – Обладнання з виробництва пелет для дрібних підприємств

Одними з головних виробників пелет з твердих рослинних відходів для власних потреб є невеликі фермерські господарства та малі сільськогосподарські підприємства. У таких системах подрібнення твердих рослинних відходів спостерігається значна нерівномірність процесу завантаження, що часто призводить до роботи обладнання в режимах, які значно відрізняються від номінальних. Більшість електроприводів, що використовуються в цих системах, не оснащені сучасними енергозберігаючими технологіями. Це призводить до підвищеного споживання електричної енергії, оскільки відсутні засоби регулювання експлуатаційних режимів електродвигунів, що особливо виражено на первинних етапах подрібнення рослинних відходів, коли навантаження на систему змінюється в залежності від потоку сировини.

1.4 Стан і шляхи вирішення проблеми енергозбереження в електроприводах виробництва твердого біопалива

1.4.1 Тенденції розвитку електропривода.

Електроприводи є основними засобами для перетворення енергії в механічну роботу і широко використовуються в сільському господарстві, де забезпечують більше 65% споживаної електричної енергії. Вони виконують функцію «м'язів» технологічних процесів, в той час як інформаційні системи — «мозку». Нині велика увага приділяється розширенню виробництва регульованих електроприводів змінного струму. У розвинутих країнах частка таких приводів досягає 30-60%, в Україні - до 2%, але в найближчі роки очікується збільшення цієї частки до 65-75%. Це пов'язано з їх високою ефективністю та рентабельністю. Наприклад, використання регульованих електроприводів дозволяє значно знизити енергоспоживання для таких механізмів, як помпи (на 25-30%), компресори (на 40%), вентилятори (на 30%) та центрифуги (на 50%). Зважаючи на те, що ці механізми складають більше 50% всіх електроприводів, застосування регульованих систем у сільському господарстві є пріоритетним для збереження енергії.

Основними сферами впровадження таких електроприводів є системи мікроклімату для тваринницьких і птахівничих ферм, установи тепло- і холодопостачання, водопостачання, пневмотранспортування та системи стиснутого повітря. Також вони активно застосовуються в комунальних господарствах для водопостачання, кондиціонування та вентиляції будівель.

На сучасному етапі регульований електропривод здебільшого представлений частотно-регульованим асинхронним приводом. Така система включає мережу, некерований випрямляч, шини постійного струму з конденсаторами, інвертор на транзисторних модулях, керований процесором, та короткозамкнений двигун. Завдяки своїй компактності (приблизно 1 кг на 1 кВт потужності) та можливості детального діагностування, цей привід демонструє високу ефективність, зокрема у регулюванні робочих режимів через цифрові та аналогові сигнали. Водночас, асинхронний електродвигун залишає за собою статус найбільш

популярного типу електричної машини завдяки своїй простоті, надійності та низькій вартості. Використання мікропроцесорних технологій дозволило значно покращити інтелектуальні можливості таких приводів.

Незважаючи на значне зростання використання регульованих приводів, нерегульовані електроприводи залишаються найпоширенішими в сільському господарстві, особливо в таких механізмах, як вентилятори, транспортери, помпи, оброблювальні станки та змішувачі. Відповідно, в Україні до сих пір використовуються способи регулювання, які базуються на дроселюванні потоків і спричиняють значні енергетичні втрати.

У розвинених країнах, таких як США, Японія та країни Західної Європи, активно застосовуються перетворювачі частоти для регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів. Це дозволяє знижувати витрати електричної енергії на 20-50%. В Україні використання таких систем поки що обмежене, проте в майбутньому вони можуть значно зменшити енергоспоживання в сільському господарстві.

Нерегульовані електроприводи, зокрема асинхронні двигуни з найпростішими засобами керування, залишаються основними в сільськогосподарському виробництві. Однак за рахунок інноваційних рішень, таких як «м'які пускачі» та нові енергозберігаючі технології, зростає ефективність використання нерегульованих електроприводів. Зокрема, тиристорні пускачі допомагають контролювати пуск і зупинку двигуна, зменшуючи енергоспоживання та зберігаючи ресурси при неповному навантаженні.

Перехід від нерегульованих електроприводів до регульованих у багатьох технологічних установках, зокрема для водо- та теплопостачання, демонструє значний потенціал для енергозбереження. Використання частотно-регульованих приводів в таких системах може забезпечити економію електроенергії до 60%, води - 25%, теплової енергії - 10%.

Зважаючи на це, в найближчі роки очікується зростання застосування регульованих електроприводів у всіх галузях, що має суттєвий потенціал для

зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності виробничих процесів у сільському господарстві та комунальному господарстві.

1.4.2 Визначення потужності електродвигунів.

У зазначеному випадку для точного розрахунку потужності електродвигуна при змінних або випадкових навантаженнях, необхідно враховувати не тільки основні формули електроприводів, але й спектральні характеристики навантаження. Для цього використовується метод, заснований на спектральному аналізі струму, що дозволяє точніше оцінити еквівалентний струм або потужність, що враховує динамічні зміни навантаження.

При виборі потужності електродвигуна потрібно також враховувати відхилення температури навколишнього середовища від стандартної (40°C). Для цього застосовується коригувальний коефіцієнт, який враховує різницю температур та граничне перевищення температури обмотки:

$$P_{\partial} = K_{\theta} P_n, \quad K_{\theta} = \sqrt{1 \pm \Delta t + \left(a + \frac{1}{\theta}\right)}, \quad (1.1)$$

Також враховується граничне перевищення температури обмоток (θ) залежно від класу ізоляції (А, Е). Потім, для точного визначення потужності, додається коефіцієнт a , що описує співвідношення постійних втрат до змінних при номінальному навантаженні.

1.4.3 Обмеження холостого ходу електропривода, заміна недовантажених електродвигунів.

Якщо середнє завантаження електродвигуна складає 45% або менше, то заміна його на двигун меншої потужності є завжди доцільною, оскільки це дозволяє знизити втрати енергії та підвищити ефективність роботи системи. Однак, якщо завантаження перевищує 70%, заміна електродвигуна на менш потужний не має сенсу, оскільки це може призвести до зниження його продуктивності і

надійності. У випадку, коли завантаження знаходиться в межах 45-70%, питання про заміну електродвигуна повинно бути розглянуте на основі детальних розрахунків економічної доцільності. Це передбачає розгляд втрат енергії як в самому електродвигуні, так і в електричній мережі. Формула для обчислення втрат електроенергії може виглядати так:

$$\Delta p_{\text{сум}} = [Q_x (1 - K_n^2) + K_n Q_n] K_e + \Delta p_0 + K_n^2 \Delta p_{a.n}, \quad (1.2)$$

Реактивна потужність при роботі електродвигуна в режимі холостого ходу

$$Q_x = \sqrt{3} U_i I_i \sin \varphi_0$$

Приріст втрат активної потужності при роботі електродвигуна відповідно без навантаження і з 100% навантаженням визначається виразом:

$$\begin{aligned} \Delta p_0 &= P_n \frac{1 - \eta_\delta}{\eta_\delta} \frac{\gamma}{1 + \gamma}, \\ \Delta p_{a.n} &= P_n \frac{1 - \eta_\delta}{\eta_\delta} \frac{1}{1 + \gamma}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

Конструктивний коефіцієнт електродвигуна має вираз:

$$\gamma = \frac{\Delta p_0 (\%) }{[1 - \eta_n (\%)] - \Delta p_0 (\%)} \quad (1.4)$$

Застосування технічних пристроїв обмежувачів холостого ходу на робочих машинах, що мають 10 секунд і більше міжопераційний час є ефективним методом для зниження витрат електроенергії. Це досягається шляхом автоматичного відключення електродвигуна в періоди, коли машина не виконує основну роботу та сприяє значній економії електроенергії.

1.4.4 Оптимізація режимів роботи електропривода при змінних навантаженнях.

Збільшення середнього навантаження робочих машин дійсно позитивно впливає на ефективність роботи електроприводів. Це відбувається за рахунок покращення коефіцієнта корисної дії (ККД) як самого електродвигуна, так і робочої

машини в цілому. Коли електродвигун працює в умовах більших навантажень, його ККД зазвичай підвищується, оскільки втрати енергії (особливо в системах зі змінними навантаженнями) стають меншими, а РМ працює ефективніше.

Для розрахунку економії електроенергії, що досягається при збільшенні навантаження, використовується концепція питомих витрат електроенергії. Питомі витрати визначаються як кількість електроенергії, яку споживає електродвигун для виконання одиниці корисної роботи. Це важливий показник для визначення економії енергії при зміні умов експлуатації робочої машини.

$$E_i = P_i \cdot T_i, \quad (1.8)$$

За наступною формулою можна визначити питомі витрати електроенергії:

$$\Delta E = \frac{1}{\eta_{н.м} K_n} \left(K_n + \frac{\alpha(1 - \eta_{н.м})}{K_m} \right), \quad (1.9)$$

За наступною формулою розраховують коефіцієнт навантаження:

$$K_n = P_m / P_n, \quad (1.10)$$

Коефіцієнт використання робочої машини можна описати виразом:

$$K_m = T_m / (T_m + T_x), \quad (1.11)$$

Питомі витрати енергії при максимальному використанні робочої машини ($K_m = 1$) можна визначити наступним чином:

$$\Delta E' = [K_n + \alpha(1 - \eta_{н.м})] / (\eta_{н.м} K_n), \quad (1.12)$$

При умові що $K_m = 1$ та машина повністю завантажена $K_n = 1$, звідси питомі витрати енергії будуть мати мінімальні значення:

$$\Delta E_0 = [1 + \alpha(1 - \eta_{н.м})] / \eta_{н.м}, \quad (1.13)$$

Відношення приведені наступним чином:

$$\frac{\Delta E}{\Delta E_0} = \frac{K_n K_m + \alpha(1 - \eta_{н.м})}{[1 + \alpha(1 - \eta_{н.м})] K_n K_m}. \quad (1.14)$$

Дає можливість визначити коефіцієнт збільшення питомих витрат енергії (β) у режимі холостого ходу ЕД залежно від навантаження і тривалості роботи.

У приводних системах, де двигун працює в умовах стабільного або незначно змінного навантаження, застосування енергозберігаючих електродвигунів з

підвищеним коефіцієнтом корисної дії є доцільним. Однак ці двигуни мають вищу вартість та масу порівняно зі звичайними, тому їх застосування економічно обґрунтоване лише в тих випадках, коли навантаження стабільне або змінюється в невеликому діапазоні навколо номінального значення.

В умовах значних коливань навантаження, коли рівень змінюється в широкому діапазоні, застосування енергозберігаючих двигунів не є раціональним. У таких випадках доцільніше використовувати двигуни загального призначення з удосконаленими режимами роботи, які забезпечують необхідну гнучкість в роботі при змінних навантаженнях [16].

У сільському господарстві електроприводи часто працюють в умовах недовантаження, де важливим є використання регуляторів напруги. Такі системи дозволяють зменшити споживання активної і реактивної потужності, що веде до економії електроенергії.

Зниження напруги на затискачах електродвигуна можна досягти кількома способами: перемикання схеми з'єднання обмотки статора з трикутника на зірку, що дозволяє знизити напругу і відповідно зменшити споживану потужність.

Секціювання статорних обмоток для досягнення більш ефективного розподілу напруги та зменшення втрат.

Зниження напруги в електричних мережах сільськогосподарських підприємств шляхом перемикання відгалужень знижувальних трансформаторів, що дозволяє регулювати подачу електроенергії відповідно до поточних потреб.

Ці заходи сприяють підвищенню енергоефективності та зниженню експлуатаційних витрат у системах електроприводів.

Перемикання схеми з'єднання обмотки статора асинхронного електродвигуна з трикутника на зірку є доцільним для двигунів, що працюють при постійному завантаженні на рівні 35-40% і нижче, за умови напруги до 1000 В. Це дозволяє знизити споживану потужність та втрати енергії. При такому перемиканні напруга на обмотках зменшується в $\sqrt{3}$ рази, що призводить до зниження максимального обертового моменту в три рази.

Однак це також означає, що обертальний момент зменшується, і для забезпечення стабільної роботи двигуна в умовах змінного навантаження необхідно перевірити, чи здатен електродвигун підтримувати необхідний коефіцієнт завантаження, який повинен бути достатнім для виконання всіх технологічних функцій. Необхідний коефіцієнт завантаження електродвигуна визначають:

$$\lambda_{н.сп} = \lambda_{м} / 4,5. \quad (1.15)$$

Секціювання статорних обмоток асинхронних електродвигунів є важливим методом регулювання потужності і зменшення енергетичних витрат, коли перемикання схеми з'єднання обмоток (з трикутника на зірку) неможливе. У випадку електродвигунів з паралельними витками в обмотці статору, секціювання можна здійснити перепаяванням лобових з'єднань обмотки. Однак, якщо обмотка виконана одним проводом, перемикання можливе лише під час капітальних ремонтів, що збільшує витрати та час простою обладнання.

Перемикання відгалужень знижувального трансформатора застосовується в разі, коли трансформатор не живить інші електроприймачі, де зниження напруги є неможливим. Це дозволяє зменшити витрати енергії без впливу на інші частини системи.

В умовах динамічних навантажень використання стандартних електродвигунів загального призначення може призводити до зниження енергетичних показників через нестабільність навантаження. У таких випадках ефективним методом є застосування замкнених систем регулювання завантаження електропривода. Це дає змогу знижувати енерговитрати на одиницю продукції на 12-20%, зокрема, через регулювання струму навантаження або ковзання ЕД.

Особливо це важливо для відцентрових машин, таких як помпи і вентилятори. Регулювання швидкості обертання робочих органів цих машин дає змогу оптимізувати енергоспоживання. Для відцентрових pomp і вентиляторів, де робочий режим визначається характеристиками магістралі, регулювання швидкості дозволяє досягти бажаного результату без надлишку напору [16]. Наприклад, при нерегульованому приводі для зменшення витрат необхідно збільшувати

опір, тоді як при регульованому приводі можна просто змінити кутову швидкість, досягнувши необхідних витрат без перевитрат енергії.

У таких системах ефективно регулювання здійснюється за допомогою електричних перетворювачів, що змінюють амплітуду або частоту напруги, прикладеної до двигуна. Це дозволяє знижувати енергоспоживання, при цьому підтримуючи потрібні технічні характеристики машини.

1.5 Висновки до першого розділу роботи

Виконаний аналіз технологій та конструктивних рішень для виготовлення паливних пелет і брикетів з твердих рослинних відходів, а також підвищення енергоефективності в подрібнювачах рослинних відходів при виробництві біопалива, показав значний потенціал цих технологій у забезпеченні альтернативних джерел енергії. Пелети та брикети з рослинної сировини є економічно вигідними і ефективними у порівнянні з традиційними джерелами енергії, такими як електроенергія, сланці та дрова. Вони також можуть стати важливим елементом у розвитку сталого енергетичного забезпечення сільських територій, де є надлишок рослинних відходів.

Підвищення енергоефективності в процесах подрібнення рослинних відходів є важливим кроком у зниженні енергетичних витрат і підвищенні продуктивності виробництва біопалива. Це досягається через оптимізацію конструктивних рішень подрібнювачів, використання високоефективних енергозберігаючих електродвигунів, а також покращення технологій подрібнення та обробки сировини, що дозволяє знизити втрати енергії і забезпечити високу якість кінцевого продукту.

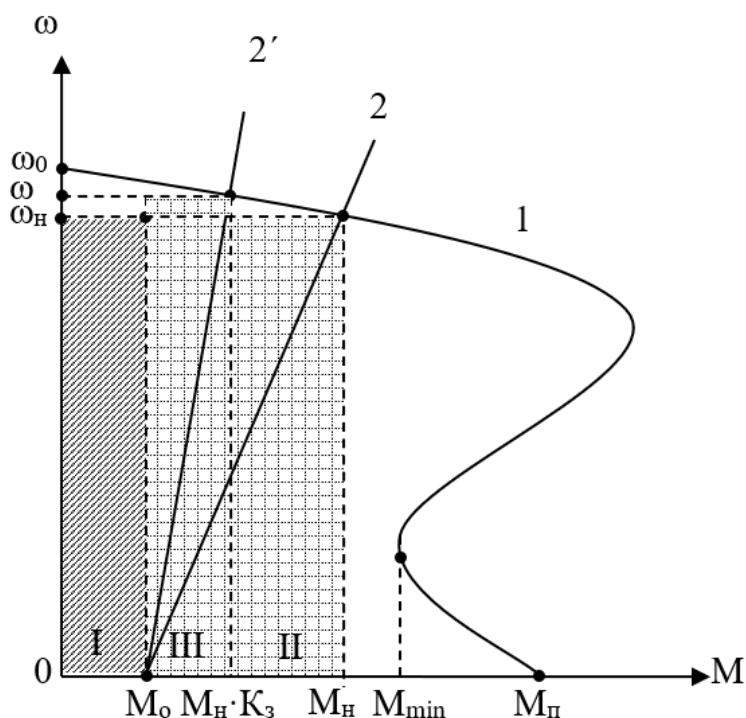
Загалом, ці заходи сприяють зниженню енергозатрат на одиницю виробленої продукції, що має важливе значення для сталого розвитку біоенергетичних технологій та покращення екологічної ситуації в регіонах, що займаються виробництвом біопалива.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОДВИГУНІ РОБОЧОЇ МАШИНИ.

2.1 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції потужності на валу.

Розглянемо механічні характеристики (рис. 2.1) робочої машини (графіки 2 і 2') та електродвигуна (графік 1). На ньому також зображено втрати активної потужності, що виникають у робочій машині через тертя (перша заштрихована область). Ці характеристики дозволяють проаналізувати взаємодію електродвигуна з механізмом у різних режимах роботи. Графік електродвигуна демонструє залежність моменту від частоти обертання, що дозволяє визначити, за яких умов забезпечується стабільна робота системи. Графіки робочої машини відображають зміну навантаження залежно від швидкості, що дає змогу оцінити ефективність передачі енергії.

$$P_o = M_o \cdot \omega_n. \quad (2.1)$$



криві електродвигуна (крива - 1), робочої машини (крива - 2 і 2')

Рисунок 2.1. – Механічні характеристики при неповному і номінальному завантаженні.

Активна потужність, необхідна робочій машині для здійснення корисної роботи в умовах номінального навантаження, відображена другою заштрихованою областю на графіку:

$$P_H = (M_H - M_O) \cdot \omega_H, \quad (2.2)$$

Активна потужність, що споживається РМ для виконання корисної роботи за умов неповного завантаження, позначена третьою заштрихованою ділянкою на графіку:

$$P = (M_H \cdot \kappa_{з.м} - M_O) \cdot \omega, \quad (2.3)$$

Коефіцієнт завантаження робочої машини визначається як співвідношення між фактичною продуктивністю механізму та його номінальним значенням:

$$\kappa_{з.м.} = Q/Q_H, \quad (2.4)$$

Отже, у загальному випадку, енергоспоживання робочої машини визначається як сума потужності, необхідної для виконання корисної роботи, і енергетичних втрат у системі:

$$P_c = P_o + P, \quad (2.5)$$

Виведено формулу для коефіцієнта завантаження електродвигуна, яка відображає співвідношення фактичного навантаження до номінального:

$$\kappa_z = \frac{P_o + P}{P_{2H}}. \quad (2.6)$$

Як відомо, в асинхронних електродвигунах із короткозамкненим ротором, що функціонують як перетворювачі електричної енергії в механічну, виникають фізичні процеси, які спричиняють втрати активної потужності в різних елементах конструкції. До основних із них належать:

Нагрівання обмоток статора через проходження електричного струму, що викликає теплові втрати: теплові втрати в короткозамкненій обмотці ротора, обумовлені струмом, що циркулює в ній; вихрові струми в магнітопроводі електродвигуна, які спричиняють додаткове нагрівання та втрати потужності; гістерезис у магнітопроводі, що виникає внаслідок циклічного перемагнічування, супроводжуючись втратами енергії; механічне тертя в елементах конструкції, зокрема в підшипниках, а також опір повітря, з яким контактує ротор під час обертання;

додаткові фактори, такі як неідеальності конструкції або нестабільність умов експлуатації, що сприяють збільшенню втрат.

