

УДК 621.926-83  
№ держреєстрації 0110U000529  
Інв. №

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Державний вищий навчальний заклад  
«Національний гірничий університет»  
(Державний ВНЗ «НГУ»)

49005, г. Дніпропетровськ, пр. К.Маркса, 19; тел. (0562) 47-32-09,  
факс 744-62-14, телекс 143457 „AGAT SU” E-mail: ShevchSergey@gmail.com

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи  
д-р техн. наук, проф.  
\_\_\_\_\_ О.О. Бешта  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 р.

ЗВІТ  
про науково-дослідну роботу

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

по темі ГП-435  
(заключний)

Начальник НДЧ,  
канд. техн. наук, доц.

Р.О. Дичковський

Науковий керівник НДР,  
д-р техн. наук, академік НАН України

Г.Г. Півняк

2011

Рукопис закінчено 09.12.2011 р.

Результати цієї роботи розглянуто  
Вченою Радою НГУ,  
протокол № 3 від 12.12.2011 р.

## СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник НДР, академік НАН України, головний науковий співробітник	Г.Г. Півняк (розд. 1-3, формування напрямів досліджень)
Заступник наукового керівника НДР, д-р техн. наук, провідний науковий співробітник	В.І. Кириченко (вступ, розділ 3, аналіз результатів, висновки)
Відповідальний виконавець, д-р техн. наук, провідний науковий співробітник	С.І. Випанасенко (вступ, розділ 1, аналіз результатів, висновки)
Відповідальний виконавець, канд. техн. наук, провідний науковий співробітник	О.Б. Іванов (вступ, розділ 2, аналіз результатів, висновки)
Відповідальний виконавець, канд. техн. наук., ст. науковий співробітник	В.В. Кириченко (вступ, розділ 3, аналіз результатів, висновки)
Канд. техн. наук, старший науковий співробітник	О.І. Хованська (розділ 1.3)
Виконавець, канд. техн. наук., ст. науковий співробітник	І.А. Кирилов (вступ, розділ 2, аналіз результатів, висновки)
Старший науковий співробітник	О.Р. Ковальов (розділ 1.4)
Старший науковий співробітник	Р.О. Боровик (розділ 3)
Старший науковий співробітник	С.І. Федоров (літературні та патентні дослідження)
Науковий співробітник	П.В. Камишанський (літературні та патентні дослідження)
Молодший науковий співробітник	В.В. Барабан (розділ 3)
Молодший науковий співробітник	В.Ф. Куниця (розділ 3)
Молодший науковий співробітник	Ю.А. Папаїка (розділ 1.1, 1.2)
Молодший науковий співробітник	Н.С. Дрешпак (розділ 1.3, 1.4)
Фахівець I категорії	Н.В. Іванова (розділ 1.4, оформлення звіту)
Аспірант	А.В. Бакутін (розділ 3)
Нормоконтролер	Л.С. Шломіна

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 154 с., 52 рис., 7 табл., 54 джерел, 5 додатків.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси у неповнофазних режимах печей опору, системи транспорту з індуктивною передачею енергії, швидкодіючі схеми керування силовими комутаторами систем випереджального вимикання та встановлення їх параметрів залежно від аварійних режимів в мережі та силові комутатори для цих систем, процеси формування статичних і динамічних властивостей пускових характеристик синхронних двигунів із явновираженими полюсами.

Мета роботи полягає у підвищенні якості електричної енергії в мережах живлення печей опору, зменшенні втрат енергії в системі шахтного транспорту, розробці системи електропостачання для вибухонебезпечних виробництв на основі випереджаючого вимкнення електромереж при аварійній ситуації на основі контролю струморозподілу та швидкодіючих силових комутаторів, мінімізації втрат мережі та підвищенні надійності запуску двигунів із номінальним навантаженням за зниженої напруги шляхом оптимізації співвідношення між активними опорами демпферної обмотки та кола збудження.

Наукова новизна в тому, що вперше запропоновано ввести поняття коефіцієнтів використання потужності при неповнофазних режимах роботи печей опору та визначення залежності для їх розрахунку, обґрунтовано енергоефективні режими роботи системи транспорту на основі регулювання вихідної частоти та струму тягової мережі; в аналізі роботи швидкодіючих комутаторів стосовно схем випереджального вимикання, в обґрунтуванні принципу підвищення їх швидкодії для розробки нового комутатора. Для алгоритмів програмного формування напруги збудника при визначенні середньої та амплітуди і фази змінної складової електромагнітного моменту враховано динаміку нагрівання всіх активних опорів синхронного електроприводу, насичення магнітних кіл та використання реакторів, що, в комплексі з використанням оптимізації розрядного опору і підсиленням пускової обмотки синхронного двигуна, більш якісно і надійніше забезпечує його розганяння включно до синхронної швидкості. Розроблені критерії та напрямок розробки адаптивної системи програмного формування механічних характеристик.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблена методика симетрування мережі живлення печей опору, на її основі створена технологія нагріву деталей, визначений граничний рівень напруги перетворювача частоти в технології індукційної передачі енергії рухомому складу; розроблено новий швидкодіючий комутатор, структурна та принципова схеми системи підвищеної надійності на його основі та на основі контролю струморозподілу в мережі. Практична цінність роботи і в тому, що завдяки удосконаленню математичної моделі синхронного двигуна та принципів програмного керування збудником, підсиленню пускової обмотки і оптимізації розрядного опору в асинхронному режимі стає більш гарантованою надійність важкого пуску за мінімального запасу встановленої потужності приводу.

НЕПОВНОФАЗНИЙ РЕЖИМ, МЕТОДИКА СИМЕТРУВАННЯ, ШАХТНИЙ  
ТРАНСПОРТ, ВИПЕРЕДЖАЛЬНЕ ВИМИКАННЯ, СТРУМОРОЗПОДІЛ,  
ШВИДКОДІЮЧИЙ КОМУТАТОР, ВИБУХОБЕЗПЕКА, ІСКРОБЕЗПЕЧНІ КОЛА,  
СИНХРОННИЙ ДВИГУН, РЕАКТОР, НАСИЧЕННЯ, НАГРІВАННЯ, РОЗРЯДНИЙ  
ОПІР

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 Розробка методик підвищення якості електричної енергії в системах електроспоживання.....	12
1.1 Графіки електричних навантажень печей опору в неповнофазних режимах їх роботи.....	12
1.1.1 Показники графіків електричних навантажень ЕПС при несиметричних режимах.....	12
1.1.2 Виключення нерівномірності розподілу навантаження за допомогою ЕПС.....	20
1.2 Симетрування цехового навантаження при неповнофазних режимах печей опору.....	27
1.2.1 Математична модель для визначення показників несиметрії напруг.....	27
1.2.2 Вплив режимів роботи печі опору на показники несиметрії напруги.....	39
1.3 Характеристики системи індукційної передачі енергії.....	44
1.3.1 Характеристики системи індукційної передачі енергії рухомому складу за зміни протяжності виробки.....	44
1.3.2 Аналіз параметрів тягової мережі транспорту з індукційною передачею енергії при зміні її навантаження.....	48
1.4 Обґрунтування параметрів енергозаощаджуючих режимів.....	50
1.4.1 Аналіз зміни навантаження при регулюванні частоти тягової лінії.....	53
1.4.2 Оцінка способів регулювання струму в тяговій мережі.....	55
Висновки до розділу.....	58
2 Системи електропередачі підвищеної надійності для вибухонебезпечних виробництв.....	61
2.1 Розробка схем керування силовим комутатором системи електропередачі підвищеної надійності.....	61
2.2 Аналіз роботи силових швидкодіючих комутаторів для систем випереджального вимикання.....	63

2.3	Розробка схеми силового швидкодіючого комутатора для систем електропередачі підвищеної надійності.....	77
2.4	Розробка структурної та принципової схеми системи електропередачі підвищеної надійності.....	79
	Висновки до розділу .....	82
3	Дослідження динамічних властивостей електромеханічної системи та розробка рекомендацій щодо створення нового типу синхронного приводу .....	83
3.1	Розробка методу визначення раціональних параметрів ЕМС з СД та програмно-керованим збудником .....	83
3.1.1	Оцінка впливу та удосконалений метод врахування насичення магнітних кіл.....	83
3.1.2	Вплив опору кола збудження на форму пускових характеристик СД з програмно-керованим збудником .....	93
3.1.3	Вплив активних опорів обмоток і кола збудження на рівень навантажень мережі живлення .....	96
3.1.4	Метод визначення раціональних параметрів ЕМС з СД та програмно-керованим збудником.....	97
3.2	Розробка моделі і алгоритму дослідження динамічних властивостей ЕМС з СД та програмно-керованим збудником .....	99
3.3	Дослідження динамічних властивостей ЕМС з програмно-керованим збудником та раціональними параметрами пускової обмотки і кола збудження .....	103
3.4	Розробка рекомендацій щодо створення нового типу синхронного потужного електропривода.....	105
3.4.1	Принцип побудови адаптивного до збурень датчика електромагнітного моменту .....	105
3.4.2	Рекомендації щодо створення синхронного електропривода нового типу .....	115
	Висновки до розділу .....	121
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	123

Перелік посилань .....	127
Додаток А Звіт про патентні дослідження .....	133
Додаток Б Акт про впровадження результатів НДР .....	151
Додаток В Витяг з протоколу № 12 засідання кафедри систем електропостачання .....	152
Додаток Г Витяг з протоколу № 3 засідання секції науково-технічної ради ДВНЗ «НГУ» за науковим напрямом «Проблеми гірничої та металургійної електроенергетики, енергозбереження» .....	153
Додаток Д Рецензія.....	154

## ВСТУП

Регулювання потужності печей опору часто здійснюють шляхом використання тиристорних регуляторів напруги. Якщо межі регулювання значні, то це призводить до суттєвого погіршення енергетичних показників регуляторів. Ситуація може бути покращеною завдяки використанню неповнофазних режимів роботи печей опору. Переведення печі із повнофазного режиму в неповнофазний супроводжується зменшенням кута регулювання тиристорів, що сприяє покращенню коефіцієнта потужності, показників якості електричної енергії. В роботі визначені умови переходу до неповнофазних режимів, встановлений їх зв'язок з навантаженням печі, запропонована методика симетрування навантаження в мережі живлення.

В системі шахтного транспорту з індуктивною передачею енергії розраховані перехідні процеси, що дозволило визначити граничні рівні напруги на елементах системи транспорту. Запропоновані підходи до зниження втрат енергії в тяговій мережі. Це досягається зниженням значення струму тягової мережі в рамках, коли електровози на лінії не працюють. Зміна частоти струму перетворювача дозволяє обмежити рівень напруги на затисках тягової мережі, що сприяє захисту перетворювача від перевантажень, підвищує його енергетичні показники.

В умовах вибухонебезпечних виробництв попередження дугоутворення при пошкодженнях та випереджальне вимкнення мережі і гасіння накопиченої в ній енергії підвищують безпеку використання електрообладнання та пожежну безпеку. Для цього слід формувати сигнал про аварійну ситуацію до розвитку дугоутворення, а також збільшувати швидкодію комутатора з урахуванням припустимого рівня перенапруги. Однак існуючі системи не забезпечують необхідної швидкодії. В проекті були досліджені методи контролю складових аварійного струму при замиканнях на початкових стадіях процесу обриву віток електропостачання, в результаті чого на основі контролю струморозподілу однопотенціальних струмопровідних віток та використання швидкодіючих силових комутаторів була розроблена система випереджального вимкнення, яка вилучить аварійні порушення мереж енергопостачання та запалення вибухонебезпечної атмосфери на промислових підприємствах.



Труднощі запуску потужних синхронних двигунів із номінальним навантаженням за зниженої напруги мережі традиційно вирішують підвищенням запасу їх потужності із зростанням пускового струму та ціни. Іноді використовують частотні перетворювачі із значним зростанням капітальних вкладень і погіршенням загального ККД приводу. Відомо і про методи циклічного та програмного керування тиристорними збудниками та пропозицію оптимізувати активний опір демпферної обмотки відповідно до вимог щодо пускового моменту з урахуванням потужності мережі живлення, однак на сьогодні потенційні можливості методів не враховують додаткові можливості від регулювання опору кола збудження. В роботі будуть досліджені струми мережі живлення та моменти потужних синхронних двигунів у пускових режимах, їх зв'язки із режимами програмного керування та параметрами елементів системи збудження. Результатом досліджень буде розробка, яка мінімізує втрати в елементах електричних мереж з одночасним підвищенням надійності потужних електромеханічних систем із мінімальним запасом встановленої потужності двигунів та збудників за зниженого рівня напруги мережі шляхом оптимізації демпферної системи двигуна, алгоритмів керування збудником та опору кола збудження із врахуванням вимог мережі щодо обмеження пускового струму двигуна.

**Мета роботи** полягає у підвищенні якості електричної енергії в мережах живлення печей опору, зменшенні втрат енергії в системі шахтного транспорту, розробці системи електропостачання для вибухонебезпечних виробництв на основі випереджаючого вимкнення електромереж при аварійній ситуації на основі контролю струморозподілу та швидкодіючих силових комутаторів, мінімізації втрат мережі та підвищенні надійності запуску двигунів із номінальним навантаженням за зниженої напруги шляхом оптимізації співвідношення між активними опорами демпферної обмотки та кола збудження.

**Наукова новизна** в тому, що вперше запропоновано ввести поняття коефіцієнтів використання потужності при неповнофазних режимах роботи печей опору та визначення залежності для їх розрахунку, обґрунтовано енергоефективні режими роботи системи транспорту на основі регулювання вихідної частоти та струму тягової мережі; в аналізі роботи швидкодіючих комутаторів стосовно схем випереджа-

льного вимикання, в обґрунтуванні принципу підвищення їх швидкодії для розробки нового комутатора. Для алгоритмів програмного формування напруги збудника при визначенні середньої та амплітуди і фази змінної складової електромагнітного моменту враховано динаміку нагрівання всіх активних опорів синхронного електроприводу, насичення магнітних кіл та використання реакторів, що, в комплексі з використанням оптимізації розрядного опору і підсиленням пускової обмотки синхронного двигуна, більш якісно і надійніше забезпечує його розганяння включно до синхронної швидкості. Також розроблено нові критерії розробки адаптованої системи керування пусковим режимом синхронного двигуна.

**Ідея роботи** в тому, що використання неповнофазних режимів роботи печей опору призводить до покращення їх енергетичних показників. В системі шахтного транспорту в окремих режимах необхідно зменшувати струм тягової мережі, що суттєво знизить втрати енергії. А також в тому, що основою для визначення особливостей структурної побудови та формування загальних підходів до вирішення проблем існуючих систем електропостачання є аналіз їх режимів роботи і що підвищити безпеку використання електрообладнання та пожежну безпеку в умовах вибухонебезпечних виробництв можливо шляхом розробки та використання вибухобезпечної системи електропередачі підвищеної надійності для живлення підземних енергоприймачів та іскробезпечної лінії електропередачі підвищеної потужності, що зменшення втрат в мережі живлення та підвищення надійності потужного синхронного двигуна можливо досягти оптимізацією активних опорів кола збудження та демпферної обмотки, розробкою принципів створення адаптованої системи керування, що у підсумку знижує необхідну потужність і ціну збудника при збереженні динамічних властивостей приводу.