Усі зазначені фізичні явища, за винятком перемагнічування і вихрових струмів, що спричиняють втрату активної потужності, враховуються в Г-подібній схемі заміщення АД з КЗР, що наведена на рисунку 2.2 [17].

Ця схема є корисним інструментом для моделювання та аналізу різних енергетичних втрат у електродвигуні. Вона дозволяє врахувати теплові втрати в обмотках статора та ротора, а також механічні втрати, що виникають у підшипниках і інших рухомих частинах. Моделювання за допомогою Г-подібної схеми дає можливість оптимізувати конструкцію та експлуатацію електродвигуна, знижуючи енерговитрати та підвищуючи його ефективність.

Усі приведені фізичні явища, за винятком вихрових струмів і перемагнічування, що спричиняють втрату активної потужності, враховуються в Г-подібній схемі заміщення АД з КР, що наведена на рисунку 2.2 [1].

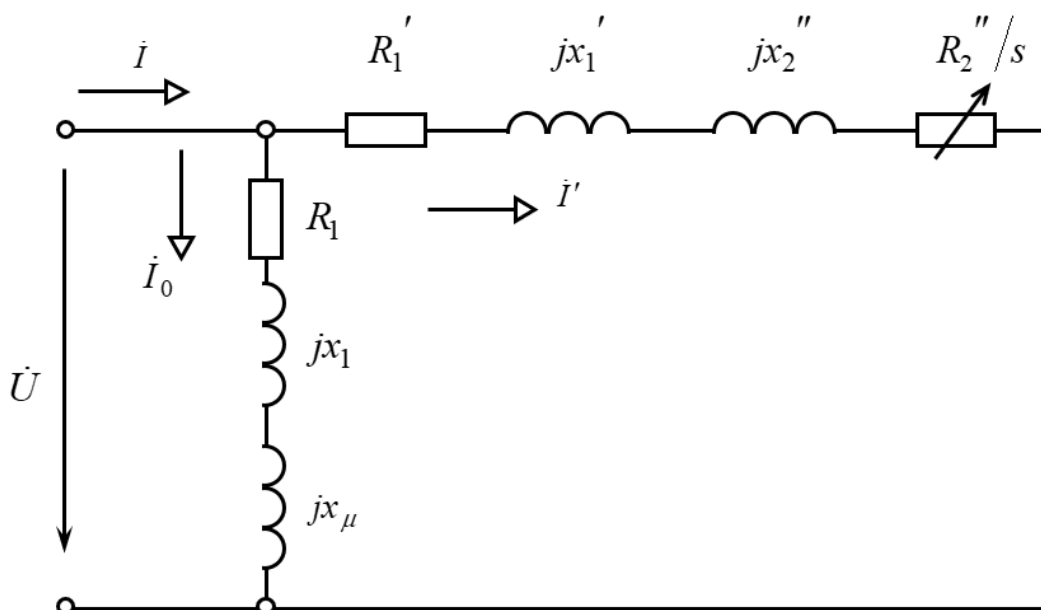


Рисунок 2.2. - Схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (для однієї фази).

Активна потужність, яку споживає асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, перетворюється в механічну потужність P_{mx} , що складається з таких компонентів: механічна потужність P_2 , яка передається через вал електродвигуна безпосередньо робочій машині для виконання корисної роботи;

механічна потужність P_m , що йде на обертання механічної системи самого електродвигуна, зокрема на тертя в підшипниках і обертання його внутрішніх елементів; механічна потужність P_∂ , яка враховує додаткові втрати в електродвигуні, зокрема втрати на тертя, вихрові струми, нагрівання, тощо та має вираз:

$$P_{mx} = P_2 + P_m + P_\partial, \quad (2.7)$$

Механічна потужність P_{mx} АД може бути визначена за допомогою [18]:

$$P_{mx} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (2.8)$$

Механічна потужність P_2 , яка передається РМ, залежить від моменту опору РМ M_c та кутової швидкості ω . Вона може бути виражена через наступним рівнянням:

$$P_2 = M_c \cdot \omega, \quad (2.9)$$

Механічна потужність P_m ЕД, яка передається в механічну систему електродвигуна, залежить від моменту тертя механічної системи M_m та кутової швидкості обертання вала ЕД ω . Це можна виразити таким чином:

$$P_m = M_m \cdot \omega, \quad (2.10)$$

Додаткові втрати активної потужності в ЕД можуть бути визначені за допомогою рівняння, яке враховує різні процеси та інші неідеальності в роботі двигуна. Вони можуть бути виражені наступним чином:

$$P_\partial = P_{mx} - P_2 - P_m, \quad (2.11)$$

Інші сумарні втрати активної потужності P_Σ в асинхронному електродвигуні можуть бути знайдені, використовуючи схему заміщення АД:

$$P_\Sigma = 3 \left(R_1' + R_2'' \right) I'^2 + 3R_1 I_0^2, \quad (2.12)$$

Для перевірки справедливості викладеного вище виразу для втрат активної потужності, можна застосувати практичний приклад асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором типорозміру AIP100S2, використовуючи його каталожні дані.

Номінальна потужність, кВт	ККД	Номінальна напруга, В	Коефіцієнт потужності
$P_{2H} = 4 \text{ кВт}$	$\eta_H = 0,865$	$U_H = 220 \text{ В}$	$\cos \varphi_H = 0,89$
Параметри схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна, Ом			
$R_1 = 1,485 \text{ Ом}$	$R_1' = 1,509 \text{ Ом}$	$R_2'' = 1,006 \text{ Ом}$	
$x_1 = 1,513 \text{ Ом}$	$x_1' = 1,537 \text{ Ом}$	$x_2'' = 2,767 \text{ Ом}$	$x_\mu = 95 \text{ Ом}$
Ковзання магнітного поля електродвигуна щодо його ротора			
$s_H = 0,033$	$s_K = 0,28$	$s_M = 0,8$	
Момент навантаження двигуна, Н·м			
$m_K = 2,5$		$m_M = 1,6$	

Аналіз проведемо для АЕ з КЗ АІР100S2 в номінальному режимі.

Механічна потужність електродвигуна $P_{МХН}$ в номінальному режимі визначається наступним чином:

$$P_{МХН} = 3R_2'' \frac{1-s_H}{s_H} I_H'^2, \quad (2.13)$$

I_H' сила електричного струму в гілці схеми заміщення асинхронного електродвигуна обчислюють за допомогою схеми заміщення АД:

$$I_H' = \frac{U_H}{\sqrt{\left(R_1' + R_2''/s_H\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}}, \quad (2.14)$$

Підставивши в (2.13) і (2.14) значення параметрів та знаходимо мех. потужн:

$$P_{МХН} = 4112 \text{ Вт},$$

Знаходимо сумарні втрати активної потужності АД з КЗ P_m і додаткові P_δ в механічній системі ЕД:

$$P_m + P_\delta = P_{МХН} - P_{2H}, \quad (2.15)$$

Підставивши значення знайдених $P_m + P_\delta$ потужностей, отримаємо наступне:

$$P_m + P_\delta = 4112 - 4000 = 112 \text{ Вт},$$

Знаходимо інші $P_{\Sigma H}$ сумарні втрати активної потужності ЕД:

$$P_{\Sigma H} = 3 \left(R_1' + R_2'' \right) I_H'^2 + 3 R_1 I_0^2, \quad (2.16)$$

$$\text{де } I_0 = \frac{U_n}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}}, \quad (2.17)$$

Підставивши необхідні значення величин $P_{\Sigma n}$ в (2.16) і (2.17), отримаємо:

$$P_{\Sigma n} = 3(1,529 + 1,006)6,815^2 + 3 \cdot 1,485 \cdot 2,28^2 = 350 + 23 = 373 \text{ Вт},$$

Сукупні загальні втрати активної потужності $\Delta P_n'$ в АД під час роботи в номінальному режимі, що включають втрати в обмотках статора і ротора, втрати в магнітопроводі, механічні втрати від тертя та вентиляції, а також інші додаткові втрати, характерні для даного режиму експлуатації АД, отримаємо:

$$\Delta P_n' = P_{\Sigma n} + P_m + P_\partial, \quad (2.18)$$

Підставивши необхідні значення величин $\Delta P_n'$ в (2.18):

$$\Delta P_n' = 373 + 112 = 485 \text{ Вт},$$

Визначимо втрати за каталожним даними ΔP_n , ці втрати можна обчислити на основі каталожних даних, що містять інформацію про номінальні параметри електродвигуна:

$$\Delta P_n = \frac{P_{2n}}{\eta_n} - P_{2n}, \quad (2.19)$$

Підставивши значення P_{2n} й η_n , отримаємо:

$$\Delta P_n = \frac{4000}{0,865} - 4000 = 624 \text{ Вт},$$

Аналізуючи каталожні дані, спостерігаємо, що втрати активної потужності в електродвигуні перевищують ті, які були визначені розрахунковим методом. Це зумовлено тим, що Г-подібна схема заміщення не враховує втрати, пов'язані з магнітопроводом, зокрема на гістерезис і вихрові струми. Для визначення цих втрат розраховують різницю між значеннями активних втрат, отриманих за каталожними даними, і розрахованими за параметрами схеми заміщення:

$$P_m = \Delta P_n - \Delta P_n' = 624 - 485 = 139 \text{ Вт}, \quad (2.20)$$

Визначаємо постійні втрати ΔP_{const_n} активної потужності в АД з КЗ при номінальному режимі роботи самого ЕД та РМ:

$$\Delta P_{const_n} = P_m + P_{\partial} + P_0 + 3R_1 I_0^2 = 139 + 112 + 23 = 274 \text{ Вт}, \quad (2.21)$$

Визначаємо змінні втрати ΔP_{var_n} активної потужності в АД з КЗ при номінальному режимі роботи самого ЕД та РМ:

$$\Delta P_{var_n} = P_{\Sigma_n} - 3R_1 I_0^2 = 373 - 23 = 350 \text{ Вт}, \quad (2.22)$$

Коефіцієнт втрат активної потужності a в АД з КЗ визначається як відношення постійних втрат ΔP_{const_n} до змінних втрат ΔP_{var_n} у ном. режимі роботи ЕД:

$$a = \frac{\Delta P_{const_n}}{\Delta P_{var_n}} = \frac{274}{350} = 0,78 \quad (2.23)$$

Сумарні втрати ΔP активної потужності даного АД з КЗ:

$$\Delta P = P_m + P_{\partial} + P_0 + P_{\Sigma} + P_m, \quad (2.33)$$

Механічна потужність P_2 яка передається з ЕД на вал робочої машини РМ

$$P_2 = P_{mx} - P_m - P_{\partial}. \quad (2.34)$$

Досліджуючи втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні, необхідно врахувати вплив температури на активний опір обмоток, оскільки з підвищенням температури опір матеріалів збільшується. Це призводить до додаткових втрат енергії у вигляді тепла, оскільки потужність, що витрачається на нагрівання обмоток, збільшується пропорційно зростанню опору. Зміна активного опору обмоток при нагріванні впливає на загальний рівень втрат потужності в електродвигуні. Зокрема, це проявляється у збільшенні втрат на Joule-ефект (теплові втрати через опір проводів), що зумовлює додаткове теплове навантаження на двигун і може скорочувати його ефективність. Тому для точних розрахунків втрат необхідно враховувати температуру обмоток та зміни опору в процесі роботи двигуна.

Втрати активної потужності ΔP_y в АД з КЗ в сталому режимі, який запишеться в такий спосіб:

$$\Delta P_y = \Delta P_{c.n} + \kappa^2 \Delta P_{m.n} (1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{cp} - 75)), \quad (2.38)$$

Стале перевищення температури обмотки τ_y над температурою навколишнього середовища, °C:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + \kappa^2(1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75))}{a + 1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75) - \alpha\tau_n(\kappa^2 - 1)}, \quad (2.44)$$

Проведемо розрахунок втрат для електродвигуна AIP100S2, результати занесемо в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані розрахунків втрат для електродвигуна типу AIP100S2.

s	I'^2	κ^2	P_{mx}	$P_m + P_o$	P_0	P_Σ	τ_y	P_m	ΔP	P_2	$\frac{\Delta P}{P_2}$
	A ²		Вт	Вт	Вт	Вт	°C	Вт	Вт	Вт	
0,005	1,18	0,025	708	112	23	9	36	139	283	596	0,47
0,01	4,62	0,1	1380	112	23	38	39	139	312	1268	0,25
0,015	10,25	0,22	2031	112	23	85	45	139	359	1919	0,19
0,02	17,9	0,38	2647	112	23	152	53	139	426	2535	0,17
0,025	27,5	0,59	3236	112	23	245	64	139	519	3124	0,16
0,03	38,9	0,83	3795	112	23	363	78	139	637	3683	0,17
0,035	52,04	1,12	4330	112	23	521	97	139	791	4218	0,18
0,04	66,7	1,43	4831	112	23	672	100	139	950	4713	0,2
0,045	82,4	1,77	5277	112	23	969	152	139	1243	5165	0,26
0,05	99,6	2,14	5711	112	23	1302	193	139	1576	5599	0,28
0,055	118,05	2,54	6121	112	23	1739	244	139	2013	6009	0,32
0,06	137,6	2,96	6506	112	23	2362	317	139	2636	6394	0,41

2.2 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції ковзання.

Змінні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні безпосередньо залежать від величини ковзання, яке характеризує відносну різницю між синхронною та фактичною швидкістю обертання ротора. Ці втрати включають складові, пов'язані зі струмом у роторі, оскільки при збільшенні ковзання струм у роторі зростає, що призводить до зростання втрат енергії.

Залежність змінних втрат від ковзання описується нелінійною функцією, оскільки втрати мають квадратичний характер щодо струму. При малих значеннях ковзання змінні втрати є мінімальними, але зі збільшенням ковзання (наприклад, при підвищеному навантаженні або пуску двигуна) ці втрати значно зростають. Аналіз цієї залежності дозволяє оцінити енергетичну ефективність двигуна в різних режимах роботи та оптимізувати його експлуатацію.

Уточнена Г-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна (для однієї фази) відображає розподіл енергетичних процесів у більш деталізованій формі [19]. У такій схемі враховуються активні та реактивні параметри обмоток статора й ротора, втрати в магнітопроводі, а також додаткові складові, зумовлені нелінійністю магнітної системи та механічними втратами (рис. 2.3).

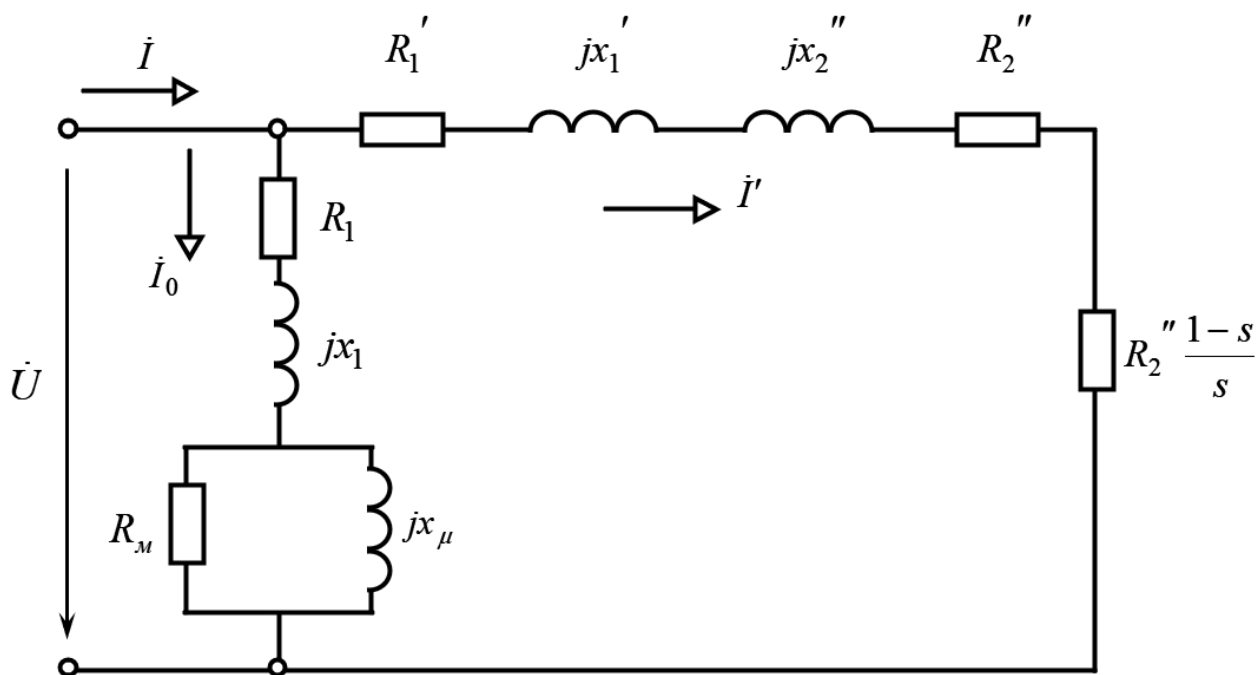


Рисунок - 2.3 Уточнена схема заміщення для однієї фази АД.

Для АД типорозміру AIP100S2 втрати в магнітопроводі визначені як 139,1Вт. Ці втрати можуть бути представлені у вигляді еквівалентного активного опору магнітопроводу, який становить 348,21 Ом. Цей опір враховує енергетичні втрати, зумовлені явищами гістерезису та вихрових струмів у магнітопроводі, і використовується в схемі заміщення для точнішого розрахунку параметрів двигуна в номінальному режимі роботи.