**Практична цінність** роботи полягає в тому, що розроблена методика симетрування мережі живлення печей опору, на її основі створена технологія нагріву деталей, визначений граничний рівень напруги перетворювача частоти в технології індукційної передачі енергії рухомому складу; розроблено новий швидкодіючий комутатор, структурна та принципова схеми системи підвищеної надійності на його основі та на основі контролю струморозподілу в мережі. Практична цінність роботи

і в тому, що завдяки удосконаленню математичної моделі синхронного двигуна, принципів адаптованого програмного керування збудником, оптимізації активного опору кола збудження та демпферної обмотки стає більш гарантованою надійність важкого пуску за мінімального запасу встановленої потужності приводу.

Дана НДР виконується згідно з наказом Міністерства освіти і науки України від 22.07.09 № 686 та наказом по НГУ від 18.12.09 № 365. Строк виконання роботи: 01.10 – 12.11.

# 1 РОЗРОБКА МЕТОДИК ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

## 1.1 Графіки електричних навантажень печей опору в неповнофазних режимах їх роботи

### 1.1.1 Показники графіків електричних навантажень ЕПС при несиметричних режимах

Регульовальна залежність ЕПС як симетруючій пристрій отримана на основі сталих значень потужності пічної установки. В реальних режимах роботи печі ці значення потужності змінюються протягом циклу термообробки у вельми широкому діапазоні. Тому для підвищення точності визначення необхідно визначати параметри несиметрії, використовуючи середні потужності. Для цього необхідно досліджувати зміну коефіцієнтів, що характеризують електричні навантаження. Такими є коефіцієнти використання  $k_u$ , включення  $k_B$  і завантаження  $k_z$  ЕПС.

При використанні запропонованого підходу до управління режимами електроспоживання ЕПС можна виділити три характерні режимні зони роботи електропечей: трифазний режим прогрівання печі, двофазний режим при відключенні однієї з фаз, однофазний режим при використанні електропечі в температурних режимах значно нижче номінальних. Характер зміни потужності в часі технологічного циклу нагріву показаний на рис. 1.1. На графіках показана всі можливі зони зміни потужності, заявлені заводами-виготівниками:

1. Перша зона трифазного живлення нагрівачів. В цьому режимі відбувається прогрівання робочого простору печі, а також основний процес термообробки при максимальному завантаженні печі і максимальній робочій температурі. Потужність що використовується при цьому змінюється в діапазоні  $0,67 \leq \frac{P}{P_{ном}} \leq 1,4$ . За даними заводів-виготівників, час прогрівання сучасних ЕПС при повному завантаженні заготівками не перевищує 0,5 години [1];
2. Друга зона двофазного живлення нагрівачів. При цьому відключені нагрівачі в одній з фаз, а потужність що залишилася перерозподілена по двох робочих

фазах. Такий режим існує при зниженні споживаної потужності (менше  $P_{ЕПС}=0,67$ ). Потужність що використовується при цьому змінюється в діапазоні  $0,33 \leq \frac{P}{P_{ном}} \leq 0,67$ . Характер подальшої зміни потужності в часі залежить від температури нагріву, що вимагається. Якщо потужність не знижується нижче  $P_{ЕПС}=0,33$ , то піч залишається в двофазному режимі до кінця циклу термообробки. Інакше час роботи печі в двофазному режимі дуже незначний і залежить від швидкості зміни ПД-регуляторів потужності нагрівачів;

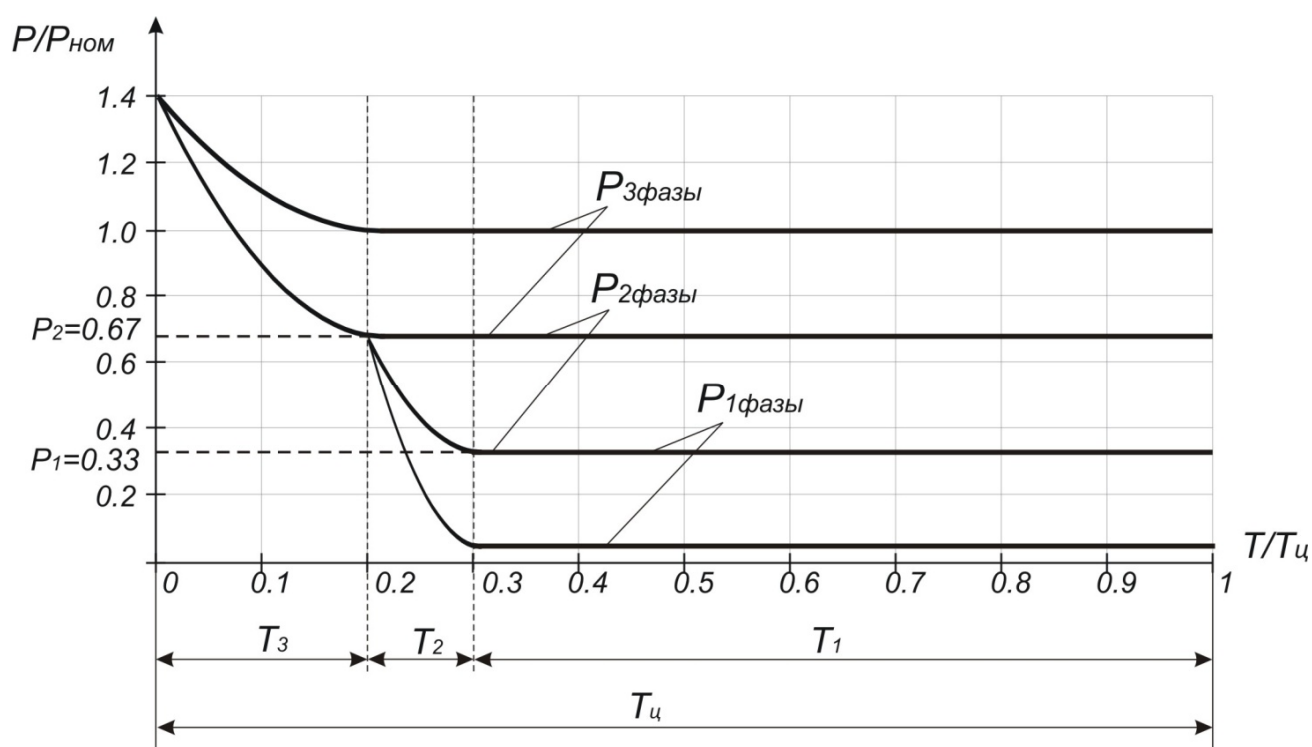


Рисунок 1.1 – Зміна потужності ЕПС в часі циклу термообробки при використанні спеціальних режимів

Третя зона однофазного живлення нагрівачів. Даний електричний режим може мати місце при використанні ЕПС для сушки виробів або запічки ізоляції електричних машин, коли не потрібні високі температури. В цьому випадку використовуються нагрівачі тільки в одній фазі, а потужність змінюється в діапазоні  $0,05 \leq \frac{P}{P_{ном}} \leq 0,33$ .

Основним показником споживання електроенергії є середня потужність. Для її визначення в електропостачанні використовують ряд коефіцієнтів. Як було показано, зміна потужності ЕПС в часі має складний характер і користуватися довідковими значеннями коефіцієнтів використання неприпустимо через значну погрішність. Для усунення цього розробимо алгоритм визначення коефіцієнтів використання з урахуванням спеціальних режимів роботи ЕПС. Вважаємо, що в трьох характерних зонах потужність має різний характер зміни. Тому визначення  $k_u$  проводимо для всіх зон роздільно.