Комплексне значення сили струму, що протікає через намагнічувальний контур $\dot{I}_0$, відображає спільну дію активної та реактивної складових струму. Це значення може бути записане у вигляді:

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}}{R_1 + jx_1 + \frac{R_m \cdot jx_\mu}{R_m + jx_\mu}} = I_0 e^{-j\varphi_0}, \quad (2.47)$$

Комплексна повна потужність у намагнічувальному контурі асинхронного електродвигуна враховує як активну, так і реактивну складові. Її можна записати у вигляді прийнявши $\psi_u = 0$:

$$\tilde{S}_0 = \dot{U} \dot{I}_0^* = UI_0 e^{j\varphi_0} = S_0 e^{j\varphi_0}, \quad (2.48)$$

Для побудови комплексу повної потужності на комплексній площині використовуємо прямокутну систему координат, де [19]:

$$P_0 = S_0 \cos \varphi_0, \quad (2.49)$$

Експериментальні вимірювання діючого значення струму холостого ходу $I_{x.x}$ і коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{x.x}$ дозволяють уточнити розрахунок постійних втрат активної потужності при номінальному режимі роботи ($U = U_n$) асинхронного електродвигуна. Це можливо завдяки тому, що такі втрати враховують і втрати в магнітопроводі, механічні і додаткові втрати:

$$\Delta P_{c.n} = 3U_n \cdot I_{x.x} \cdot \cos \varphi_{x.x}, \quad (2.50)$$

Комплексне діюче значення сили струму в іншій вітці схеми заміщення асинхронного електродвигуна враховує параметри електричної гілки та їх взаємодію. Комплекс струму $\dot{I}'$ можна записати як:

$$\dot{I}' = \frac{\dot{U}}{R_1' + R_2'' + j\left(x_1' + x_2''\right) + R_2'' \frac{1-s}{s}}, \quad (2.51)$$

Уведемо, для спрощення наступне позначення:

$$Z = R_1' + R_2'' + j\left(x_1' + x_2''\right), \quad (2.52)$$

Тоді з врахуванням (2.52)

$$\dot{I}' = \frac{\dot{U}}{Z + R_2'' \frac{1-s}{s}}, \quad (2.53)$$

Потім виконаємо перетворення виразу (2.53):

$$\dot{I}' = \frac{\frac{\dot{U}}{Z}}{1 + \frac{R_2'' \frac{1-s}{s}}{Z}} = \frac{\dot{I}'_{\kappa}}{1 + \frac{s}{z} e^{j\psi}}, \quad (2.54)$$

$$\text{де } \dot{I}'_{\kappa} = \frac{\dot{U}}{Z}, \quad (2.55)$$

Вираз (2.54) є рівнянням кругової діаграми струму $\dot{I}'$.

$$Z = ze^{j\phi'}, \quad (2.56)$$

$$\phi' = \text{arccctg} \frac{R_1' + R_2''}{x_1 + x_2}, \quad (2.57)$$

$$z = \sqrt{\left(R_1' + R_2''\right)^2 + \left(x_1 + x_2\right)^2}, \quad (2.58)$$

$$\psi = -\phi', \quad (2.59)$$

$$\dot{U} = Ue^{j\psi_u}, \quad (2.60)$$

А прийнявши $\psi_u = 0$ визначимо комплекс діючого значення напруги:

$$\dot{U} = U, \quad (2.61)$$

Потім для зазначеної вітки запишемо комплекс повної потужності:

$$\tilde{S}' = \dot{U} I'^*, \quad (2.62)$$

$$\text{де } I'^* = I' e^{j\phi'}, \quad (2.63)$$

$$\text{Тоді } \tilde{S}' = UI' e^{j\phi'} = S' e^{j\phi'}, \quad (2.64)$$

Запишемо комплекс повної потужності в іншому вигляді:

$$\tilde{S}' = \dot{U} \frac{I'_{\kappa}^*}{1 + \frac{s}{z} e^{j\psi}}, \quad (2.65)$$

реальній складовій потужності, яка виконує корисну роботу в системі.

$$P' = S' \cos \varphi', \quad (2.68)$$

На вал ЕД передається активна потужність та має вираз:

$$P_2 = R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (2.69)$$

Змінні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні визначаються як втрати, що змінюються в залежності від режиму роботи двигуна:

$$\Delta P_M = 3(P' - P_2), \quad (2.70)$$

Сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні включають як постійні, так і змінні втрати, які можна обчислити за допомогою таких компонентів:

$$\Delta P = \Delta P_{с.н} + \Delta P_M, \quad (2.71)$$

Рівняння (2.70) можна переписати в іншому вигляді:

$$\Delta P_M = 3 \frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s} P'. \quad (2.72)$$

Таким чином, використовуючи кругову діаграму комплексу повної потужності, можна визначити змінні втрати активної потужності $\tilde{S}'$, які залежать від ковзання s . Ця діаграма дозволяє наочно відобразити взаємозв'язок між активною, реактивною і повною потужністю в асинхронному електродвигуні, враховуючи зміну навантаження і ковзання. Змінні втрати активної потужності можна отримати шляхом проектування комплексної потужності на відповідні осі діаграми. Розрахунок кругової діаграми комплексу повної потужності для електродвигуна типорозміру АІР100S2 можна представити наступним чином:

$$Z = R_1' + R_2'' + j(X_1' + X_2'') = 4,985e^{j60^\circ} \text{ Ом},$$

$$I_K' = \frac{\dot{U}}{Z} = 44,13e^{-j60^\circ} \text{ А},$$

$$\tilde{S}_K' = \dot{U} I_K'^* = 9708,6e^{j60^\circ} \text{ ВА}.$$

2.3 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції завантаження на валу з боку робочої машини.

Основне рівняння руху електроприводу робочої машини можна записати як рівняння, яке зв'язує механічну потужність, що передається від електродвигуна до робочої машини, з динамікою обертання. Загальна форма рівняння руху для електроприводу виглядає так:

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_c = M, \quad (2.73)$$

У сталому режимі можна представити наступним чином:

$$M_c = M, \quad (2.74)$$

Вираз моменту опору робочої машини запишемо емпіричним чином:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (2.75)$$

$$M_{сн} = k_3 M_n, \quad (2.76)$$

Для побудови механічних характеристик електродвигуна та робочої машини на робочій ділянці можна представити графічно (рис.2.5) їх взаємодію через криві моменту та потужності.

Для того щоб знайти залежність моменту опору M_c у функції коефіцієнта завантаження k_3 та ковзання s , потрібно підставити відповідні вирази в рівняння (2.76), яке описує момент опору робочої машини при.

$$M_{сн} = k_3 M_n, \quad (2.77)$$

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{1-s}{1-s_n}, \quad (2.78)$$

У результаті отримаємо наступний вираз:

$$M_c = M_0 + (k_3 M_n - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x, \quad (2.79)$$

Щоб знайти залежність моменту M в асинхронному електродвигуні у функції ковзання s , розглянемо трикутники, які можуть допомогти в описі цієї залежності [19].

$$\frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0 - \omega} = \frac{M_H}{M}, \quad (2.80)$$

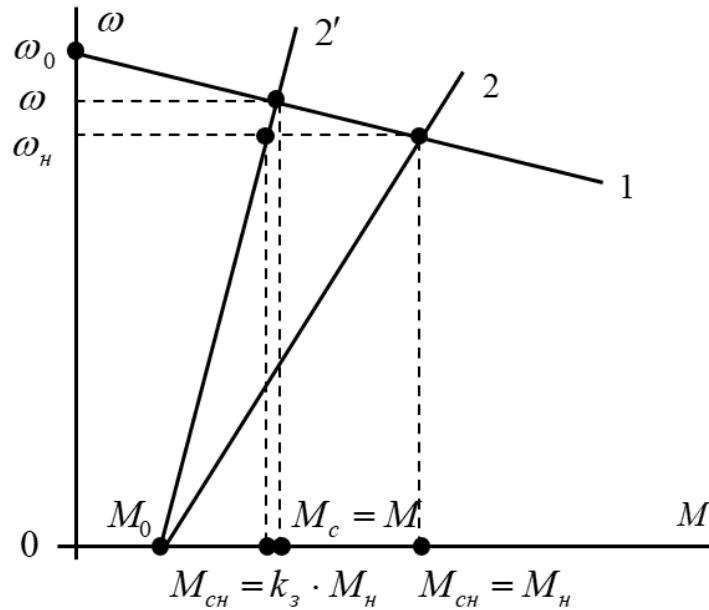


Рисунок 2.5. – Механічні характеристики електродвигуна 1 і робочої машини при різному завантаженні 2 і 2'.

Після перетворення отримаємо наступний вираз:

$$M = M_H \frac{s}{s_H}, \quad (2.81)$$

Підставляємо формули (2.79) і (2.81) в вираз (2.75) і отримуємо:

$$M_H \frac{s}{s_H} = M_0 + (k_z M_H - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x, \quad (2.82)$$

Потім перепишемо вираз (2.82) у відносних одиницях:

$$\frac{s}{s_H} = m_0 + (k_z - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x, \quad (2.83)$$

$$\text{де } m_0 = \frac{M_0}{M_H}. \quad (2.84)$$

Для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x = 0$) залежність ковзання s від коефіцієнта завантаження k_z можна знайти, розглядаючи основні рівняння, що зв'язують ці параметри:

$$s = s_H k_z. \quad (2.85)$$

Для проведення розрахунку ковзання для електродвигуна типорозміру АІР100S2, необхідно врахувати кілька параметрів, що визначають його роботу в різних режимах навантаження. Зокрема, ми повинні використовувати параметри, які стосуються механічних характеристик електродвигуна та робочої машини. Результати заносимо до табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Залежність ковзання s від завантаження k_3 ЕД.

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
s	0,007	0,010	0,013	0,017	0,020	0,023	0,026	0,030	0,033	0,036	0,040

Побудова залежності ковзання s електродвигуна від коефіцієнта завантаження k_3 представлено на графіку (рис. 2.6), які виконані на основі виконаних розрахунків залежності ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження (табл. 2.2).

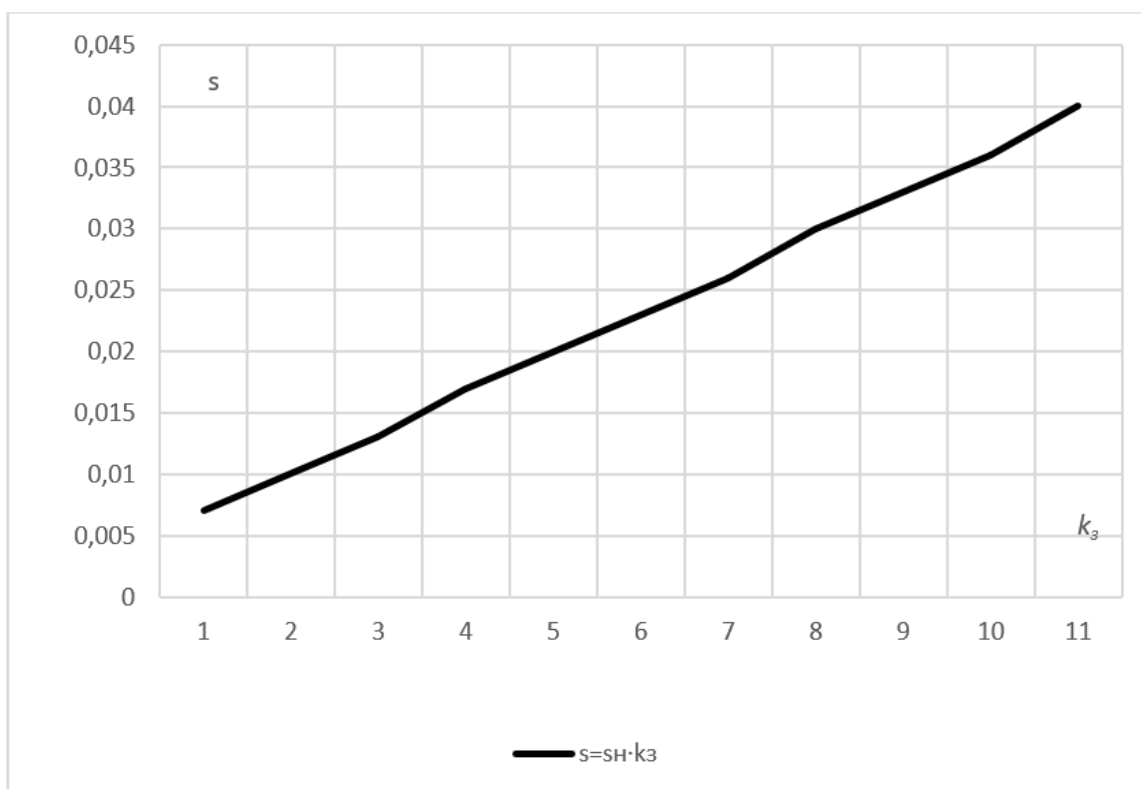


Рисунок 2.6. – Залежність ковзання s ЕД від коефіцієнта завантаження k_3 .

Потім проводимо аналітичні розрахунки втрати активної потужності в ЕД типорозміру АІР100S2 за допомогою кругової діаграми потужності (рис.2.5). Результати аналітичних досліджень заносимо в табл. 2.3.

Таблиця 2.3-Визначення втрати активної потужності за круговою діаграмою

k_3	s	$R_2'' \frac{1-s}{s}$ O_M	AN мм	$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	$O''L$ мм	P' Вт	ΔP_M Вт	P_2 Вт	ΔP_{const} Вт	ΔP Вт
0,2	0,007	142,7	713,5	0,017	5,62	421	7,17	414	274	281
0,3	0,01	99,6	498	0,024	11	852	20,4	832	274	294
0,4	0,013	76,4	382	0,031	17	127	39,5	1235	274	313
0,5	0,017	58,2	291	0,04	24,5	1837	73,5	1764	274	347
0,6	0,02	49,3	246	0,048	30	2250	108	2142	274	382
0,7	0,023	42,7	213	0,054	35,5	2662	143,8	2519	274	417,8
0,8	0,026	37,7	188	0,061	40,8	3060	186,6	2873	274	460,7
0,9	0,03	32,5	162	0,069	47,9	3592	248	3345	274	522
1	0,033	29,5	147	0,076	58	4350	330,6	4019	274	604,6
1,1	0,036	26,9	134	0,083	59	4361	362	4058	274	641,3
1,2	0,04	24,1	120,5	0,091	64,8	4860	442	4418	274	716

Побудова графіку залежності втрат активної потужності в обмотках ΔP_M асинхронного електродвигуна від коеф. завантаження k_3 представлено на рис.2.7.

$$\Delta P_M = f(k_3)$$

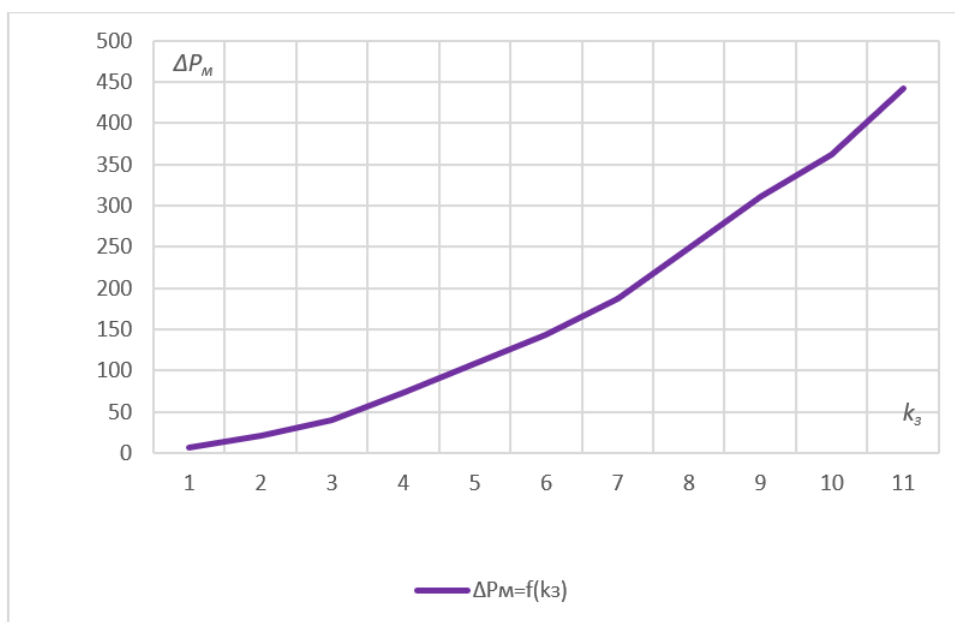


Рисунок 2.7. – Залежність втрат активної потужності в обмотках ΔP_M у функції коефіцієнта завантаження k_3 .

Далі будемо залежність втрат активної потужності в цілому ΔP в асинхронному електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження k_3 (рис. 2.8), яка

представлена залежністю: $\Delta P = f'(k_3)$.

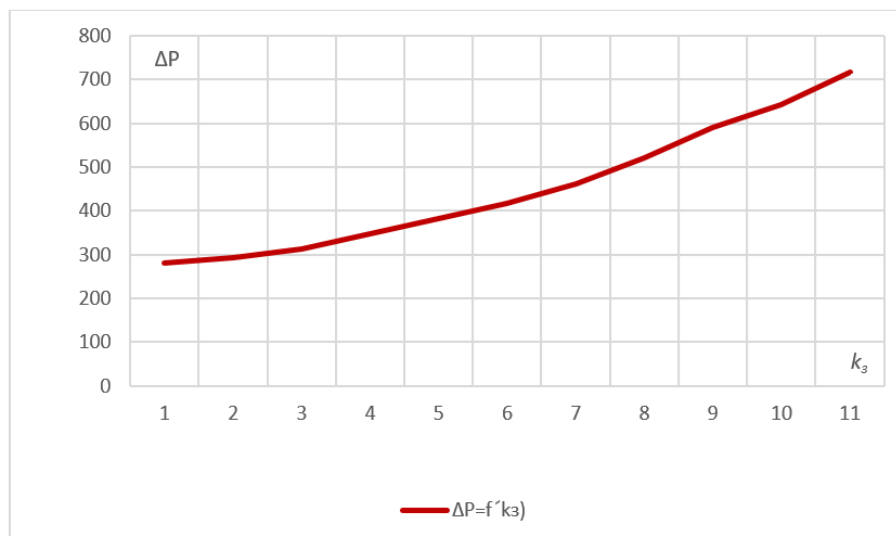


Рисунок 2.8. – Залежність втрат активної потужності в цілому ΔP у функції коефіцієнта завантаження k_3 .

Далі будуюмо залежність коефіцієнта втрат активної потужності κ_ϵ в ЕД без обліку росту опору обмоток при нагріванні (рис. 2.9.) необхідно врахувати лише змінні та постійні втрати активної потужності в АД при номінальному режимі роботи, не враховуючи температурні ефекти на опір обмоток, за виразом:

$$\kappa_\epsilon = \frac{\Delta P}{P_2}$$

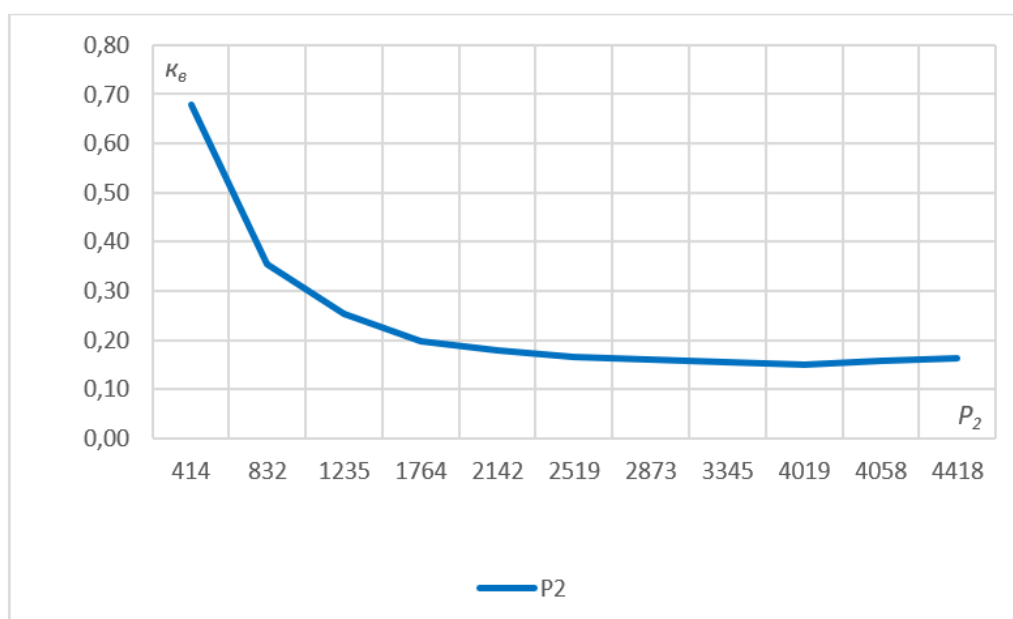


Рисунок 2.9. – Залежність коефіцієнта втрат κ_ϵ без обліку росту опору обмоток при нагріванні електродвигуна.

Коефіцієнт перетворення електричної енергії в електродвигуні можна визначити як відношення фактичних втрат активної потужності ΔP в електродвигуні до номінальних втрат активної потужності ΔP_n , що відображає ефективність використання енергії при різних режимах роботи електродвигуна.

$$k_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}.$$

Для зазначеного електродвигуна номінальні втрати становлять $\Delta P_n = 624 \text{ Вт}$. Розрахуємо значення коефіцієнта k_{ne} . Результати заносимо в табл. 2.4.

Таблиця 2.4-Розрахунки коефіцієнта перетворення електричної енергії k_{ne} .