Необхідно відзначити, що застосування вказаних коефіцієнтів для розрахунку електричних навантажень і оцінці споживання електроенергії допустимо лише у разі приведення отриманих значень до тривалості робочої зміни підприємства.

Для визначення зонних коефіцієнтів використання введемо деякі обмеження, що зробить розрахунки більш універсальними:

— Зміна часу циклу термообробки найбільш точно може характеризуватися коефіцієнтом включення  $k_B$ , який визначається в характерних зонах таким чином:

а) при приведенні потужності до тривалості циклу:

- *трифазний режим (перша зона):*

$$k_{B3} = T_u / T_u = 1; \quad (1.1)$$

- *двофазний режим (друга зона):*

$$k_{B3} = T_3 / T_u; \quad k_{B2} = (T_u - T_3) / T_u \quad (1.2)$$

де  $T_u$  – тривалість циклу термообробки;

$T_3$  – тривалість роботи печі в трифазному режимі.

- *однофазний режим (третья зона):*

$$k_{B3} = T_3 / T_u; \quad k_{B2} = T_2 / T_u; \quad k_{B1} = (T_u - T_3 - T_2) / T_u \quad (1.3)$$

де  $T_2$  – тривалість роботи печі в двофазному режимі;

$T_1$  – тривалість роботи печі в однофазному режимі.

б) при приведенні потужності до тривалості зміни:

- *трифазний режим (перша зона):*

$$k_{ВЗ} = T_{ц}/T_{смены}, \quad (1.4)$$

де  $T_{смены}$  – тривалість робочої зміни.

- *двофазний режим (друга зона):*

$$k_{ВЗ} = T_3/T_{смены}; \quad k_{В2} = (T_{ц} - T_3)/T_{смены}; \quad (1.5)$$

- *однофазний режим (третья зона):*

$$k_{ВЗ} = T_3/T_{смены}; \quad k_{В2} = T_2/T_{смены}; \quad k_{В1} = (T_{ц} - T_3 - T_2)/T_{смены}. \quad (1.6)$$

— Тривалість циклу термообробки виробів в електропечах опору залежить від технології, але, як правило, не перевищує тривалості робочої зміни. Тому для аналізу приймемо наступні часи циклів:  $T_{ц}=1, 2, 4, 6, 8$  годин. Тривалість зміни складає  $T_{смены}=8$  годин, що відповідає дійсності на більшості машинобудівних підприємств;

— Для визначення коефіцієнтів використання скористаємося положенням, що коефіцієнт  $k_u$  рівний добутку коефіцієнтів включення  $k_B$  і завантаження  $k_3$ . Коефіцієнти завантаження визначені в кожній характерній зоні і мають вказані вище інтервали. Приймемо для розрахунків наступні їх значення:

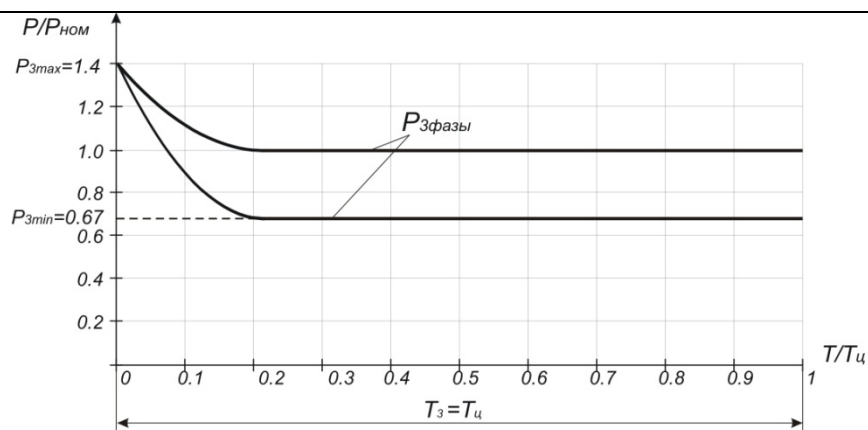
- *трифазний режим (перша зона)  $k_3=1,4; 1,0; 0,67$ .*

- *двофазний режим (друга зона)  $k_3=0,67; 0,5; 0,33$ .*

- *однофазний режим (третья зона)  $k_3=0,33; 0,2; 0,05$ .*

З урахуванням вказаних допущень був проведений розрахунок коефіцієнтів використання на всіх можливих циклах роботи ЕПС. Результати надані в таблицях 1.1-1.4.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти використання ЕПС (режим №1)



Характер зміни електричних режимів ЕПС

- Трифазний режим

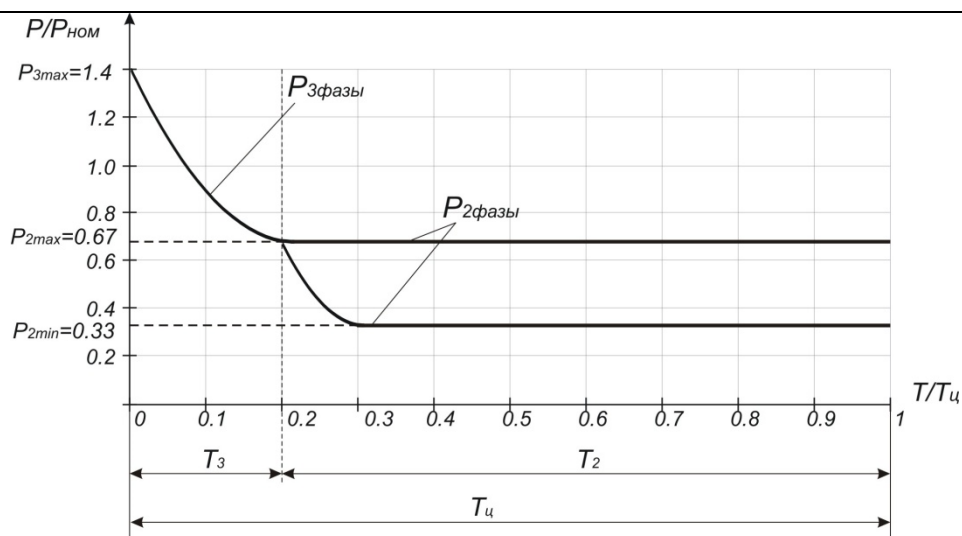
$T_{ц}$ ГОДИН	$k_{В}$ цикла	$k_{В}$ зміни	$k_{и}$ цикла			$k_{и}$ зміни		
			$k_{з}$			$k_{з}$		
			1,4	1	0,67	1,4	1	0,67
1	1,0	0,13	1,0	1,0	0,67	0,18	0,13	0,08
2	1,0	0,25	-	1,0	0,67	-	0,25	0,17
4	1,0	0,50	-	1,0	0,67	-	0,50	0,34
6	1,0	0,75	-	1,0	0,67	-	0,75	0,50
8	1,0	1,00	-	1,0	0,67	-	1,00	0,67

- Двофазний режим — відсутній

- Однофазний режим — відсутній



Таблиця 1.2 – Коефіцієнти використання ЕПС (режим №2)



Характер зміни електричних режимів ЕПС

- Трифазний режим

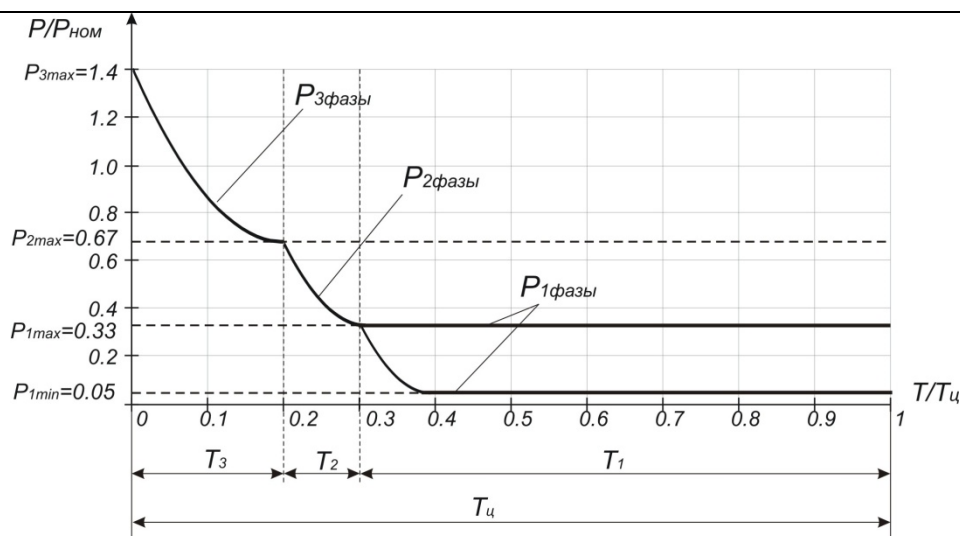
$T_{ц}$ ГОДИН	$k_{В}$ цикла	$k_{В}$ зміни	$k_{и}$ цикла			$k_{и}$ зміни		
			$k_3$			$k_3$		
			1,4	1	0,67	1,4	1	0,67
1	0,50	0,06	0,70	0,50	0,34	0,09	0,06	0,04
2	0,25	0,06	-	0,25	0,17	-	0,06	0,04
4	0,13	0,06	-	0,13	0,08	-	0,06	0,04
6	0,08	0,06	-	0,08	0,06	-	0,06	0,04
8	0,06	0,06	-	0,06	0,04	-	0,06	0,04

- Двофазний режим

$T_{ц}$ ГОДИН	$k_{В}$ цикла	$k_{В}$ зміни	$k_{и}$ цикла			$k_{и}$ зміни		
			$k_3$			$k_3$		
			0,67	0,5	0,33	0,67	0,5	0,33
1	0,50	0,06	0,34	0,25	0,17	0,04	0,03	0,02
2	0,75	0,19	0,50	0,38	0,25	0,13	0,09	0,06
4	0,88	0,44	0,59	0,44	0,29	0,29	0,22	0,14
6	0,92	0,69	0,61	0,46	0,30	0,46	0,34	0,23
8	0,94	0,94	0,63	0,47	0,31	0,63	0,47	0,31

- Однофазний режим – відсутній

Таблиця 1.3 – Коефіцієнти використання ЕПС (режим №3)



Характер зміни електричних режимів ЕПС

- Трифазний режим

$T_{ц}$ ГОДИН	$k_{В}$ цикла	$k_{В}$ зміни	$k_{и}$ цикла			$k_{и}$ зміни		
			$k_3$			$k_3$		
			1,4	1	0,67	1,4	1	0,67
1	0,50	0,06	0,70	0,50	0,34	0,09	0,06	0,04
2	0,25	0,06	-	0,25	0,17	-	0,06	0,04
4	0,13	0,06	-	0,13	0,08	-	0,06	0,04
6	0,08	0,06	-	0,08	0,06	-	0,06	0,04
8	0,06	0,06	-	0,06	0,04	-	0,06	0,04

- Двофазний режим

$T_{ц}$ ГОДИН	$k_{В}$ цикла	$k_{В}$ зміни	$k_{и}$ цикла			$k_{и}$ зміни		
			$k_3$			$k_3$		
			0,67	0,5	0,33	0,67	0,5	0,33
1	0,10	0,01	0,07	0,05	0,03	0,01	0,01	0,00
2	0,05	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
4	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
6	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00

- Однофазний режим

$T_{ц}$ ГОДИН	$k_{В}$ цикла	$k_{В}$ зміни	$k_{и}$ цикла			$k_{и}$ зміни		
			$k_3$			$k_3$		
			0,33	0,2	0,05	0,33	0,2	0,05
1	0,40	0,05	0,13	0,08	0,02	0,02	0,01	0,00
2	0,70	0,18	0,23	0,14	0,04	0,06	0,04	0,01
4	0,85	0,43	0,28	0,17	0,04	0,14	0,09	0,02
6	0,90	0,68	0,30	0,18	0,05	0,22	0,14	0,03
8	0,93	0,93	0,31	0,19	0,05	0,31	0,19	0,05

Таким чином, були отримані значення коефіцієнтів використання при різних режимних комбінаціях. Для практичного застосування отриманих значень при оцінці несиметричних режимів, необхідно отримати середні значення коефіцієнтів використання в характерних зонах і загальні середні коефіцієнти використання. Значення вказаних коефіцієнтів наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Середні значення коефіцієнтів  $k_{и}$  (режим №1)

$T_{и}$ годин	<i>Режим №1</i>				
	Трифазний режим		Двофазний режим		Однофазний режим
	$k_{и}$ циклу	$k_{и}$ зміни			
1	1,00	0,13			
2	0,84	0,21			
4	0,84	0,42	-		-
6	0,84	0,63			
8	0,84	0,84			

$T_{и}$ годин	<i>Режим №2</i>				
	Трифазний режим		Двофазний режим		Однофазний режим
	$k_{и}$ циклу	$k_{и}$ зміни	$k_{и}$ циклу	$k_{и}$ зміни	
1	0,51	0,06	0,25	0,03	
2	0,21	0,05	0,38	0,09	
4	0,10	0,05	0,44	0,22	-
6	0,07	0,05	0,46	0,34	
8	0,05	0,05	0,47	0,47	

$T_{и}$ годин	<i>Режим №3</i>					
	Трифазний режим		Двофазний режим		Однофазний режим	
	$k_{и}$ циклу	$k_{и}$ зміни	$k_{и}$ циклу	$k_{и}$ зміни	$k_{и}$ циклу	$k_{и}$ зміни
1	0,51	0,06	0,05	0,01	0,08	0,01
2	0,21	0,05	0,03	0,01	0,14	0,03
4	0,10	0,05	0,01	0,01	0,16	0,08
6	0,07	0,05	0,01	0,01	0,17	0,13
8	0,05	0,05	0,01	0,01	0,18	0,18

Отримані середні значення коефіцієнтів дають об'єктивну оцінку споживання електроенергії ЕПС при управлінні режимами живлення печі в реальному часі.

### 1.1.2 Виключення нерівномірності розподілу навантаження за допомогою ЕПС

Загальновідомо, що практично неможливо забезпечити рівномірний розподіл однофазних навантажень по фазах, тим більш ураховуючи динаміку її пофазної зміни при зміні технологічного процесу. Розроблені та впроваджені способи зниження несиметрії на даному рівні розподілу електроенергії [2-5]. Ці способи в основному зв'язані з застосуванням спеціальних симетруючих пристроїв, що працюють за різними принципами. Недолік застосування симетруючих пристроїв полягає в тому, що в деяких випадках їх потужність досягає або перевершує потужність несиметричних навантажень, що істотно підвищує вартість системи електропостачання.

Оскільки електропечі опору є трифазними електроприймачами, і доведена можливість проведення процесу нагріву в неповнофазному режимі, то з'являється можливість усунення несиметричних режимів за допомогою пічних установок без застосування дорогих симетруючих пристроїв. При використанні запропонованих неповнофазних режимів електропечей опору можливе режимне регулювання несиметрії, що є новим і маловивченим в області якості і регулюванні електроспоживання.