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
k_{ne}	0,451	0,472	0,502	0,557	0,612	0,670	0,738	0,836	0,938	1,028	1,148

Будуємо залежність коефіцієнта перетворення електричної енергії k_{ne} у функції коефіцієнта завантаження k_z електродвигуна АІР100S2 (рис. 2.10).

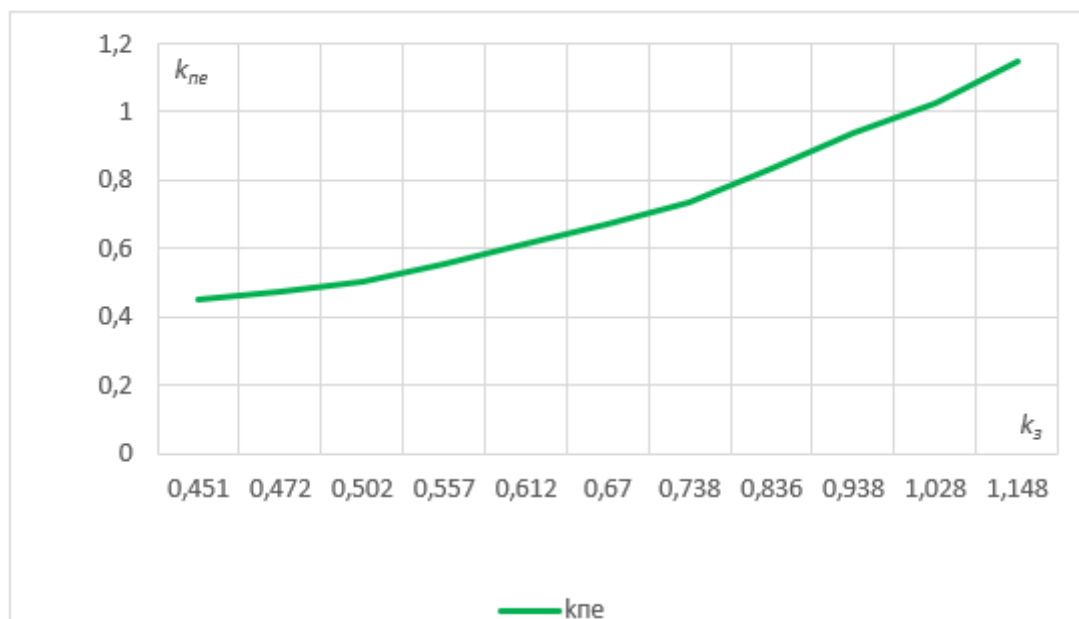


Рисунок 2.10. – Залежність коефіцієнта перетворення електричної енергії k_{ne} у функції коефіцієнта завантаження k_z електродвигуна.

Отже, при номінальній напрузі ковзання асинхронного електродвигуна залежить від моменту рушання (m_0) робочої машини, коефіцієнта її завантаження (k_z) та номінального ковзання (s_n). Це дозволяє точніше визначати параметри

роботи електродвигуна в різних режимах, включаючи стартовий режим, коли навантаження може бути мінімальним або максимальним.

Втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні безпосередньо пов'язані з коефіцієнтом завантаження (k_s) робочої машини. Незалежно від характеру механічної характеристики робочої машини, ці втрати однакові для приводів з різними типами характеристик - незалежною від швидкості, лінійно зростаючою або параболічною. Це означає, що для всіх зазначених типів характеристик втрати потужності в електродвигуні змінюються за схожим законом, що дозволяє застосовувати різні методи для розрахунку втрат у різних умовах роботи.

2.4 Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції рівня напруги живлення й завантаження на валу з боку робочої машини.

Для аналізу впливу зниження напруги на роботу електродвигуна використовується порівняння його механічних характеристик за різних умов. Зокрема, характеристика 1 відображає роботу двигуна при номінальній напрузі, тоді як характеристика 2 демонструє зміну параметрів за умов зниженої напруги. Механічна характеристика робочої машини, позначена як характеристика 3, дозволяє визначити точку їх взаємодії. На рис. 2.11 показані всі зазначені характеристики, які дають змогу оцінити, як зниження напруги впливає на момент двигуна, швидкість обертання, а також взаємодію з навантаженням [19].

Розпочинаємо розрахунки з подібних трикутників та маємо вираз:

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_n} = \frac{M}{k_u M_n}, \quad (2.91)$$

звідки виконаємо перетворення та знаходимо:

$$M = \frac{s}{s_n} k_u^2 M_n, \quad (2.92)$$

Підставляємо (2.92) і (2.79) в (2.75):

$$\frac{k_u^2 M_H}{s_H} s = M_0 + (k_z M_H - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x, \quad (2.93)$$

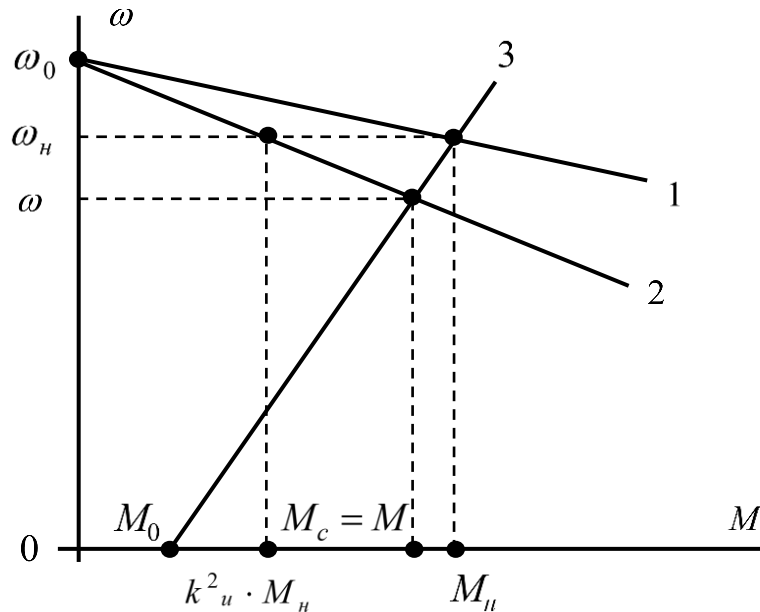


Рисунок 2.11. – Механічні характеристики робочої машини та асинхронного електродвигуна при номінальному режимі.

Перепишемо рівняння (2.93) у відносних одиницях:

$$k_u^2 \frac{s}{s_H} = m_0 + (k_z - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x, \quad (2.94)$$

Для визначення залежності ковзання s від кратності прикладеної напруги k_u і коефіцієнта завантаження k_z , необхідно врахувати взаємозв'язок між моментом на валу, прикладеною напругою і механічними характеристиками електродвигуна.

Для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x = 0$), де момент опору не залежить від швидкості обертання, можна записати:

$$s = \frac{k_z}{k_u^2} s_H. \quad (2.95)$$

Для аналізу впливу збільшення поданої напруги на функціонування асинхронного електродвигуна застосовуються механічні характеристики, що відображають різні режими роботи. Перша з них (характеристика 1) описує поведінку двигуна при стандартній номінальній напрузі $U_{ном}$, друга (характеристика 2)

ілюструє роботу двигуна при підвищеній напрузі $U > U_{ном}$. Додатково розглядається механічна характеристика навантаження робочої машини (характеристика 3), яка відображає залежність моменту опору M від швидкості обертання (рис. 2.12).

Проведемо наступні перерахунки з подібних трикутників запишемо:

$$\frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0 - \omega} = \frac{M_n k_u^2}{M}, \quad (2.100)$$

Звідки, проводячи перетворення знаходимо:

$$M = \frac{M_n k_u^2}{s_n} s. \quad (2.101)$$

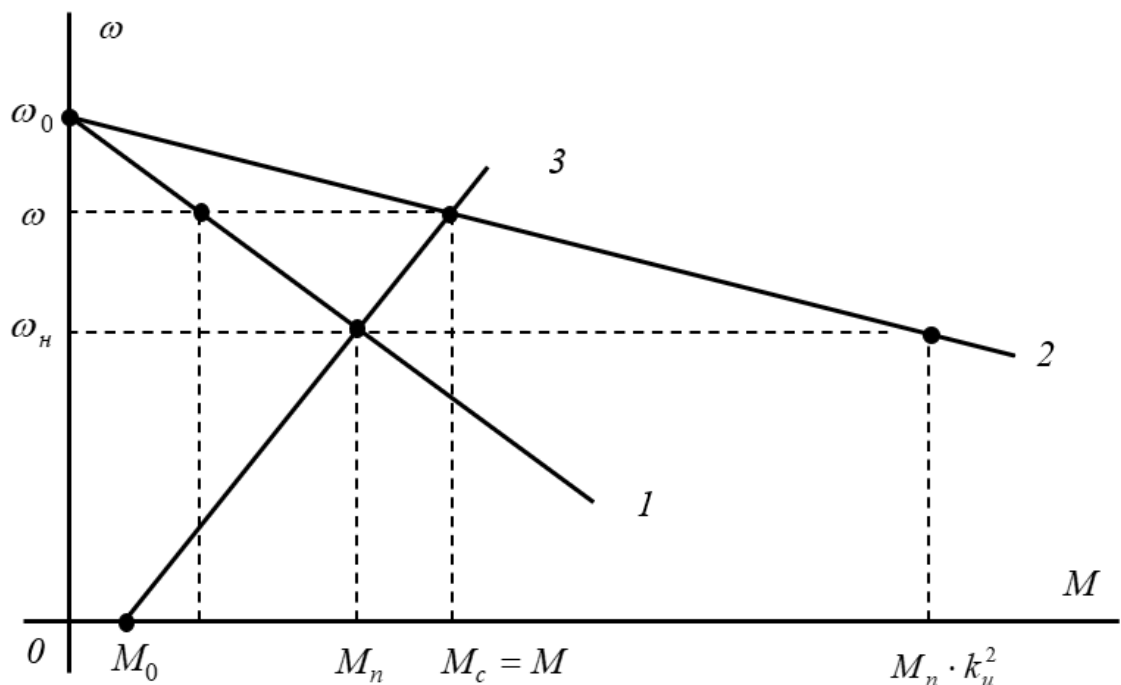


Рисунок 2.12. – Механічні характеристики робочої машини і асинхронного електродвигуна в режимі зміни напруги.

Отже, отримано вираз для моменту, створюваного електродвигуном, який є ідентичним до формули (2.92). Залежність ковзання s від кратності прикладеної напруги та коефіцієнта завантаження визначається рівняннями (2.95). Проведений аналіз показує, що зі зростанням напруги ковзання s зменшується, що супроводжується зниженням струму в обмотках. Водночас збільшується магнітний струм, що призводить до підвищення втрат активної потужності в магнітопроводі. Така поведінка вказує на необхідність оптимального вибору режимів

роботи електродвигуна для забезпечення енергоефективності й зниження теплових втрат.

Виконаємо обчислення ковзання s для електродвигуна моделі AIP100S2 за різних значень коефіцієнта зниження напруги (k_u) - 0,8; 0,85; 0,9; та 1,0; 1,1. Результати розрахунків узагальнено та представлені в таблиці 2.5. Це дозволяє оцінити вплив зміни напруги на ковзання s та робочі характеристики електродвигуна.

Таблиця 2.5 Дослідження ковзання s електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u

k_z	s				
	$k_u=0,8$	$k_u=0,85$	$k_u=0,9$	$k_u=1,0$	$k_u=1,1$
0,2	0,01	0,009	0,008	0,007	0,0055
0,3	0,015	0,014	0,012	0,01	0,0082
0,4	0,021	0,018	0,016	0,013	0,0109
0,5	0,026	0,023	0,02	0,017	0,0136
0,6	0,031	0,027	0,024	0,02	0,0164
0,7	0,036	0,032	0,028	0,023	0,0191
0,8	0,041	0,036	0,033	0,026	0,0218
0,9	0,046	0,04	0,037	0,03	0,0245
1	0,052	0,046	0,041	0,033	0,0273
1,1	0,056	0,05	0,045	0,036	0,03
1,2	0,062	0,055	0,049	0,04	0,0327

Проводимо аналіз втрат активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми для коефіцієнта зниження напруги $k_u=0,8$. Результати розрахунків заносимо в таблицю 2.6, що відображає вплив зниженої напруги на втрати потужності в різних компонентах двигуна, таких як обмотки, магнітопрвід і механічна система.

Таблиця 2.6 – Значення втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми при коефіцієнті напруги $k_u=0,8$

k_s	$R_2'' \frac{1-s}{s} \text{ Ом}$	AN мм	$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	$O''L$ мм	P' Вт
$k_u=0,8$					
0,2	99,6	498	0,025	11,2	536,2
0,3	66,1	330	0,037	17,2	823,2
0,4	46,9	234	0,051	24,2	1162
0,5	37,7	188	0,063	30	1440
0,6	31,4	157	0,074	38,4	1843
0,7	26,9	134	0,085	40,7	1956
0,8	23,5	117	0,097	46	2208
0,9	20,9	104	0,108	51	2449
1	18,3	91,7	0,121	56,9	2729
1,1	17	84,8	0,129	60,6	2909
1,2	15,2	76,1	0,142	66	3169

Проводимо аналітичне дослідження втрат активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми для коефіцієнта зниження напруги $k_u=0,85$. Результати розрахунків заносимо в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Значення втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми при коефіцієнті напруги $k_u=0,85$

k_s	$R_2'' \frac{1-s}{s} \text{ Ом}$	AN мм	$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	$O''L$ мм	P' Вт
$k_u=0,85$					
0,2	110,8	554	0,022	13,9	753
0,3	70,9	354	0,034	20,6	1117
0,4	54,9	274	0,044	28,5	1544
0,5	42,7	214	0,056	34,9	1891
0,6	36,3	181	0,065	41,1	2227
0,7	30,4	152	0,076	47,1	2552
0,8	26,9	135	0,085	53	2872
0,9	24,1	121	0,094	58,6	3175
1	20,9	104	0,108	65,2	3533
1,1	19,1	96	0,116	69,4	3761
1,2	17,3	86	0,127	75,5	4091

Проводимо аналітичне дослідження втрат активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми для коефіцієнта зниження напруги $k_u=0,9$. Результати розрахунків заносимо в таблицю 2.8.

Таблиця 2.8 – Значення втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми при коефіцієнті напруги $k_u=0,9$

k_s	$R_2'' \frac{1-s}{s} \text{ Ом}$	AN мм	$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	$O''L$ мм	P' Вт
$k_u=0,9$					
0,2	125	624	0,02	12	747
0,3	83	414	0,03	18	1114
0,4	62	309	0,04	24	1473
0,5	49	246	0,05	30	1829
0,6	41	205	0,06	36	2172
0,7	35	175	0,07	41	2512
0,8	29	147	0,08	48	2926
0,9	26	131	0,09	53	3248
1	24	118	0,1	59	3560
1,1	21	107	0,11	64	3870
1,2	20	98	0,11	69	4167

Проводимо аналітичне дослідження втрат активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми для коефіцієнта зниження напруги $k_u=1,1$. Результати розрахунків заносимо в таблицю 2.9.

Таблиця 2.9 – Значення втрати активної потужності в електродвигуні за допомогою кругової діаграми при коефіцієнті напруги $k_u=1,1$

k_s	$R_2'' \frac{1-s}{s} \text{ Ом}$	AN мм	$\frac{R_1' + R_2''}{R_1' + R_2''/s}$	$O''L$ мм	P' Вт
$k_u=1,1$					
0,2	183	917	0,014	22,4	1681
0,3	122	610	0,02	28,6	2148
0,4	91	456	0,027	34,8	2610
0,5	73	364	0,033	41	3075
0,6	60	302	0,04	47	3525
0,7	52	258	0,046	53	3975
0,8	45	226	0,053	58,7	4403
0,9	40	200	0,059	64,5	4838

1	36	179	0,066	69,3	5198
1,1	33	163	0,072	75,8	5683
1,2	30	149	0,078	81,3	6095

На основі отриманих розрахункових даних будуємо графіки, що ілюструють залежність ковзання s електродвигуна від коефіцієнта завантаження k_3 та коефіцієнта зниження напруги k_u (рис. 2.13). Ці графіки дозволяють візуально оцінити вплив зміни навантаження та напруги на робочі характеристики двигуна, що є важливим для аналізу його енергоефективності та стабільності роботи в умовах змінних режимів.

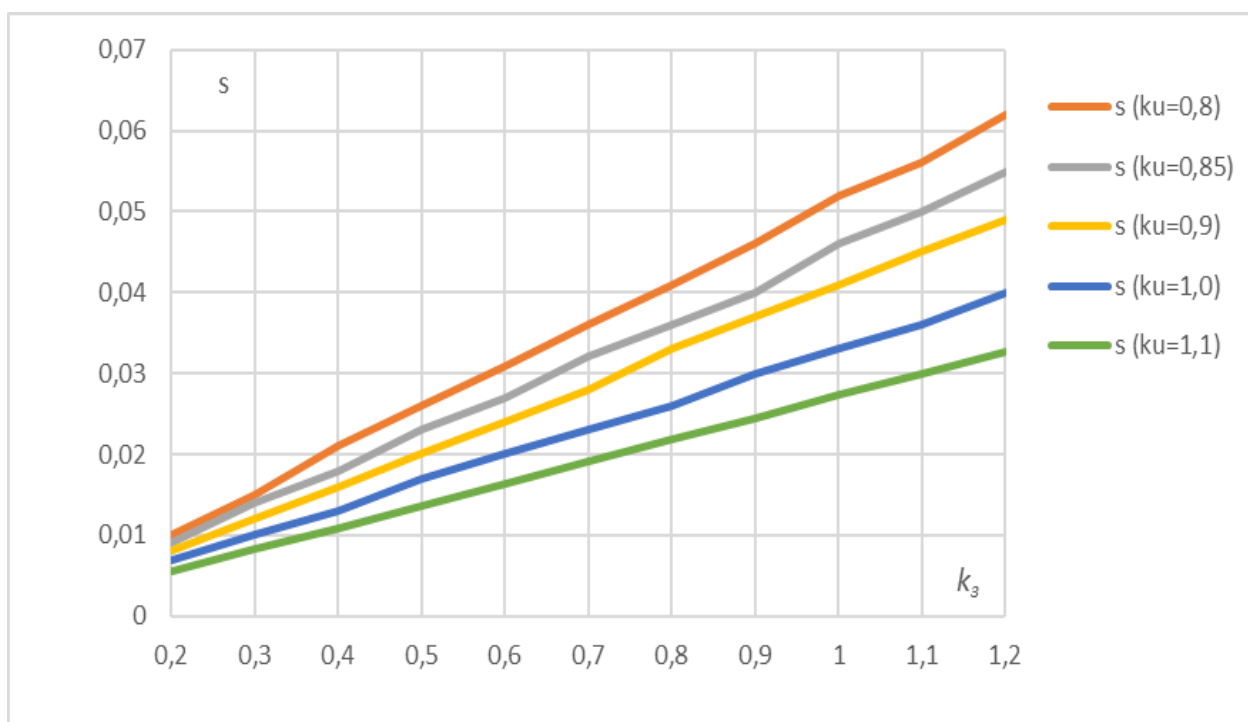


Рисунок 2.13. — Залежність ковзання електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u .

Залежність втрат активної потужності в обмотках електродвигуна від коефіцієнта завантаження та різних значень коефіцієнта напруги k_u відображає зміну енергетичних характеристик двигуна залежно від режиму його роботи.

$$\Delta P_m = f(\kappa_3)$$

Аналіз цих залежностей показує (табл. 2.10), що зі збільшенням коефіцієнта завантаження втрати активної потужності в обмотках зростають. При цьому зниження коефіцієнта напруги k_u спричиняє додаткове збільшення втрат через

підвищення струму в обмотках. Це пояснюється необхідністю компенсувати знижену напругу для забезпечення потрібного моменту на валу двигуна.

Таблиця 2.10 – Залежність втрат активної потужності в обмотках в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження та при різних значеннях коефіцієнта напруги k_u .

k_3	ΔP_m				
	$k_u=0,8$	$k_u=0,85$	$k_u=0,9$	$k_u=1,0$	$k_u=1,1$
0,2	8	12	12	7,17	23
0,3	19	28	27	20,4	43
0,4	38	49	47	39,5	70
0,5	58	76	72	73,5	103
0,6	87	104	102	108	141
0,7	107	141	137	143,8	184
0,8	136	177	186	186,6	233
0,9	169	216	231	248	286
1	211	275	278	330,6	340
1,1	240	316	330	362	408
1,2	288	375	385	442	475

На рисунку 2.14 наведено залежності втрат активної потужності в обмотках ΔP_m електродвигуна від коефіцієнта завантаження k_3 при різних значеннях коефіцієнта напруги k_u . Аналіз графіків демонструє, що зі збільшенням k_3 втрати ΔP_m зростають через підвищення струму в обмотках двигуна. Зменшення k_u додатково збільшує втрати, оскільки двигун працює у менш сприятливих умовах, що потребують більших струмів для підтримки необхідної механічної потужності.

Представимо залежність постійних втрат активної потужності в обмотках електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження k_u за різних значень коефіцієнта напруги k_u .

$$\Delta P_{const} = f(k_3)$$

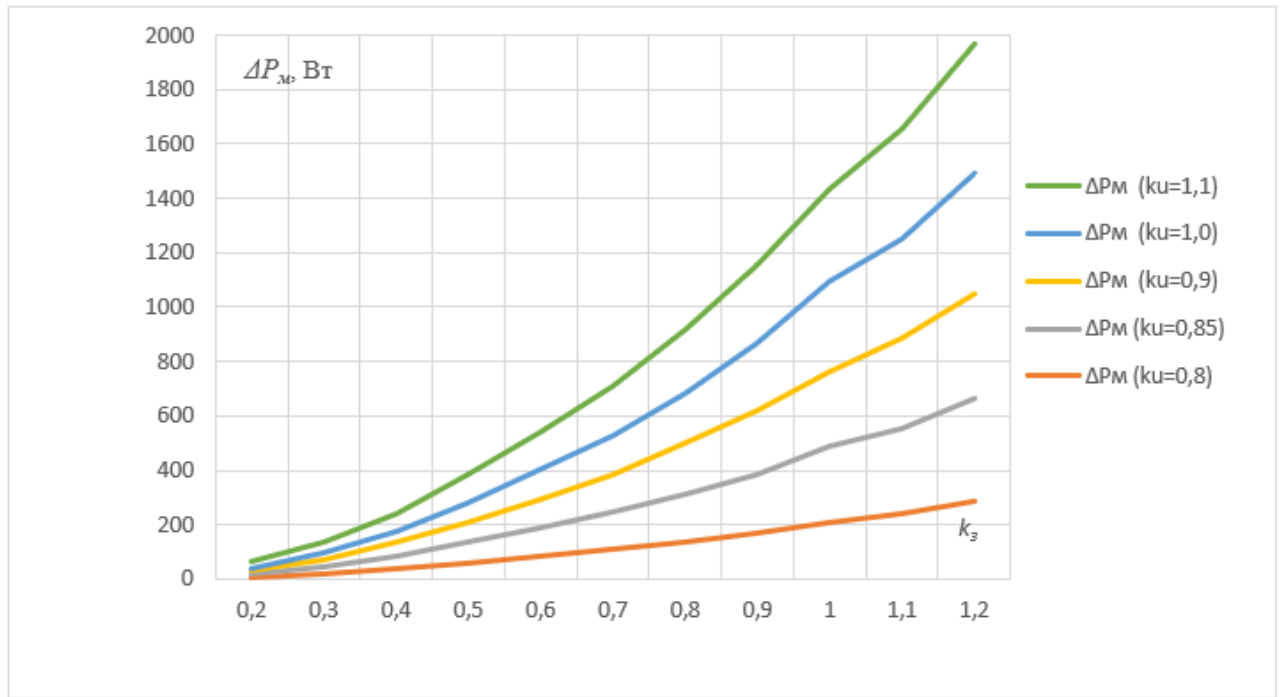


Рисунок 2.14. – Залежність втрат активної потужності в обмотках ΔP_m в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження k_z при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u .

Постійні втрати активної потужності залишаються майже незмінними при варіюванні k_u , оскільки вони визначаються магнітними та механічними особливостями двигуна, а не змінними струмами. Зменшення k_u призводить до зростання магнітних втрат через збільшення струму намагнічування, що відображає чутливість двигуна до змін напруги.

Таблиця 2.11 – Залежність постійних втрат активної потужності ΔP_{const} в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження k_z та при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u .

k_z	ΔP_{const}				
	$k_u=0,8$	$k_u=0,85$	$k_u=0,9$	$k_u=1,0$	$k_u=1,1$
0,2	175	198	222	274	332
0,3	175	198	222	274	332
0,4	175	198	222	274	332
0,5	175	198	222	274	332
0,6	175	198	222	274	332

0,7	175	198	222	274	332
0,8	175	198	222	274	332
0,9	175	198	222	274	332
1	175	198	222	274	332
1,1	175	198	222	274	332
1,2	175	198	222	274	332

Залежність постійних втрат активної потужності ΔP_{const} в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження k_z при різних значеннях коефіцієнта напруги k_u можна представити у вигляді графіка, що відображає вплив змін напруги на постійні втрати рис. 2.15. На такій діаграмі можна побачити, як змінюються втрати при зміні навантаження та напруги, що дозволяє оцінити ефективність роботи електродвигуна при різних режимах експлуатації.

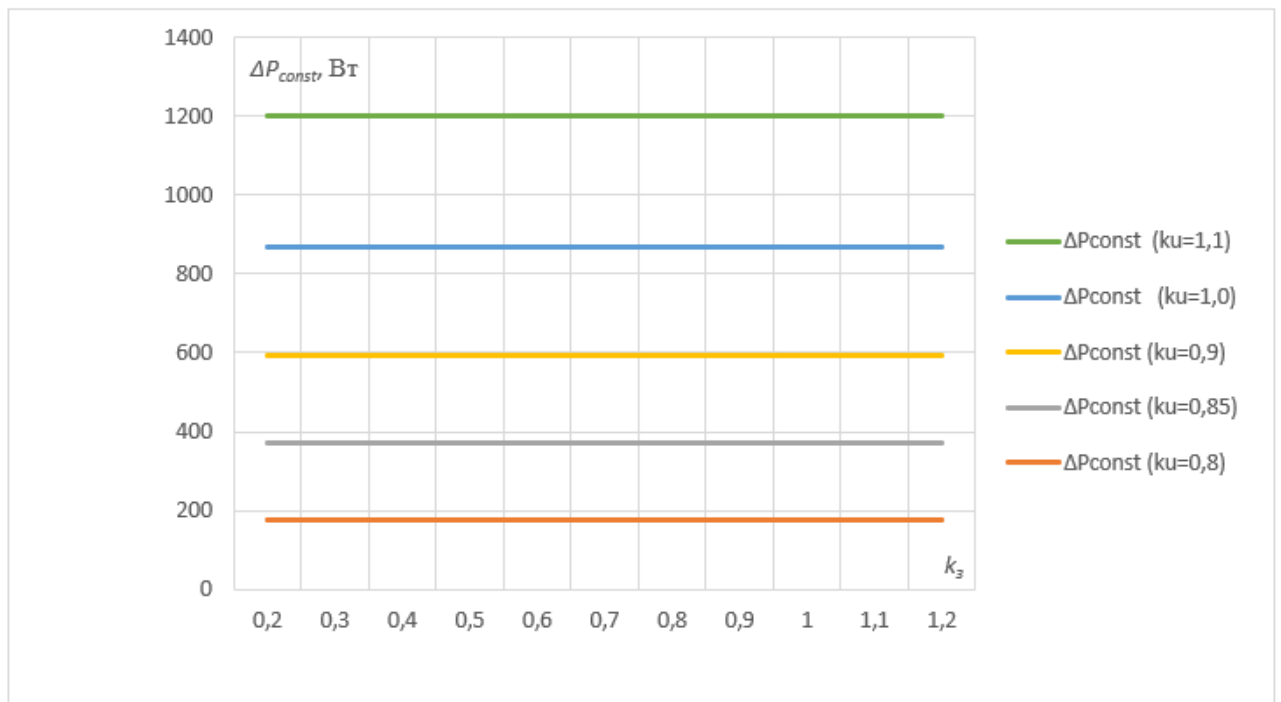


Рисунок 2.15. – Залежність постійних втрат активної потужності ΔP_{const} в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження k_z при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u

Залежність загальних втрат активної потужності ΔP в електродвигуні від коефіцієнта завантаження k_z при різних значеннях коефіцієнта напруги k_u може бути представлена у вигляді графіка, що показує, як змінюються втрати у різних

режимах роботи двигуна табл. 2.12 . Ця залежність (рис. 2.16), важлива для аналізу ефективності роботи електродвигуна в умовах змінної напруги та навантаження.

$$\Delta P = f(k_3).$$

На графіку (рис. 2.16)видно, що загальні втрати активної потужності складаються з постійних втрат і змінних втрат, які змінюються залежно від коефіцієнта завантаження. Коли коефіцієнт напруги k_u знижується, це призводить до зменшення загальних втрат через зниження струму навантаження, але в той же час може спостерігатися збільшення втрат у магнітопроводі через підвищене струмове навантаження.

Таблиця 2.12 – Залежність втрати активної потужності в цілому ΔP в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження k_3 та при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u .

k_3	ΔP				
	$k_u=0,8$	$k_u=0,85$	$k_u=0,9$	$k_u=1,0$	$k_u=1,1$
0,2	183	210	234	281	354
0,3	194	226	249	294	375
0,4	213	247	269	313	402
0,5	233	274	294	347	434
0,6	262	302	324	382	472
0,7	282	339	359	417,8	516
0,8	311	375	408	460,7	564
0,9	344	414	453	522	618
1	386	472	500	604,6	672
1,1	415	514	552	641,3	739
1,2	463	573	607	716	807

Будуємо залежність втрат активної потужності в цілому ΔP в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження k_3 та при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u .

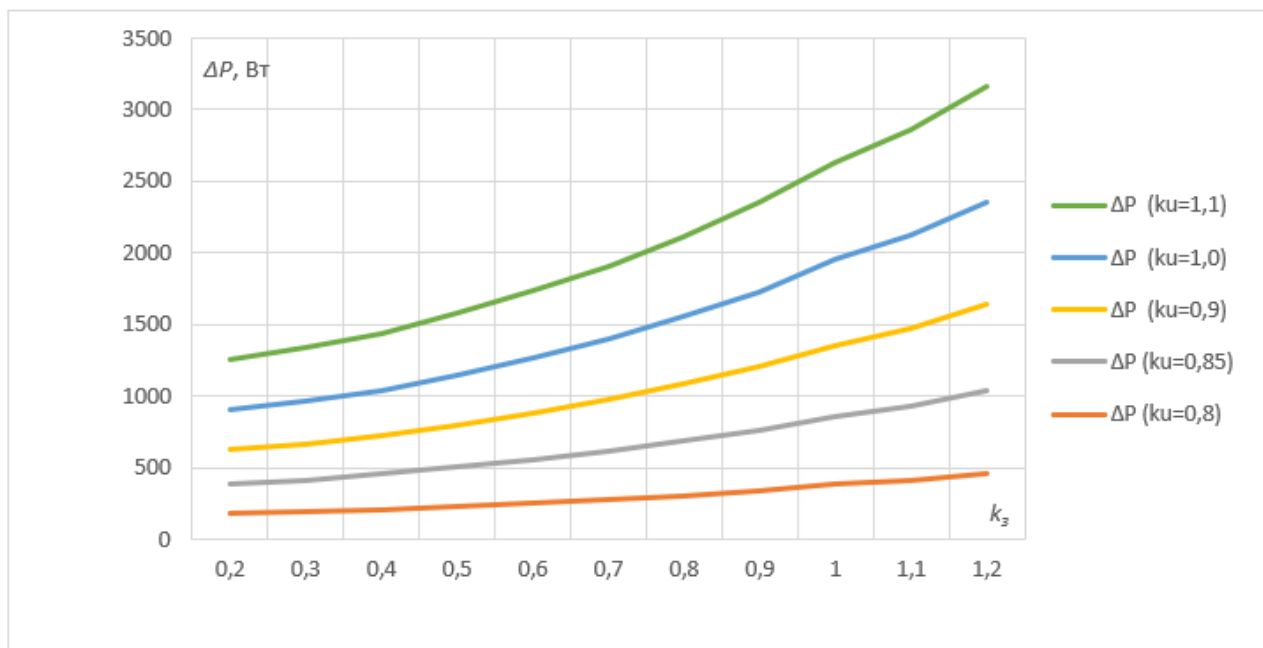


Рисунок 2.16. – Залежність втрат активної потужності в цілому в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження та при різних значеннях коефіцієнтів напруги k_u .

Будуємо графік залежності (рис. 2.17) коефіцієнта втрат k_ϵ активної потужності в асинхронному електродвигуні без урахування зміни опору обмоток, викликаного їх нагріванням. Ця залежність демонструє, як коефіцієнт втрат змінюється зі зростанням навантаження на електродвигун при різних рівнях прикладеної напруги. У графіку представлені результати, які дозволяють визначити, як рівень завантаження впливає на втрати енергії в обмотках, враховуючи номінальні умови роботи. Такий аналіз є важливим для оцінки енергоефективності електродвигуна, оскільки він показує вплив коефіцієнта завантаження k_z на витрати активної потужності при незмінному значенні опору обмоток.

$$k_\epsilon = \frac{\Delta P}{P_2}.$$

Будуємо графік (рис. 2.17) залежності коефіцієнта втрат k_ϵ активної потужності в асинхронному електродвигуні без врахування збільшення опору обмоток через нагрівання при різних значеннях коефіцієнта напруги k_u . Цей графік ілюструє, як зміна напруги впливає на втрати активної потужності за умови фіксованого теплового стану обмоток. Результати демонструють, що при зниженні коефіцієнта напруги k_u зростає коефіцієнт втрат k_ϵ , оскільки зменшення напруги

Таблиця 2.17. – Залежність коефіцієнта втрат k_θ активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u .

k_θ	P_2	k_θ	P_2	k_θ	P_2	k_θ	P_2	k_θ	P_2
$k_u=0,8$		$k_u=0,85$		$k_u=0,9$		$k_u=1,0$		$k_u=1,1$	
0,346591	528	0,283401	741	0,318367	735	0,678744	414	0,21351	1658
0,241294	804	0,207339	1090	0,229071	1087	0,353365	832	0,178147	2105
0,189502	1124	0,165217	1495	0,188507	1427	0,253441	1235	0,158268	2540
0,168596	1382	0,150964	1815	0,167331	1757	0,196712	1764	0,14603	2972
0,149203	1756	0,142252	2123	0,156446	2071	0,178338	2142	0,13948	3384
0,152432	1850	0,140606	2411	0,151158	2375	0,165859	2519	0,136112	3791
0,150097	2072	0,139147	2695	0,148959	2739	0,160355	2873	0,135252	4170
0,150811	2281	0,139912	2959	0,150099	3018	0,156054	3345	0,135794	4551
0,153235	2519	0,144874	3258	0,152346	3282	0,150435	4019	0,138329	4858
0,155547	2668	0,149202	3445	0,155976	3539	0,158034	4058	0,140095	5275
0,160708	2881	0,154198	3716	0,160497	3782	0,162064	4418	0,14362	5619

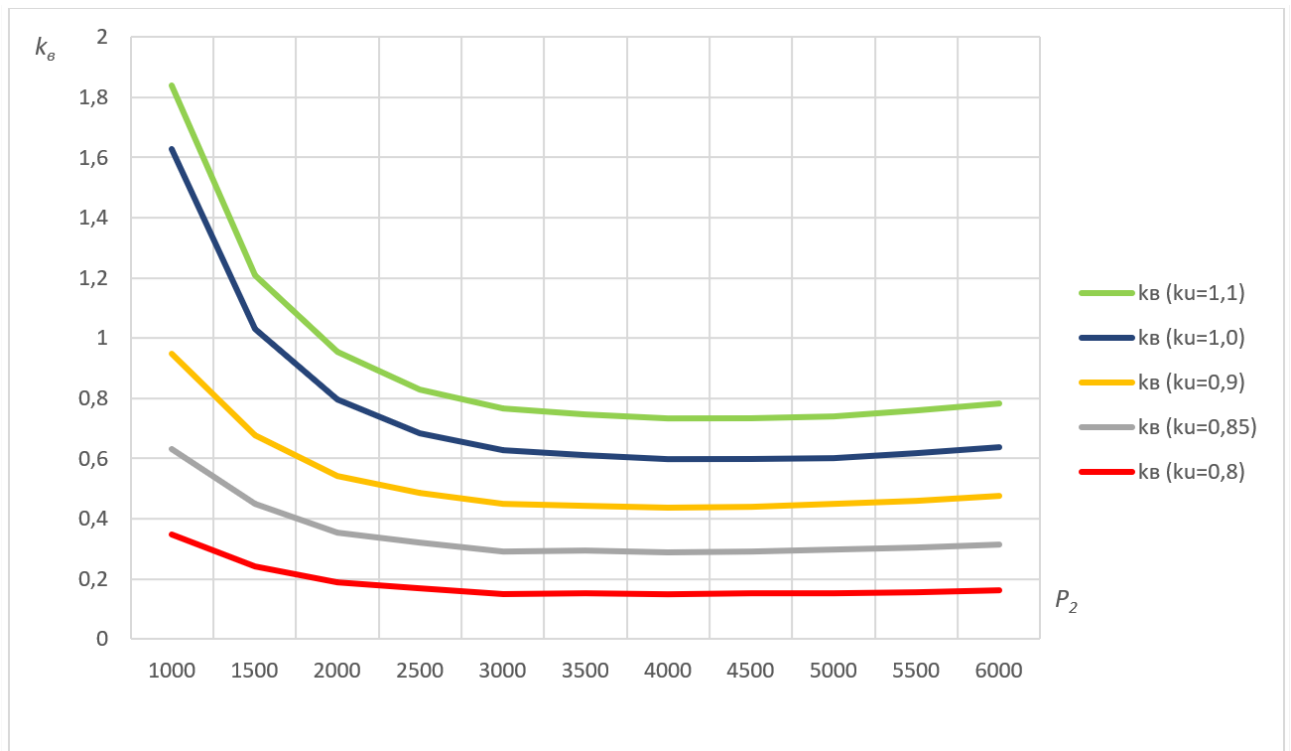


Рисунок 2.17. – Залежність коефіцієнта втрат k_θ активної потужності в електродвигуні без обліку росту опору обмоток при нагріванні при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u .

призводить до збільшення струму, необхідного для підтримки роботи двигуна, і, як наслідок, до більших втрат. Графічна залежність дозволяє виявити, як вибір режиму роботи електродвигуна впливає на його енергоефективність. Отримані результати є основою для оптимізації параметрів електроприводу з урахуванням енергетичних витрат при різних рівнях напруги.

Досліджуємо показник коефіцієнта перетворення електричної енергії k_{ne} в асинхронному електродвигуні. Цей коефіцієнт визначає ефективність енергетичних процесів в машині і обчислюється як відношення фактичних втрат активної потужності ΔP до номінальних втрат активної потужності $\Delta P_{ном}$. Аналізуючи цю залежність, можемо оцінити вплив різних режимів роботи двигуна, таких як змінні коефіцієнти завантаження k_z або напруги k_u , на загальні втрати енергії. Це дозволяє зробити висновки щодо енергоефективності двигуна в реальних експлуатаційних умовах та визначити заходи для оптимізації режимів роботи, зменшення втрат і підвищення загальної ефективності електроприводу.

$$k_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{н}}$$

Розрахуємо значення цього коеф. k_{ne} . Результати заносимо в табл. 2.18.