Електропечі опору – цехові приймачі електроенергії напругою 0,4 кВ. Окрім електропечей до складу споживачів цехових трансформаторів промислових підприємств входять асинхронні двигуни приводів металоріжучих верстатів, вентиляторів, насосів, а також зварювальні і пічні трансформатори, освітлювальне навантаження. В реальних умовах, як правило, неможливо добитися рівномірного розподілу навантаження по фазах мережі живлення. Важливе дослідження неповнофазних режимів роботи електропечей опору з позиції їх впливу на нерівномірність розподілу навантаження в цехових мережах. Дослідження нерівномірності навантаження створює основу для аналізу несиметричних режимів струмів і напруг, і на початковому етапі найбільш прийнятне.

Для оцінки розподілу навантаження по фазах трифазної мережі використовують коефіцієнт нерівномірності  $\xi_{x0}$ , який показує відношення нерівномірного навантаження до трифазної або однофазної, розподіленій по фазах рівномірно. Вважа-

ється, що розподіл по фазах виконаний рівномірно, якщо  $\xi_{x0}$  не перевищує 15% загального навантаження вузла системи електропостачання.

Для оцінки впливу несиметричних режимів електропечей на рівномірність розподілу навантаження по фазах мережі живлення розглянемо зміну нерівномірності  $\xi$  при різних потужностях печі опору  $P_{печи} = var$  і номінальних потужностях цехових трансформаторів 630, 1000 і 1600 кВА. Прийняті потужності трансформаторів найбільш часто застосовуються в цехових КТП.

Запропонований в роботі спосіб проведення нагріву в неповнофазних режимах має симетруючий ефект для системи напруг. Проте для його успішного застосування необхідна точність визначення найбільш завантаженої фази мережі. Для оцінки впливу відключення однієї з фаз трифазної печі опору на рівномірність розподілу навантаження по фазах живлячої мережі розглянемо наступні окремі режими електроспоживання:

— Відключення фази відбувається при симетричному навантаженні цехового трансформатора (коефіцієнт нерівномірності  $\xi = 0$ ). Такий спосіб дає можливість визначити, який ефект має двофазний режим електропечі.

— Однофазний режим роботи електропечі також моделюється при симетричному зовнішньому навантаженні.

На нерівномірність розподілу навантаження впливають показники графіків (коефіцієнти використання) трифазних симетричних приймачів і коефіцієнти використання самої печі, що істотно ускладнює дослідження.

Для універсальності досліджень приймемо наступні діапазони зміни коефіцієнтів:

- коефіцієнти використання трифазних приймачів  $K_{исрз} = 0,1...0,6$ ;
- коефіцієнт використання печі  $k_{un} = 0,4...0,9$ ;
- коефіцієнти потужності трифазних приймачів  $\cos \varphi_3 = 0,7...0,9$ .

Аналіз процесів формування нерівномірних навантажень виконаний для стандартного вузла навантаження цехової розподільної мережі промислового підприємства (рис. 1.2).

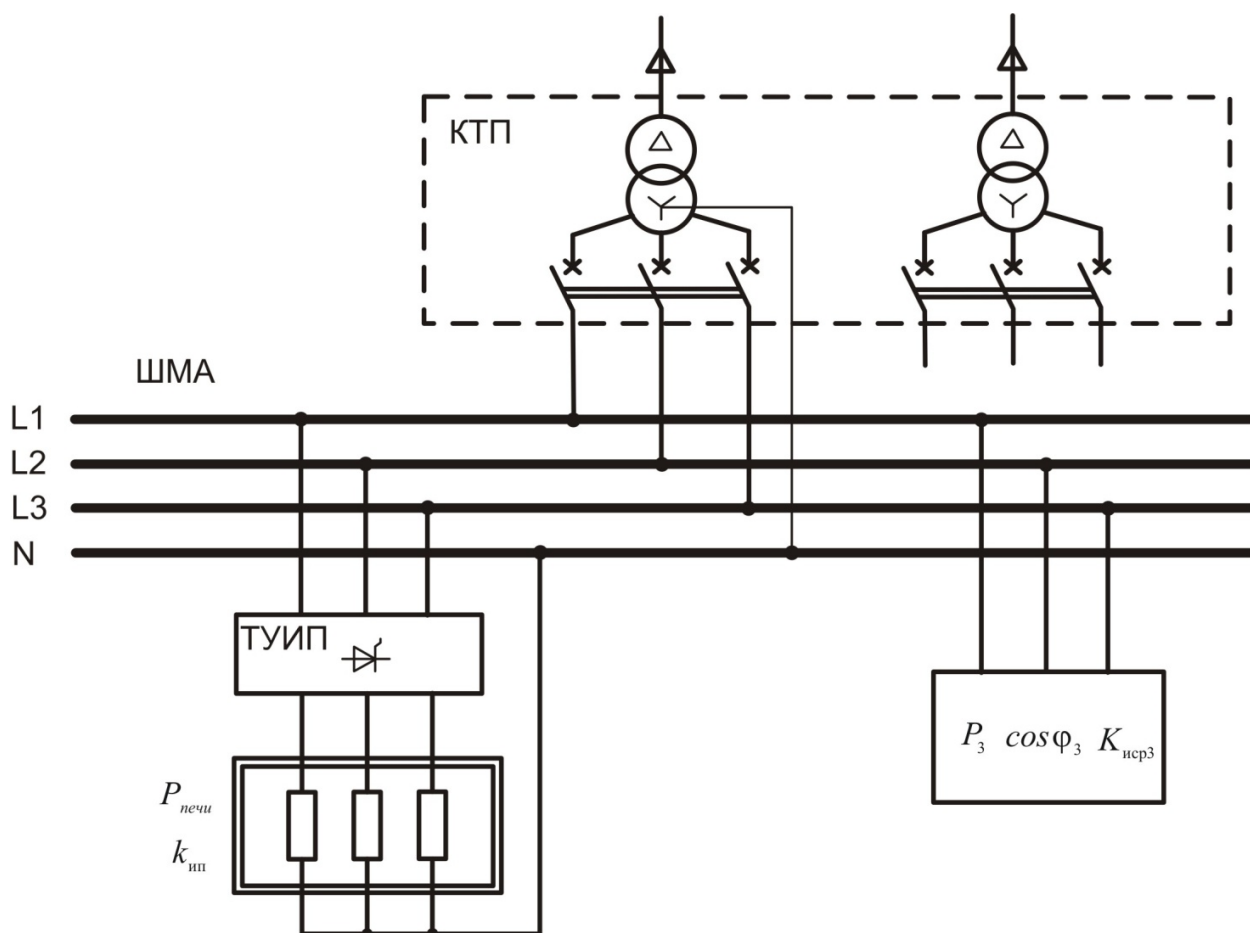


Рисунок 1.2 – Вузол навантаження цехової розподільної мережі

Прийнятий вузол навантаження – це магістральний шинопровод, від якого одночасно одержують живлення трифазні симетричні приймачі ( $P_3, K_{иср3}, \cos \varphi_3$ ) і несиметричне навантаження, яке формується шляхом переключу трифазної печі опору в неповнофазні режими. Несиметричне навантаження має параметри  $P_{печи}, k_{ун}$ . В результаті аналізу з урахуванням наведених параметрів був отриманий ряд залежності  $\xi = f(K_{иср3}, k_{ун})$ . Залежність сформована так, щоб була можливість оцінити межі можливої зміни нерівномірності при однофазних і двофазних режимах живлення електропечей. Отримана залежність носить інформативний характер для оцінки впливу параметрів графіків навантаження, а також розподіли несиметричних навантажень по фазах на значення коефіцієнта нерівномірності навантаження.