Таблиця 2.18 – Значення коефіцієнта перетворення електричної енергії k_{ne}

k_z	k_{ne}				
	$k_u=0,8$	$k_u=0,85$	$k_u=0,9$	$k_u=1,0$	$k_u=1,1$
0,2	0,29	0,34	0,37	0,451	0,57
0,3	0,31	0,36	0,4	0,472	0,6
0,4	0,34	0,4	0,43	0,502	0,64
0,5	0,37	0,44	0,47	0,557	0,7
0,6	0,42	0,48	0,52	0,612	0,76
0,7	0,45	0,54	0,57	0,67	0,83
0,8	0,5	0,6	0,65	0,738	0,9
0,9	0,55	0,66	0,73	0,836	0,99
1	0,62	0,74	0,8	0,938	1,08
1,1	0,67	0,82	0,89	1,028	1,18
1,2	0,74	0,92	0,97	1,148	1,29

Будуємо залежність коефіцієнта перетворення електричної енергії k_{ne} у функції коефіцієнта завантаження k_z електродвигуна та при різних значеннях коефіцієнта напруги k_u . (рис. 2.18).

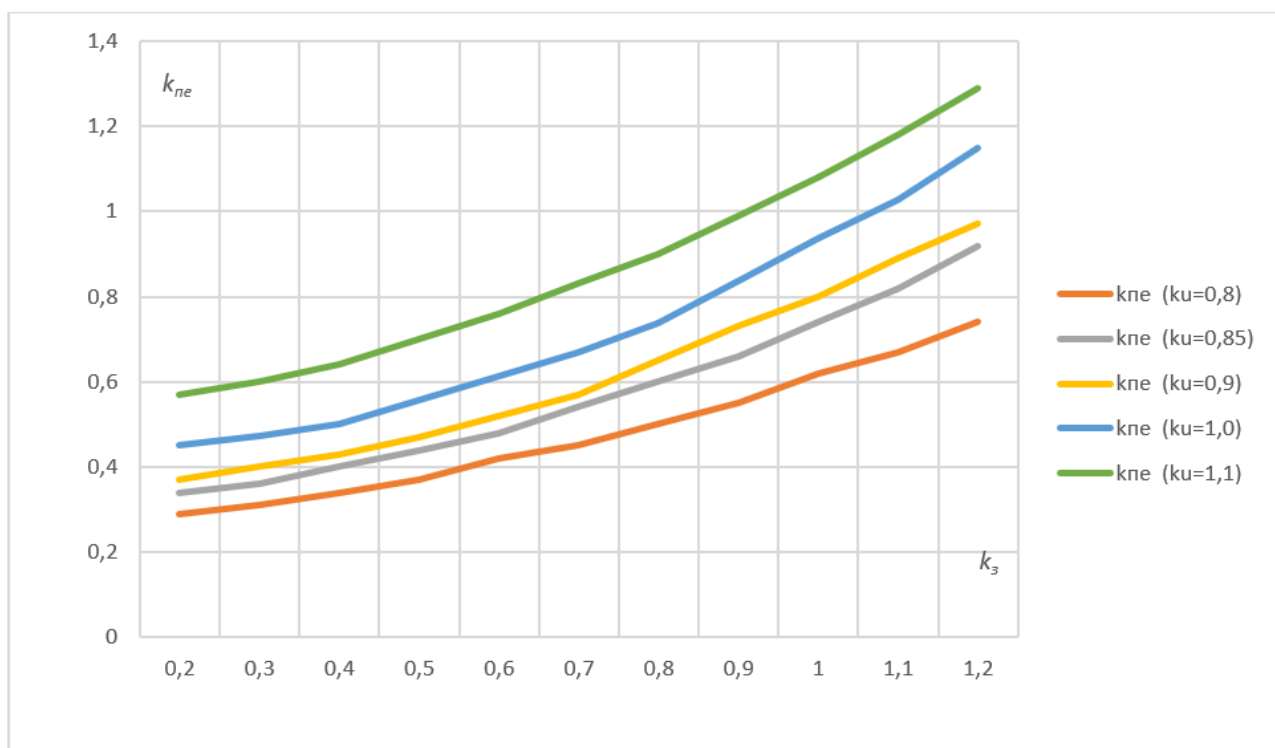


Рисунок 2.18. – Залежність коефіцієнта перетворення електричної енергії k_{ne} у функції коефіцієнта завантаження k_z електродвигуна при різних значеннях коефіцієнтах напруги k_u .

2.5 Висновки до другого розділу роботи

1. Залежність коефіцієнта втрат активної потужності від потужності на валу з урахуванням нагріву обмоток має екстремальний харак k_z . Вона дозволяє оптимізувати завантаження двигуна, зменшуючи втрати активної потужності на одиницю корисної потужності.

2. Рівняння кругової діаграми повної потужності асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у функції ковзання і прикладеної напруги дає можливість визначати втрати активної потужності для заданого завантаження робочої машини.

3. Аналіз залежностей втрат активної потужності в двигуні від коефіцієнта завантаження показує, що регулювання напруги дозволяє мінімізувати втрати.

4. Залежності втрат активної потужності в обмотках двигуна у функції коефіцієнта завантаження підтверджують можливість створення системи мінімізації втрат шляхом регулювання прикладеної напруги.

5. Постійні втрати активної потужності в двигуні також залежать від завантаження і напруги, що дозволяє регулювати їх для підвищення енергоефективності.

6. Залежності коефіцієнта перетворення активної енергії у функції завантаження і напруги дозволяють визначити необхідну кратність напруги для досягнення заданого коефіцієнта перетворення.

Такий підхід забезпечує можливість оптимізації режимів роботи асинхронного електродвигуна для мінімізації втрат активної потужності.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУ- ВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОДРІБНЕННЯ ТВЕРДИХ РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ

3.1 Дослідження втрати активної потужності електродвигуна в робочій машини подрібнювача твердих рослинних відходів

Іноді в малих господарствах для подрібнення твердих рослинних відходів використовують саморобні пристрої, де привід забезпечується асинхронними електродвигунами з низьким рівнем потужності. Такі пристрої, як правило, є економічно вигідними та доступними, оскільки дозволяють знизити витрати на закупівлю обладнання та використовувати наявні електродвигуни. Крім того, асинхронні мотори для цих цілей здебільшого обираються завдяки своїй простоті, надійності та здатності працювати при змінних навантаженнях, що часто характерно для процесів подрібнення рослинних відходів. Вони ефективно використовуються в умовах, коли необхідно знизити енергоспоживання і забезпечити мінімальне обслуговування обладнання.

Втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні значною мірою залежать від коефіцієнта завантаження робочої машини (κ_3). При збільшенні навантаження на електродвигун, коефіцієнт завантаження наближається до одиниці, що призводить до зростання втрат потужності через підвищення струму та теплових втрат в обмотках. Водночас, при частковому завантаженні двигуна (меншому κ_3) ефективність його роботи може знижуватися, оскільки відбувається надмірне нагрівання через підвищену опірність і, як наслідок, збільшуються втрати потужності в системі.

$$\kappa_3 = \frac{Q}{Q_n}, \quad (3.1)$$

де Q_n – номінальна продуктивність даної робочої машини;

Q – фактична продуктивність даної робочої машини.

Таким чином, оптимізація коефіцієнта завантаження є важливим аспектом для зниження енергетичних витрат та підвищення ефективності роботи асинхронних електродвигунів.

Для оцінки енергоефективності електродвигуна системи електроприводу подрібнювача доцільно використовувати коефіцієнт корисної дії (ККД), позначений модифікованому вигляді як κ_e . Цей коефіцієнт відображає співвідношення між корисно виконаною роботою і загальними енергетичними витратами на її виконання. ККД електродвигуна показує, яку частину спожитої енергії перетворюється в механічну потужність для виконання подрібнювальних операцій, а яка частина йде на внутрішні втрати (теплові, механічні, магнітні тощо).

Високий коефіцієнт корисної дії вказує на те, що більша частина електричної енергії перетворюється в корисну механічну роботу, що знижує енергоспоживання і експлуатаційні витрати. У разі низького ККД значна частина енергії витрачається на втрати, що погіршує економічну ефективність роботи подрібнювача. Тому для підвищення енергоефективності необхідно оптимізувати робочі режими електродвигуна, знижувати втрати і забезпечувати відповідне навантаження на систему.

$$\kappa_e = 1 - \kappa_\epsilon \frac{P_2}{P_1}, \quad (3.2)$$

де $\kappa_\epsilon = \Delta P / P_2$ - коефіцієнт втрати активної потужності даного ел.двигуна

ΔP - втрати активної потужності в даному електродвигуні, Вт;

P_2 - активна потужність, яка передається з валу даного електродвигуна до вказаної робочій машині, Вт.

P_1 - активна потужність, що споживається первинною обмоткою даного електродвигуна з мережі, Вт.

Зменшення втрат та підвищення енергоефективності системи подрібнення можна досягти шляхом регулювання завантаження електропривода, керуючись величинами струму навантаження або ковзання електродвигуна [3]. Ковзання s при номінальній напрузі електродвигуна залежить від моменту рушання робочої машини m_0 , коефіцієнта завантаження κ_z та номінального ковзання s_n . Реальне

значення ковзання для діючої системи подрібнення може бути встановлено лише експериментальним шляхом, в процесі роботи виробництва, оскільки воно залежить від специфічних умов навантаження та роботи обладнання.

У системах енергопостачання для сільськогосподарських об'єктів часто спостерігається нерівномірність напруги, яка суттєво впливає на роботу електрообладнання. Зниження, підвищення або несиметрія напруги в мережі порівняно з номінальним значенням не призводять до значних змін активної потужності на валу асинхронного двигуна, але призводять до зміни втрат активної потужності, що в свою чергу спричиняє зайві витрати електричної енергії.

Втрати активної потужності ΔP при заданому коефіцієнті завантаження k_z робочої машини можна визначити на основі рівняння кругової діаграми комплексу повної потужності, яка є функцією ковзання при різних значеннях кратностей прикладеної напруги до номінальної k_u . Це дозволяє точніше оцінити зміни енергетичних витрат і націлити зусилля на їх мінімізацію при варіаціях напруги в мережі, забезпечуючи стабільну і ефективну роботу системи.

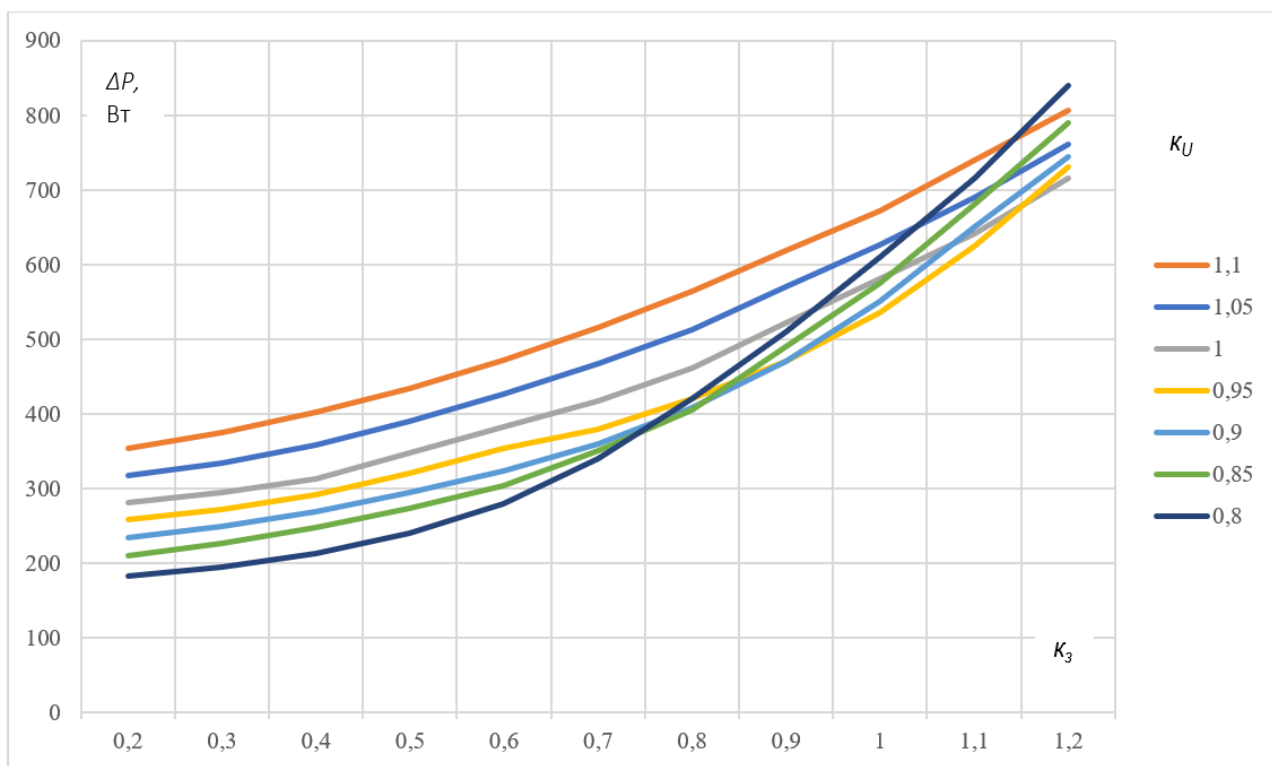


Рисунок 3.1 – Залежність ΔP в асинхронному електродвигуні у функції коефіцієнта k_z робочої машини при різних значеннях коефіцієнта прикладеної напруги k_u .

На рисунку 3.1 наведені розраховані значення залежності втрат активної потужності ΔP в електродвигуні подрібнювача для електродвигуна серії АІР номінальною потужністю 4 кВт від коефіцієнта завантаження κ_z при різних значеннях кратності прикладеної напруги k_u . Ці графіки дозволяють оцінити, як зміни в напрузі впливають на втрати потужності при різних робочих навантаженнях. На рисунку 3.2 представлені залежності коефіцієнта κ_θ від κ_z для електродвигуна робочої машини при різних значеннях k_u , форма яких аналогічна тим, що були отримані в дослідженні [8].

Аналіз графіків на рисунку 3.2 вказує, що для певних значень κ_z робочої машини та вибраної величини напруги існують ділянки, де втрати потужності ΔP є меншими, ніж при номінальній напрузі. Це свідчить про те, що правильне налаштування напруги в мережі може знижувати енергетичні витрати, що є важливим для підвищення ефективності роботи системи подрібнення.

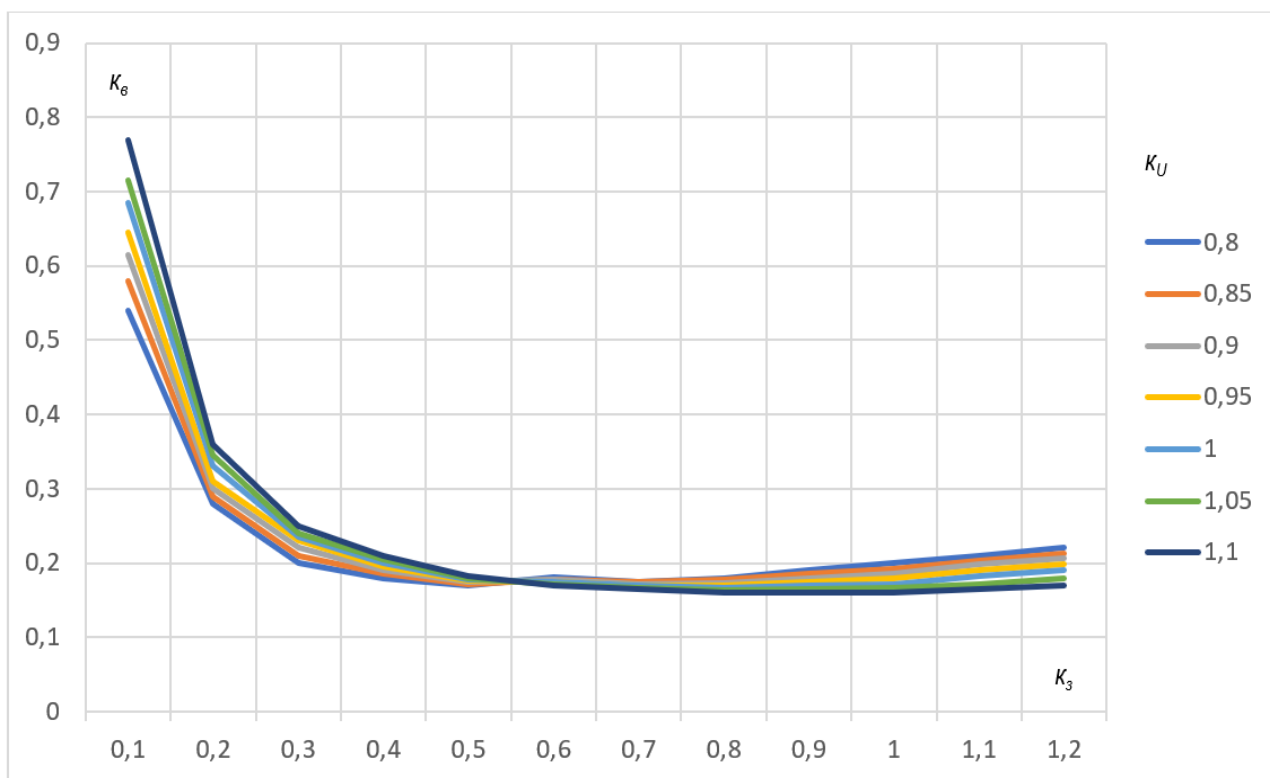


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта втрат κ_θ в електродвигуні у функції коефіцієнта κ_z робочої машини при різних значеннях коефіцієнта прикладеної напруги k_u .

З графіків, наведених на рисунку 3.2, видно, що при значеннях коефіцієнта завантаження κ_z в межах від 0,1 до 0,5 спостерігається зменшення коефіцієнта κ_θ .

При зростанні κ_z від 0,5 до 0,7 коефіцієнт κ_θ досягає мінімальних значень за умови, що напруга близька до номінальної. Якщо ж κ_z збільшується в межах від 0,7 до 1,1, коефіцієнт κ_θ починає зростати, але лише при зменшенні подачі напруги на електродвигун. Ці результати показують, що вищі значення навантаження можуть негативно впливати на енергоефективність, але коректне регулювання напруги здатне поліпшити ефективність роботи системи, навіть при високих коефіцієнтах завантаження.

3.2 Математична модель енергозберігаючого режиму роботи електродвигуна робочої машини подрібнювача твердих рослинних відходів

У результаті проведених досліджень була розроблена математична модель енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна, а також алгоритм її практичного застосування. Як приклад, запропоновано варіант цієї моделі для приводу робочої машини з лінійно зростаючою механічною характеристикою, що дозволяє більш точно оцінити ефективність роботи системи в різних умовах експлуатації. Ця модель допомагає оптимізувати режим роботи електродвигуна, знижуючи енергетичні витрати при різних навантаженнях і забезпечуючи енергоефективність процесу.

Для оцінки енергоефективного режиму роботи електродвигуна в системі подрібнення твердих рослинних відходів, що використовується для виробництва біопаливних пелет, запропоновано методику, яка включає кілька етапів.

Алгоритм її застосування виглядає наступним чином:

1. Вимірювання ковзання s для обраного електродвигуна. Це допоможе визначити його поточний робочий стан при заданих умовах навантаження.

2. Обчислення коефіцієнта завантаження κ_z для конкретного електродвигуна, що дасть змогу оцінити ефективність використання електричної енергії при певних умовах роботи робочої машини:

$$\kappa_z = \frac{\left(\frac{1-s}{s_H} - m_0\right)s + m_0 s_H}{1-s}, \quad (3.3)$$

3. Розрахунок ковзання s електродвигуна при розрахованому значенні k_3 та заданих значеннях напруги k_u , що допоможе точніше прогнозувати енергетичні витрати при різних робочих умовах:

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_H}{\frac{1 - s_H}{s_H} k_U^2 + k_3 - m_0}, \quad (3.4)$$

4. Розрахунок загальних втрат активної потужності ΔP при різних значеннях k_u , що дасть змогу зрозуміти, як зміни в подачі напруги на електродвигун впливають на енергетичні витрати в цілому:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m = k_U^2 \Delta P_{c.H} + 3(R_1' + R_2'') \cdot \left(\frac{k_U^2 U_H^2}{\left(R_1' + \frac{R_2''}{s} \right)^2 + (X_1' + X'')^2} \right), \quad (3.5)$$

де ΔP_c - втрати активної потужності в намагнічуючому контурі електродвигуна;

ΔP_m - втрати активної потужності в обмотках електродвигуна;

R_1', R_2'', X_1', X_2'' - параметри схеми заміщення однієї фази АД, Ом;

5. Визначення оптимального значення коефіцієнта енергоефективності κ_e , при якому енергетичні втрати будуть мінімальними, що допоможе досягти максимального рівня енергоефективності роботи електроприводу, рис. 3.2.:

$$\kappa_e \rightarrow \kappa_{e.max}. \quad (3.6)$$

Визначення коефіцієнта κ_e , який буде мати максимальне значення при оптимальних робочих умовах, що дозволить досягти мінімальних енергетичних витрат.

Зазначений алгоритм був застосований для оцінки енергоефективності електроприводу подрібнювача потужністю 4 кВт, з використанням графіка завантаження, наданого фермерським господарством, протягом восьмигодинної робочої зміни. Цей підхід дозволяє більш точно оцінити вплив змінних навантажень на енергоспоживання та ефективність роботи електроприводу, що в свою чергу допомагає знизити витрати електричної енергії та покращити загальну енергоефективність процесу подрібнення.

3.3 Перевірка математичної моделі втрат активної потужності в електродвигуні робочої машини подрібнювача твердих рослинних відходів

Були проведені дослідження математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні з метою перевірки її адекватності. Для цього було розроблено експериментальну установку, що зображена на рисунку 3.3.

Навантаження електродвигуна здійснювалося за допомогою генератора постійного струму (G2), оснащеного реостатом навантаження (R_H). Для вимірювання ковзання електродвигуна використовувався тахогенератор (G1). Активна потужність, яку споживав електродвигун, вимірювалася за допомогою комплекту КВП. В якості досліджуваного електродвигуна був обраний асинхронний двигун типу AIP100S2 (M), для якого проводилися аналітичні розрахунки втрат активної потужності.

Втрати активної потужності визначались як різниця між активною потужністю, яку споживав електродвигун, і потужністю, яка передавалася на вал електродвигуна. Першу потужність вимірювали за допомогою комплекту КВП, а другу розраховували аналітичним методом, використовуючи параметри Г-подібної схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна та виміряне ковзання. Ці дослідження дозволяють порівняти точність теоретичних розрахунків з реальними даними та підтвердити коректність обраної математичної моделі для визначення втрат активної потужності в асинхронних електродвигунах.

Метою експерименту є дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні для перевірки адекватності математичних моделей та визначення реальних енергетичних витрат у різних робочих режимах. Для цього була створена спеціальна експериментальна установка рис. 3.3.

Втрати активної потужності в електродвигуні:

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (3.8)$$

Механічна потужність на валу електродвигуна:

$$P_2 = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (3.7)$$

$$I'^2 = \frac{U^2}{(R_1' + R_2''/s)^2 + (X_1' + X_2'')^2}.$$

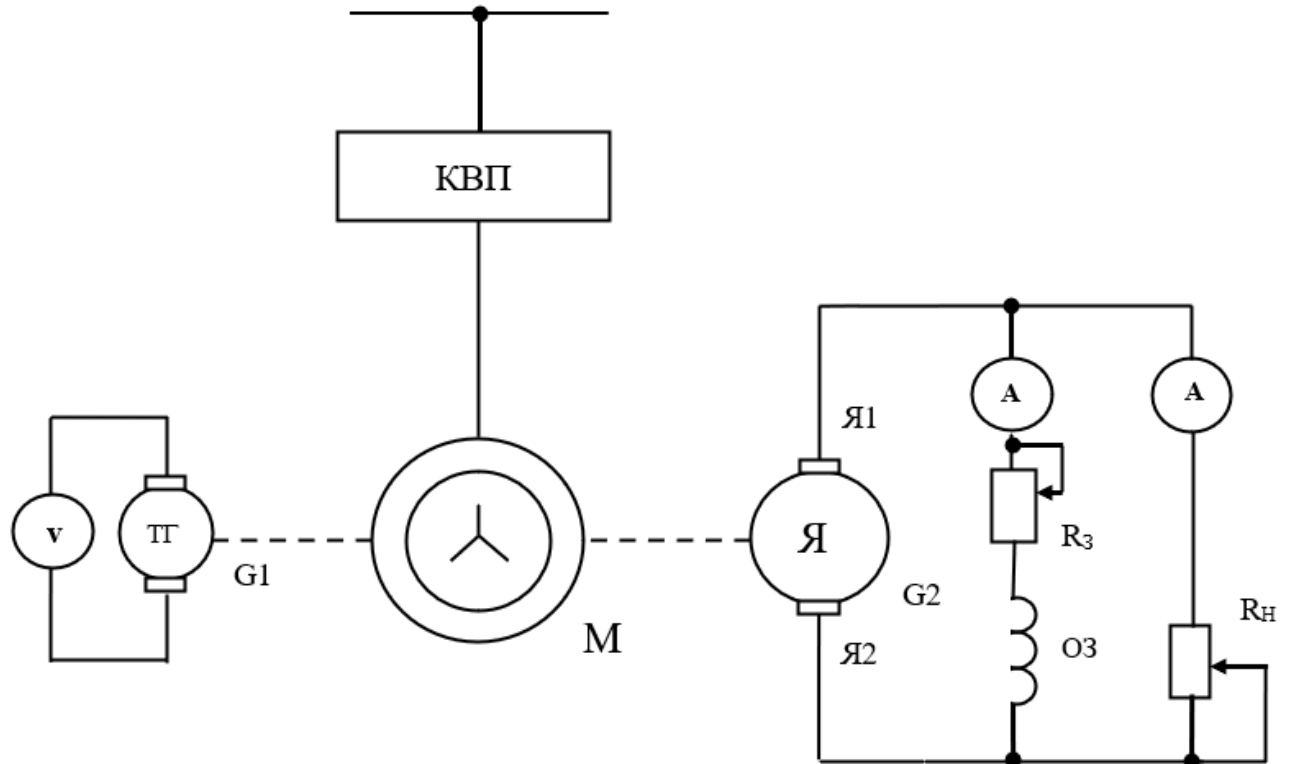


Рисунок 3.3. – Експериментальна установка дослідження математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні.

Залежність коефіцієнта втрат κ_6 з урахуванням коефіцієнта завантаження κ_3 за восьмигодинну робочу зміну та при різних значеннях коефіцієнта напруги k_u показана на рисунку 3.4.

Енергоефективність подрібнювача збільшуватиметься, якщо в режимах недостатнього навантаження електродвигуна з коефіцієнтом завантаження κ_3 до 0,7 подавати напругу k_u , меншу за номінальну. Водночас ефективність зменшуватиметься, коли значення κ_3 перевищує 0,7, а рівень k_u відхиляється від номінального значення.

Запропонована методика дозволяє точно визначати як коефіцієнт втрат κ_6 , так і енергоефективності κ_e асинхронного електродвигуна подрібнювача залежно від коефіцієнта завантаження κ_3 та рівня напруги k_u . Аналіз отриманих графіків

показує, що залежність κ_e має нелінійний характер, що вказує на важливість оптимізації параметрів роботи електродвигуна. Використання цієї методики дозволяє забезпечити енергоефективний режим роботи, завдяки чому можна визначити оптимальний рівень напруги k_u при змінному коефіцієнті завантаження κ_z . Також застосування цієї методики дозволяє оптимізувати режим роботи електродвигуна, визначивши найбільш ефективний рівень напруги k_u для різних значень коефіцієнта завантаження κ_z , що сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню загальної продуктивності системи.

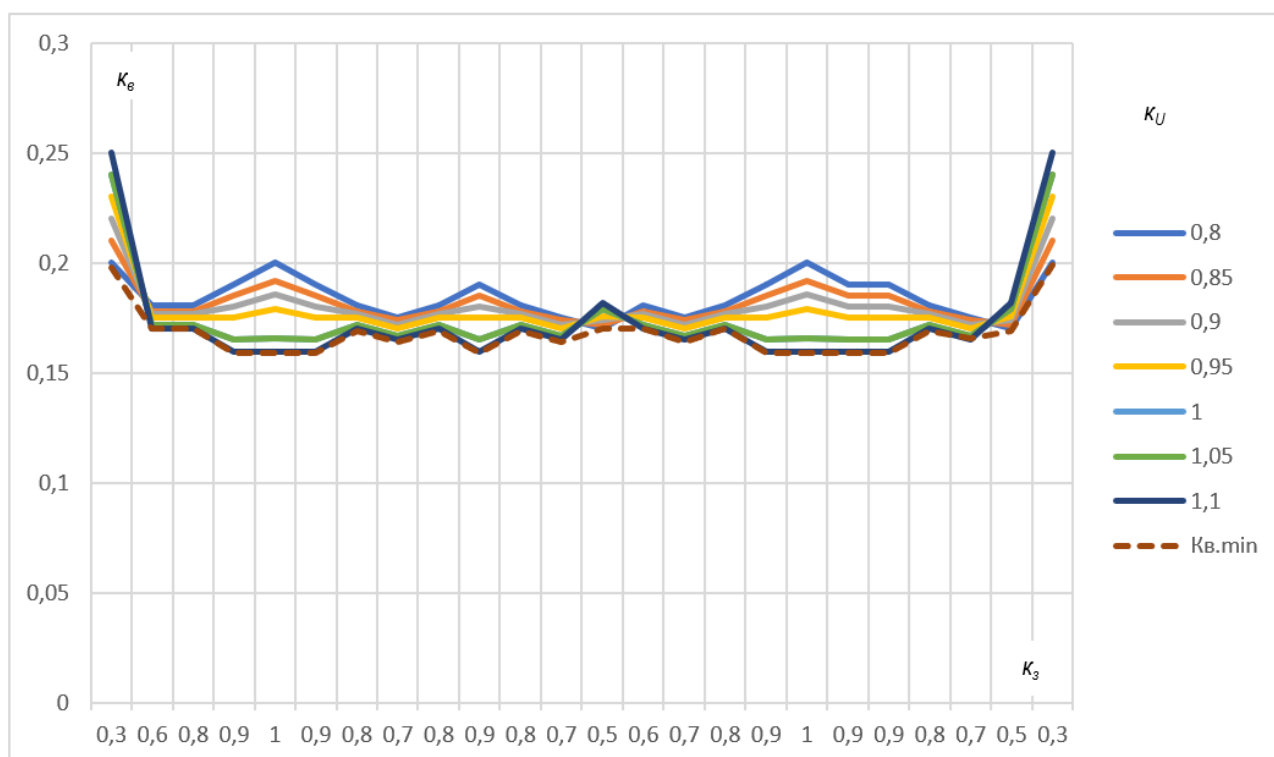


Рисунок 3.4. — Залежність коефіцієнта втрат κ_e від коефіцієнта κ_z з врахуванням коефіцієнта прикладеної напруги k_u .

На основі розробленого підходу рекомендовано створити та інтегрувати пристрій, призначений для підвищення енергоефективності приводу подрібнювача рослинних відходів. Його функція полягає у підтримці оптимальних рівнів напруги, що подається на електродвигун, відповідно до змін режиму завантаження подрібнювача. Це дозволить зменшити втрати активної потужності, стабілізувати роботу системи та забезпечити ефективне використання енергії, знижуючи експлуатаційні витрати.

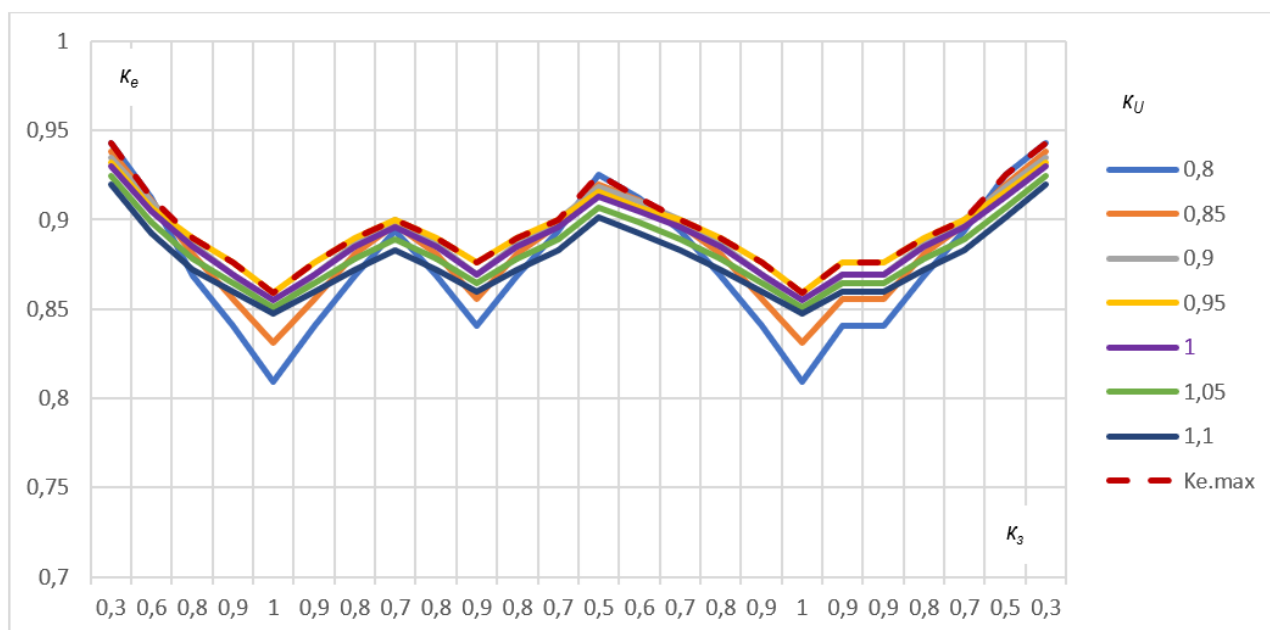


Рисунок 3.5. – Залежність коефіцієнта енергоефективності κ_e від коефіцієнта завантаження κ_z при різних коефіцієнтах прикладеної напруги κ_u .

Аналіз графіків на рисунок 3,5 демонструє, що при коефіцієнті завантаження κ_z до 0,7 спостерігається зниження коефіцієнта κ_e . Водночас, коли κ_z перевищує 0,7, енергоефективність κ_e починає зростати за умови зменшення подачі напруги на електродвигун. Це свідчить про залежність енергетичних параметрів системи від режиму завантаження та рівня напруги, що дозволяє визначати оптимальні умови роботи електропривода.

Очікується, що впровадження запропонованого пристрою призведе до зниження споживання електроенергії приводом подрібнювача, а рівень енергоефективності зросте на 4-6%. Окрім цього, запропоновану методику можна застосовувати для діагностики електродвигуна подрібнювача, який експлуатується в технологічній лінії виробництва пелет. Це дозволить оперативно оцінювати стан електродвигуна та забезпечувати оптимальні умови його роботи, сприяючи зменшенню енерговтрат та підвищенню надійності всього технологічного процесу.

3.4 Розробка пристрою забезпечення енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна

Для забезпечення енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна доцільно використовувати стандартне обладнання, наприклад, м'які тиристорні пускачі. Це пристрої, оснащені блоком програмування, які дозволяють плавно регулювати напругу, що подається на електродвигун, з урахуванням змін у режимах завантаження. Зокрема, м'який тиристорний пускач, як зображено на рисунку 3.6, забезпечує стабільний запуск двигуна, знижує ударні навантаження на механічну систему і сприяє зменшенню енергоспоживання під час експлуатації.

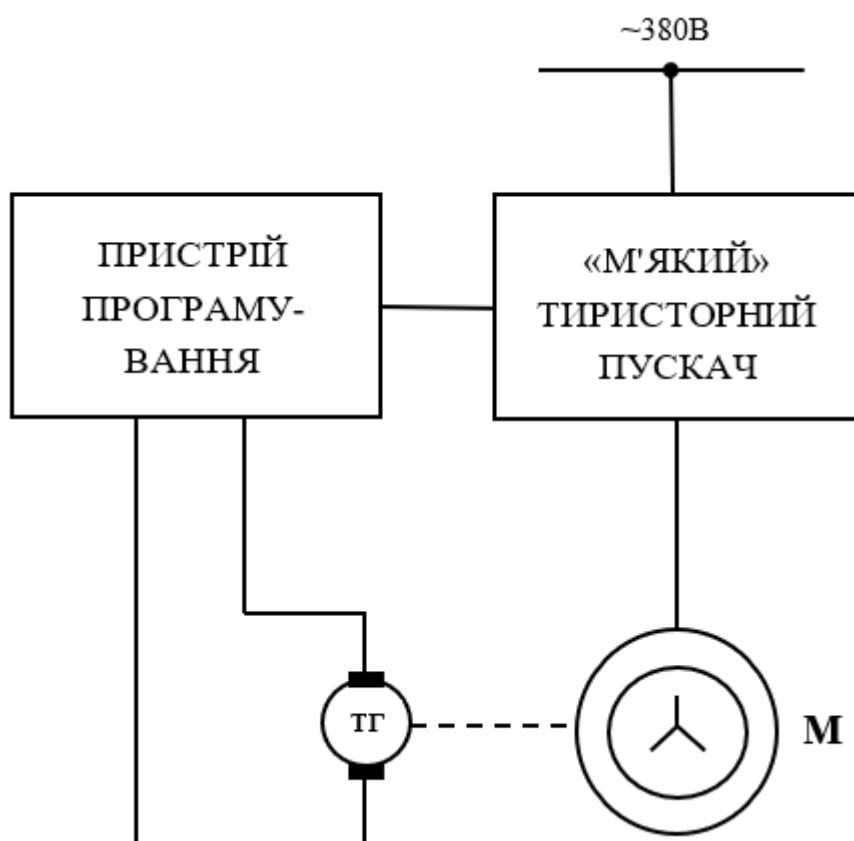


Рисунок 3.6 – Пристрій енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна.

3.5 Висновки до третього розділу роботи.

1. Розроблено методику та алгоритм визначення енергоефективності системи подрібнення твердих рослинних відходів, що дозволяють знаходити області мінімальних втрат активної потужності та максимального коефіцієнта енергоефективності у функції коефіцієнта завантаження електродвигуна і рівня прикладеної напруги.

2. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність математичної моделі втрат активної потужності, що засвідчує її відповідність реальним умовам експлуатації.

3. Виявлено залежності втрат активної потужності від коефіцієнтів завантаження і прикладеної напруги, які покладено в основу математичної моделі енергозбереження в системі приводу.

4. Досліджено енергоефективність приводу подрібнювача потужністю 4 кВт протягом восьмигодинної зміни, що показало доцільність зменшення прикладеної напруги на електродвигун у недовантажених режимах роботи.

5. Розроблено пристрій енергозбереження з використанням "м'якого" тиристорного пускача, який забезпечує оптимізацію напруги на затискачах електродвигуна залежно від змінних режимів завантаження.

6. Впровадження запропонованого пристрою забезпечує підвищення енергоефективності системи подрібнення на 4–6%, що підтверджено розрахунками і експериментальними даними.