Нерівномірність розподілу навантаження по фазах трифазної мережі у разі змішаного з'єднання трифазних і однофазних приймачів визначається з урахуванням

того, що максимально завантажена фаза вибирається по середньому навантаженню [2]. При цьому враховуємо потужності печі в трьох можливих режимах роботи: трифазний, двофазний і однофазний, які будуть перерозподілені між фазами для симетрування. Окремий випадок залежності, отриманої для даних умов, має вигляд:

$$\xi = \frac{P_{MAX} - (P_{MIN} + P_2 \text{ЭПС} k_{un2} + P_1 \text{ЭПС} k_{un1})}{P_{MIN} + \frac{(P_3 + P_3 \text{ЭПС} k_{un3})}{3}} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

де  $P_{MIN}$  – середні навантаження однофазних електроприймачів максимально і мінімально завантажених фаз відповідно;

$P_3$  – середнє навантаження трифазних електроприймачів;

$P_3 \text{ЭПС}$ ,  $P_1 \text{ЭПС}$  – потужність ЕПС в трифазному, двофазному або однофазному режимах відповідно;

$k_{un3}$ ,  $k_{un1}$  – коефіцієнти використання ЕПС при трифазному, двофазному або однофазному режимах відповідно

Залежність (1.6) визначає значення коефіцієнта нерівномірності при допущенні: якщо ЕПС використовується як симетруючий пристрій, то потужність нагрівача, що залишився в роботі після перемикань, живиться від фази, котра має найменше навантаження. У разі неможливості переходу на неповнофазний режим, потужність ЕПС складає частину трифазної симетричної потужності навантаження.

Для отримання можливості вибирати найраціональніший режим симетрування навантаження, були отримані залежності коефіцієнта нерівномірності  $\xi$  від відношень потужностей найбільше завантаженої до найменше завантаженої фази. Крім того виведена залежність  $\xi$  від відношень потужності симетричної трифазної потужності до потужності самої завантаженої фази (рис. 1.3). Отримана залежність дозволяє визначити межі, в яких коефіцієнт нерівномірності не перевищує 15 %, що говорить про практично симетричний розподіл потужності по фазах. При цьому залежність узагальнена таким чином, що є можливість визначити фактичний коефіцієнт  $\xi$  при будь-яких співвідношеннях однофазних і трифазних симетричних наван-

тажень. Як видно, характер кривих змінюється при збільшенні абсолютної різниці потужностей ДР у фазах з найбільшим і найменшим навантаженнями, що говорить про меншу ефективність симетрування даним способом.

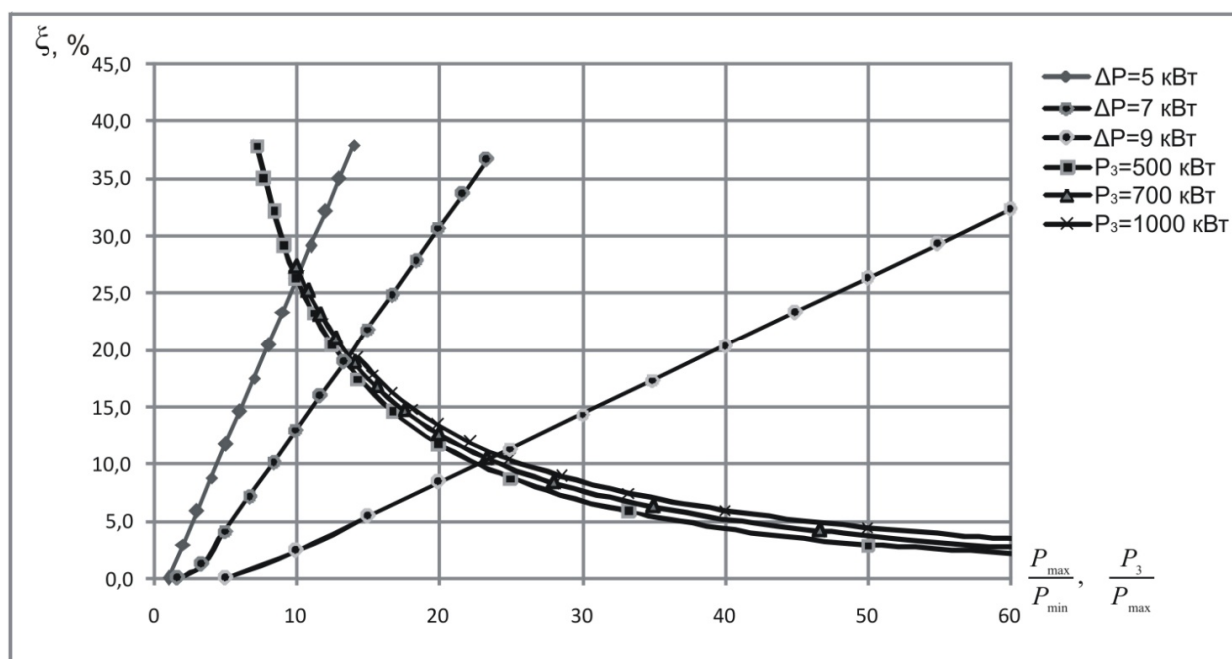


Рисунок 1.3 – Залежність нерівномірності розподілу навантаження від відношення потужностей

Залежності нерівномірностей були отримані при двофазних і однофазних режимах роботи однієї електропечі опору. Такий режим може класифікуватися, як підключення двох однофазних навантажень однакової потужності на фазу напругу мережі.

Необхідно відзначити, що при розрахунку залежності після перекладу печі на неповнофазний режим роботи навантаження розподіляється рівномірно по фазах, залишилися в роботі. Природно, при використанні однофазного режиму печі, потужність реалізується в останній робочій фазі.

При даній постановці задачі коефіцієнт нерівномірності є функцією декількох змінних. Коефіцієнт потужності ЕПС не є постійним. Його значення безперервно змінюється залежно від режиму перетворювача. Оскільки коефіцієнт потужності безпосередньо впливає на розрахунок навантажень, то проаналізуємо зміну  $\xi$  при різних коефіцієнтах потужності трифазних приймачів (рис. 1.4-1.7).