7. Використання пристрою в умовах сільськогосподарських підприємств дозволяє скоротити річне споживання електроенергії на 14–15%, що робить його економічно доцільним для практичного застосування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз технологій виробництва біопалива підтвердив потенціал використання пелет і брикетів із рослинних відходів як ефективного й екологічного джерела енергії. Ці продукти економічно вигідніші за традиційні джерела енергії, зокрема для сільських територій із надлишком біосировини.

2. Дослідження енергоефективності подрібнювачів із використанням асинхронного електродвигуна типу АІР виявило залежності між коефіцієнтами завантаження, напругою і втратами активної потужності. Оптимізація цих параметрів знижує енергоспоживання та підвищує ефективність роботи системи.

3. Розроблені математичні моделі дозволяють діагностувати режими роботи електродвигунів і визначати енергоефективні параметри. Зокрема, коефіцієнт втрат активної потужності враховує нагрівання обмоток і використовується для оптимізації режимів роботи.

4. Використання енергозберігаючих пристроїв, таких як тиристорні пускачі, дозволяє регулювати напругу залежно від навантаження, що знижує споживання енергії на 4–6%. Це важливо для забезпечення стабільної роботи подрібнювачів у змінних режимах.

5. Методи діагностики електродвигунів і робочих машин базуються на аналізі зміни струму та втрат активної потужності. Це дозволяє вчасно виявляти зниження ефективності та уникати перевитрат енергії.

6. Оптимізація енергоефективності подрібнювачів досягається завдяки вдосконаленню конструктивних рішень і впровадженню енергозберігаючих технологій. Це сприяє зниженню витрат і покращенню якості біопалива.

7. Запропоновані заходи створюють основу для сталого розвитку біоенергетики, сприяючи зменшенню залежності від викопних палив і покращенню екологічної ситуації в регіонах виробництва біопалива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шевчук В.Я. Екологізація енергетики: [Електронний ресурс]: навчальний посібник/ Шевчук В.Я., Білявський Г.О., Саталкін Ю.М., Навроцький В.М. – К.: Вища освіта, 2002. 111 с. – (Бібліотека КПІ)[SYS:000133273] — Режим доступу до пос.: www.library.kpi.ua/recs.../КМА02.000133273.html.
2. Альтернативна енергетика та ресурсоенергозбереження. [Електронний ресурс] / – Режим доступу до офіційного інтернет-порталу (Промислова екологія): <http://eco.com.ua>.
3. Гелетуха Г. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник/За ред. Г. Гелетуха. – К.: «Поліграф плюс», 2015. – 72 с.
4. Лакида П.І. Енергетичний потенціал біомаси в Україні / [Лакида П.І., Гелетуха Г.Г., Василюшин Р.Д., та ін.], відповід. наук. ред. д.с.-г.н., проф. П.І. Лакида; Навчально-науковий інститут лісового і садово-паркового господарства НУБіП України. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2011. – 28 с. ISBN 9784966480064838.
5. Гелетуха Г.Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні [Гелетуха Г.Г., Железня Т.А., Матвєєв Ю.Б. та ін.] // Пром. тепло-техніка. –2006. – № 2. – С. 85–93.
6. Технологія виробництва різних видів біопалива [Електронний ресурс]. «Біопаливо та котли України», 03 листопада 2012 – Режим доступу: <http://bio.ukrbio.com/ua/articles/2344/>.
7. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва. [Електронний ресурс] Газета "Агробізнес сьогодні" №19(290) , 22 жовтня 2014, за ред. О. Гайденко, К.- : вид-во ТОВ "Прес-медіа" 2014./ Режим доступу: <http://www.agrobusiness.com.ua/ideii-i-trendy/2424-tverde-biopalyvo-hnologichni-vymogyvlastyivosti-komponenttiv-ta-tekhnologiiavyrobnystva.html>

8. Соломорізка-подрібнювач соломи (1500-1800 кг/год). [Електронний ресурс]. Режим доступу:
http://bioekoprom.com.ua/katalog/izmelchiteli/solomarezki/solomarezka.izmelchitel_solomyi_drobilka_1500-1800_kg_chas/

9. Сільгосптехніка. Подрібнювач Tomahawk 505M, Київ.[Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://biznespro.ua/index.php?page=10&id=41645>.

10. Дробарка молоткова ДМ 2000. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://pellety.ub.ua/ua/goods/view/3579619/all/drobarka-molotkovadm-2000/1>

11. Молотковая дробилка А1-ДМ2Р-55. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://belgorod.all.biz/molotkovaya-drobilka-a1-dm2r-55-g4540112#.WN4nh1OLTIU1>

12. Дробилка молотковая дековая 3 тонны в час [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://bio-nc.com/p27904468-drobilka-molotkovayadekovaya.html>.

13. Дезинтеграторы. [Электронный ресурс] : Desintegraator Tootmise OÜ - машиностроительное предприятие// - Режим доступа <http://desi.eu/index.php/ru/tooted/d-zin-gr-ri>.

14. Сушилка аэродинамическая для опилок, торфа, соломы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhytomyr.all.biz/sushilkaaerodinamicheskaya-dlya-opilok-torfa-g1363618#.WN4tcFOLTIU>

15. Производство пеллет. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://namillion.com/proizvodstvo-pellet.html>

16. Зотова Е. В. Аналитическое исследование параметров, определяющих технологию производства древесных пеллет. / Е. В. Зотова, А. О. Сафонов, А. Д. Платонов // Лесотехнический журнал, Древопереработка. Химические технологии, 1/2014, С. 127-132.

17. *Ермолаев С.А.* Эксплуатация и ремонт электрооборудования и средств автоматизации в системе АПК / *С. А. Ермолаев, В.А. Мунтян., В.Н. Кюрчев* // – К.: Альтур, 1997. – 414с.

18. Надёжность асинхронных двигателей / Под ред. *Б. Н. Ванеева*. – К.: Техніка, 1983. – 143с.
19. *Овчаров С.В.* Діагностування та захист електродвигунів поточної технологічної лінії за температурою сталі / *С.В. Овчаров* // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.9. – 2002. – С.82 – 85.
20. Енергоефективність системи подрібнення твердих рослинних відходів для виробництва біопаливних пелет / Р. В. Телюта, В. В. Клименко, О. В. Скрипник, А. В. Телюта // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. – Кропивницький: ЦНТУ, 2022. – Вип. 6(37). – Ч. 1. – С. 119-126.
21. Жидацький В. Ц., Джигирей В. С, Сторожук В. М. та ін. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидацького. – Львів, Афіша, 2000 – 352 с.

ДОДАТОК

ДОДОТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1. Характеристика об'єкта проектування

Для подальшого покращення умов праці та її охорони необхідно ширше використовувати досягнення науки і техніки, вдосконалювати технологію обладнання для забезпечення безпечних умов праці. При розробці дипломного проекту передбачається обов'язкова розробка заходів по охороні праці з метою систематизації, закріплення і розширення знань.

На території СТОВ «Агролан» розташовані різні об'єкти та виробничі цеха, склади готової продукції, ремонтні майстерні та автотракторні гаражі. Деякі виробничі приміщення відносяться до пильних, так як проходять процеси очищення, а також пожежо- та вибухонебезпечні небезпечні, так як олія відноситься до горючих матеріалів.

Загалом ці об'єкти по типу виробництва, по санітарній небезпеці відносяться до четвертого та п'ятого класу, ширина санітарної зони в відповідності з СНіП 245-77 повинні бути не менше 50 м. По електричній небезпеці приміщення відноситься до приміщення з підвищеною небезпекою в зв'язку з наявністю струмопровідних полів. По пожежній безпечності відноситься до категорії "Д" (характеризується наявністю тільки незгораємих речовин і матеріалів в холодному стані), крім корпусу 1. Ступінь пожежної стійкості згідно СНіП приміщення V.

А1.2 Аналіз шкідливих факторів

Температура на робочих місцях в холодний та перехідний періоди нижче 18° С, що не знаходиться в межах гранично допустимих норм для роботи середньої ваги (норма 18°-22°С). В жаркий період температура в окремих точках приміщення відділення станції може доходити до 28°-30°С, що не відповідає нормам (норма 22°-27°) ДЕСТ 12.1.005-76. Концентрація пилу - 1,6-1,8 мг/м³, що не знаходиться в межах норми (ПДК=1 мг/м³). Загазованість окисом вуглецю – 5 мкг/м³ (при нормі ПДК= 20 мкг/м³) СНіП 245-71. Рівень звуку і звукового тиску складає 83 і 85 дБ відповідно, що перевищує норму (не більше 75 дБ). Низькочастотні

вібрації полу становлять 96 дБ, що перевищує норму 92 дБ (ДЕСТ 12.2.007.0-75, ДЕСТ 17770-72, ДЕСТ 16372-77, ДЕСТ 16291-71). Освітлення загальна становить 150 лк, що являється нормою для загального освітлення (150 лк). Недостатнє освітлення робочих місць місцевим освітленням (250 лк) (ДЕСТ 12.2.007.9.75, Сніп 11-479).

A1.3 Аналіз небезпечних факторів

В виробничих приміщеннях підприємства відділення кабельні лінії виконані напругою 0,4 кВ з глухо заземленою нейтраллю.

Пошкодження електричним струмом виникає по ряду слідуючи причин: Необучення працюючих поводження з електричним обладнанням; Невідповідність класифікаційних груп виконуючої роботи; Незабезпеченість персоналу індивідуальними засобами захисту; Незадовільний контроль технічним персоналом справного електричних установок; Неякісне і несвоєчасне виконання профілактичних ремонтів електричних установок; Відсутність на робочих місцях інструкцій по правилах поводження з електроустановками; Відсутність надійних обмежень струмоведучих частин; Порушення правил монтажу проводів, арматури і електрообладнання, а також монтажу обладнання без обліку категорії приміщення; Відсутність або неправильне виконання ізоляційних пристроїв; Зневажливе відношення до засобів захисту; Відсутність або неправильне проведення інструктажу по ТБ; Відсутність блокування включення автоматичним обладнанням; Відсутність устрою сигналізації ввімкненого стану обладнання і автоматики. Крім безпеки поразення електричним струмом виникає небезпека при роботі обертаючих частин.

Електричний струм може привести до пожежі або вибуху в результаті: Несправності електричних мереж і обладнання; Помилки при вмиканні компресорів; При перегріві кабелів і конденсаторних батарей внаслідок їх несправності або ненадійності з'єднань; При невиконанні технічних і організаційних заходів; При перевантаженні обладнання і мереж; При коротких замкненнях в мережах небезпека пожежі багатократно збільшується.



Рисунок А.1 – Небезпечні й шкідливі виробничі фактори

А1.4. Заходи при ліквідації шкідливих факторів

Для ліквідації шкідливих факторів в ДП передбачені наступні заходи: Герметизація вікон і дверей для ліквідації підвищеної швидкості повітря. Обладнання компресорної вентиляцією з діючими санітарними нормами підприємств. Для персоналу в машинному залі встановлюється шумоізолюване приміщення. Регулярне вологе прибирання для запобігання запиленості та замасленості поверхні. Віброізоляція компресорів шляхом установки на вільно вкладених фундаментах. Приміщення автоматики неузгодження фаз руху поршнів компресорів в цілях зменшення вібрації.

А1.5. Заходи по ліквідації небезпечних факторів

Для ліквідації небезпечних факторів передбачені наступні заходи:

- Вивчення персоналу безпечним методам роботи;
- Застосування безпечної техніки по ДЕСТ 12.2.007.0-75 і електрозахисних засобів ДЕСТ 12.1.009-76;
- Регулярний профілактичний і технічний контроль і догляд за обладнанням, контроль ізоляції;
- Застосування захисного відключення ДЕСТ 12.2.007.0-75;

- Застосування заземлення обладнання ДЕСТ 12.2.007.1-75;
- Виконання техніки безпеки при виконанні електроремонтних робіт.

До початку проведення робіт в електроустановках необхідно виконати технічні і організаційні заходи по забезпеченню електробезпеки.



Рисунок А1.2 – Організаційні та технічні заходи від небезпечних й шкідливих виробничих факторів

А1.6 Засоби індивідуального захисту від несприятливих факторів повітряного середовища.

Засоби індивідуального захисту застосовують для попередження або зменшення дії на працюючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Їх класифікують таким чином: засоби захисту органів дихання (протигази, респіратори, пневмошлеми, пневмомаски); спеціальний одяг (комбінезони, напівкомбінезони, куртки, костюми, брюки, халати, кофти, фартухи, жакети, рукавички); спеціальне взуття (чоботи, ботфорти, напівчоботи, ботінки, туфлі, галоші, боти); засоби захисту рук (рукавиці); засоби захисту голови (каски, шлеми,

шапки, шляпи, берети); засоби захисту обличчя (захисні маски, щитки); засоби захисту органів слуху (протишумні навушники і шлеми, вушні вкладиші); засоби захисту очей (захисні очки); захисні дерматологічні засоби (пасти, мазі, креми, миючі засоби).

A1.7 Розрахунок заземлення

У відповідності з ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання з струмопровідними частинами, але можуть потрапити під напругу, повинні бути заземлені

Трансформаторні підстанції напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль. З'єднання обмоток цехових трансформаторів Δ/Y нулем. Струм замикання на землю 27 А. Для цехового обладнання використовується заземлення. Цехові підстанції отримують живлення від 2 кабелів, що прокладені в одній траншеї.

Ґрунт – супісь, другий кліматичний район.

Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів і довжини з'єднувальної смуги з розміщенням на плані.

Визначаємо норму на опір заземлення R_3^H .

Якщо заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище:

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом}$$

Згідно ПУЕ, так як сумарна потужність струмоприймачів більш 100 кВА то R_3 повин бути не більше 4 Ом. Приймаємо $R_3 = 4 \text{ Ом}$.

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{табл} \cdot \psi = 200 \cdot 1,3 = 260 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

де $\rho_{табл}$ – табличне значення, для чорнозему $\rho_{табл} = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ табл. 3.10 [1];

ψ – підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів $\psi = 1,2 \dots 1,4$.

Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$R_o = 0,366 \cdot \frac{\rho_{розр}}{l} \cdot \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) =$$

$$= 0,366 \cdot \frac{260}{5} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{2,5} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 15,1 \text{ Ом}$$

де l – довжина заземлювача, приймаємо 5 м;

d – діаметр заземлювача (приймаємо стрижні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0,5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ Ом}$$

де h – глибина прокладки смуг (згідно ПУЕ – 0,5...0,8 м).

Приймаємо електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану і знаходимо орієнтовну кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_e}{R_3^H \cdot \eta_o} = \frac{15,1}{4,059} = 6,4 \approx 7 \text{ шт.}$$

де η_o – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для $\frac{a}{l} = \frac{4}{5} = 0,8$,

$$\eta_o = 0,59.$$

$a = 4$ м – відстань між електродами згідно ПУЕ.

Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_n = 1,05a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 7 = 29,4 \text{ м}$$

Опір смуги з урахуванням екранування:

$$R_n = 0,366 \cdot \frac{\rho_{розр}}{l_n \cdot \eta_n} \cdot \lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0,366 \cdot \frac{260}{29,4 \cdot 0,51} \cdot \lg \frac{2 \cdot 29,5^2}{0,01 \cdot 7} = 27,88 \text{ Ом}$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги шириною $b = 10$ мм та товщиною 5 мм

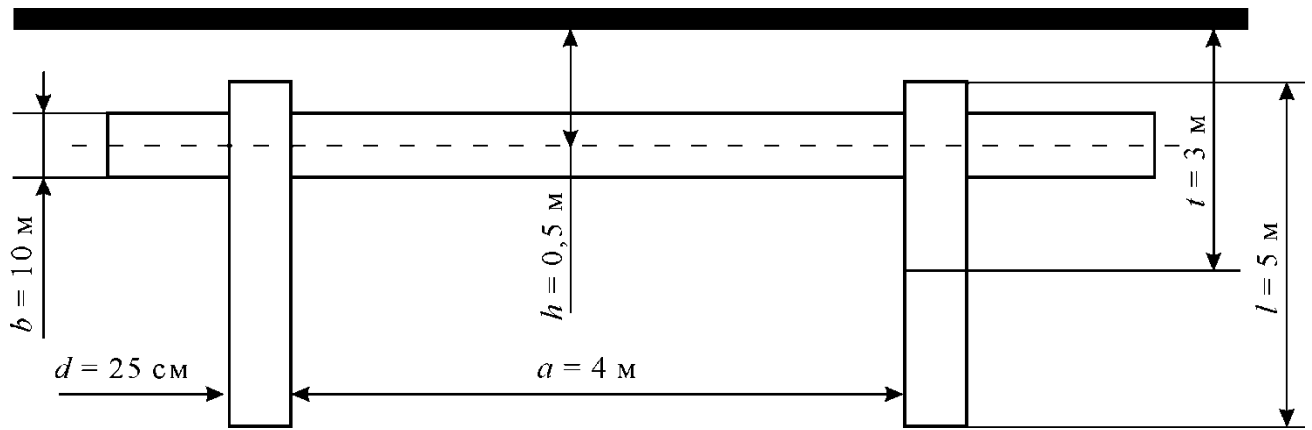


Рисунок А1.3 – Схема прокладки заземлення

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{mp} = \frac{R_n \cdot R_z^H}{R_n - R_z^H} = \frac{27,98 \cdot 4}{27,98 - 4} = 4,67 \text{ Ом}$$

Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{mp} \cdot \eta_o} = \frac{15,1}{4,67 \cdot 0,59} = 5,5 \approx 6 \text{ шт.}$$

Проводимо перевірку опору заземлювача і порівнюємо отримане значення з нормуємим:

$$\dots\dots\dots R_z = \frac{1}{\frac{1}{R_{mp}} + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\frac{1}{4,67} + \frac{1}{28,88}} = 3,99 \text{ Ом}$$

Перевірка: $3,99 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$

А1.8 Протипожежні заходи

Основним вогнегасильними речовинами є вода, пісок, піна, водяні розчини солей, негорючі гази, галоїдоводневі склади та сухі вогнегасильні порошки.

Вода є найбільш поширеними засобом гасіння пожеж. Потрапляючи у зону горіння, вода нагрівається і випаровується, поглинаючи велику кількість тепла. При випаровуванні води утворюється велика кількість пари (з 1 літра води – 1.7 літрів пари), який перешкоджає доступу повітря в осередок горіння.

Для гасіння можливого вогнища необхідно мати наступну кількість води:

$$W = \frac{3600 Q_p t_p n_h}{1000} = \frac{3600 \cdot 40 \cdot 43 \cdot 1}{1000} = 6192 \text{ м}^3$$

де W – необхідна протипожежна кількість води, м³;

Q_p – розрахункові витрати води, м³/с;

$$Q_p = Q_H - Q_{BH} = 30 + 10 = 40 \text{ м}^3/\text{с}$$

де Q_H , Q_{BH} – розрахункові витрати води на зовнішнє та внутрішнє пожежогасіння; t_p – розрахункова тривалість пожежі, $t_p = 34$; n_h – розрахункова кількість пожеж за рік, $n_h = 1$.

Одним з найважливіших заходів при гасінні пожеж є евакуація з приміщень виробничих будівель. Для евакуації людей у випадку пожежі виконано розрахунок загальної ширини евакуаційного проходу:

$$B = \frac{M \cdot C}{t \cdot f} = \frac{368 \cdot 0,6}{25 \cdot 4} = 2,2 \text{ м};$$

де M – кількість працюючих у найчисельнішу зміну;

$$M = \Pi + 0,05 \Pi = 350 + 0,05 \cdot 350 = 368 \text{ чол.};$$

де Π – кількість працюючих; C – номінальна ширина евакуаційного проходу ($C = 0,6$ м); t – час виходу потоку людей ($t = 25$ чол/хв); f – час, протягом якого усі працюючі вийдуть:

$$f = A/D = 40/20 = 2 \text{ хв} < t_n = 3 \text{ хв},$$

де A – найбільша довжина виходу ($A = 40$ м); V – швидкість руху людей ($V = 20$ м/хв).