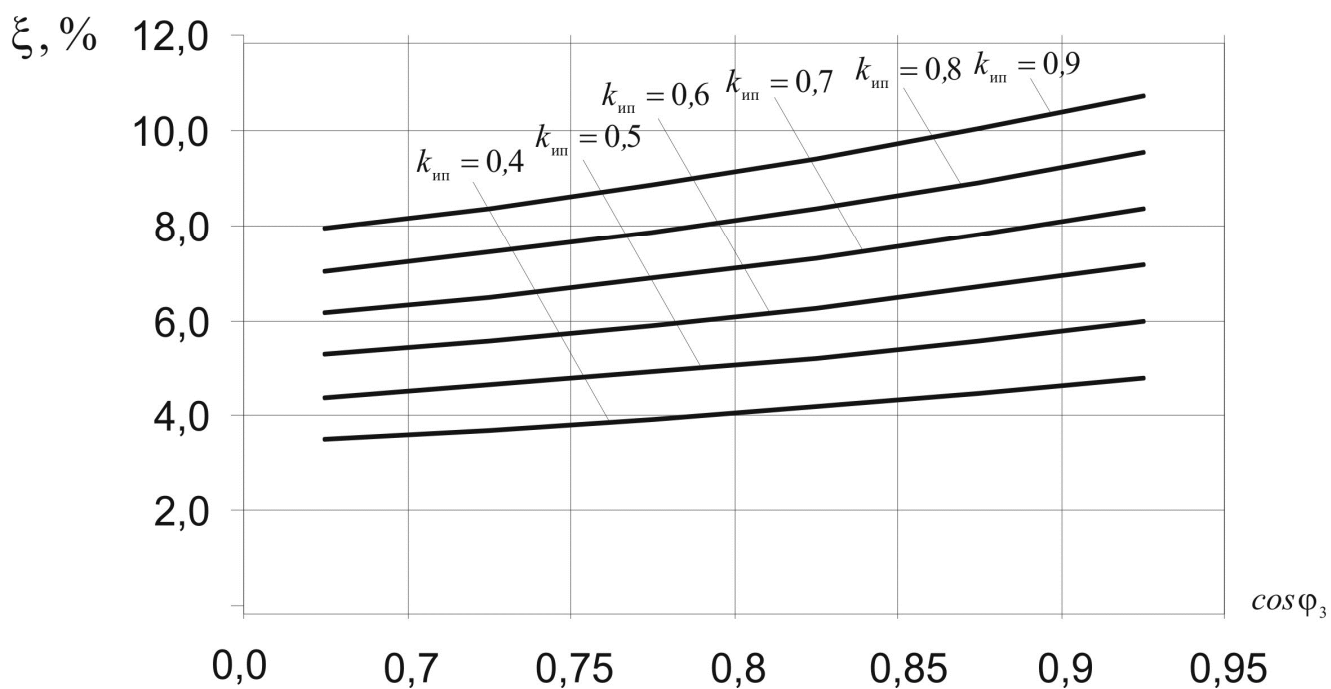


Рисунок 1.4 – Залежність нерівномірності навантаження від коефіцієнту потужності трифазних приймачів при  $S_{ном\ m} = 630$  кВА,  $P_{печи} = 30$  кВт

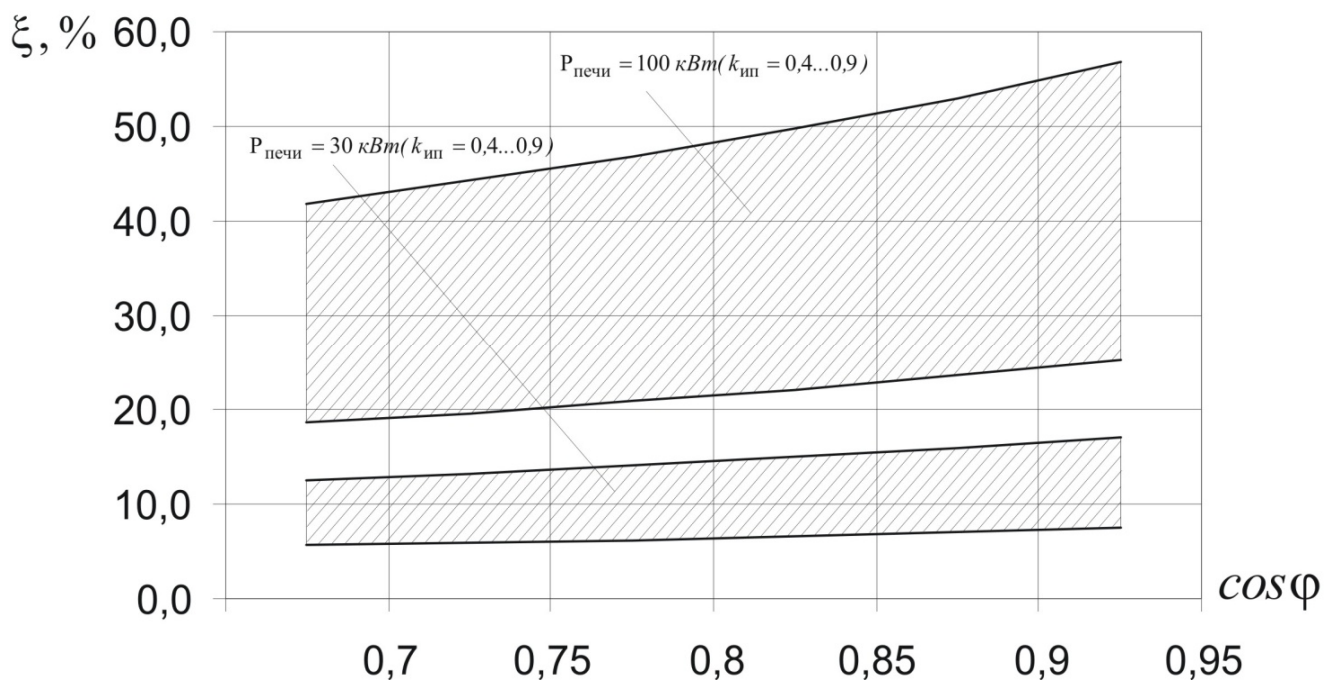


Рисунок 1.5 – Области зміни нерівномірності навантаження від коефіцієнту потужності трифазних приймачів при  $S_{ном\ m} = 630$  кВА,  $P_{печи} = 30 - 100$  кВт

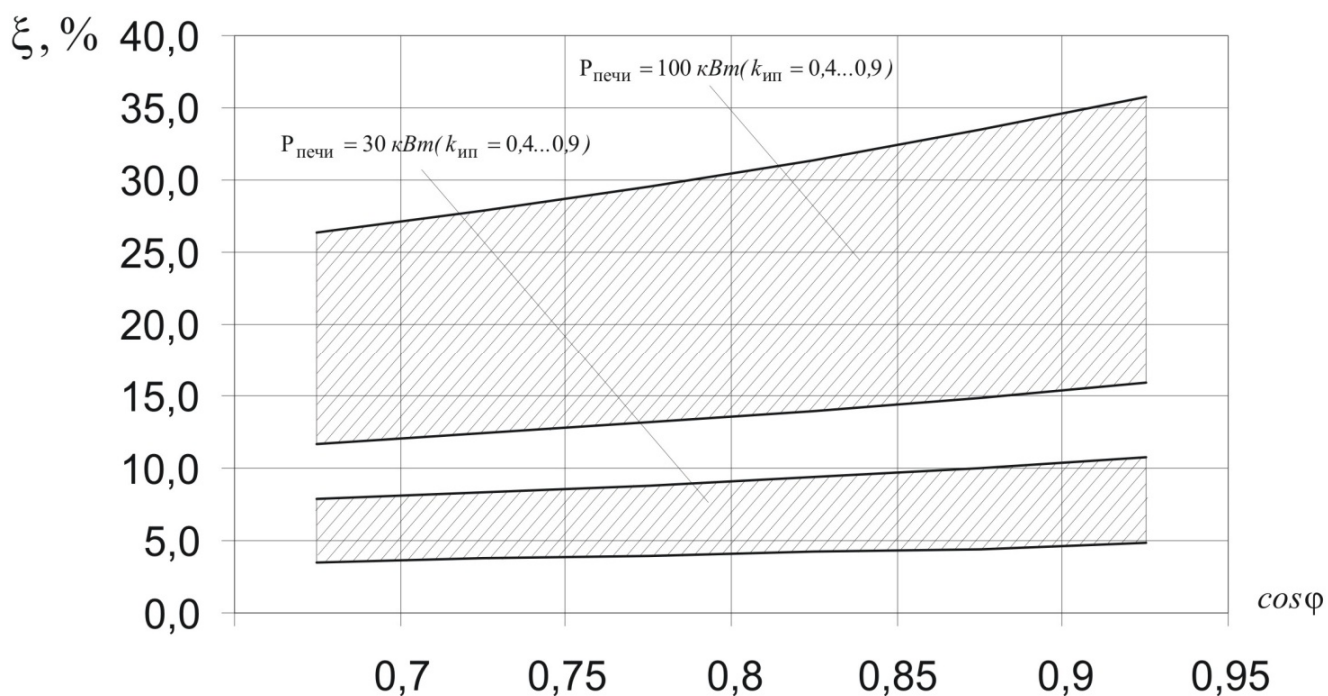


Рисунок 1.6 – Области зміни нерівномірності навантаження від коефіцієнту потужності трифазних приймачів при  $S_{\text{ном } m} = 1000 \text{ кВА}$ ,  $P_{\text{печи}} = 30 - 100 \text{ кВт}$

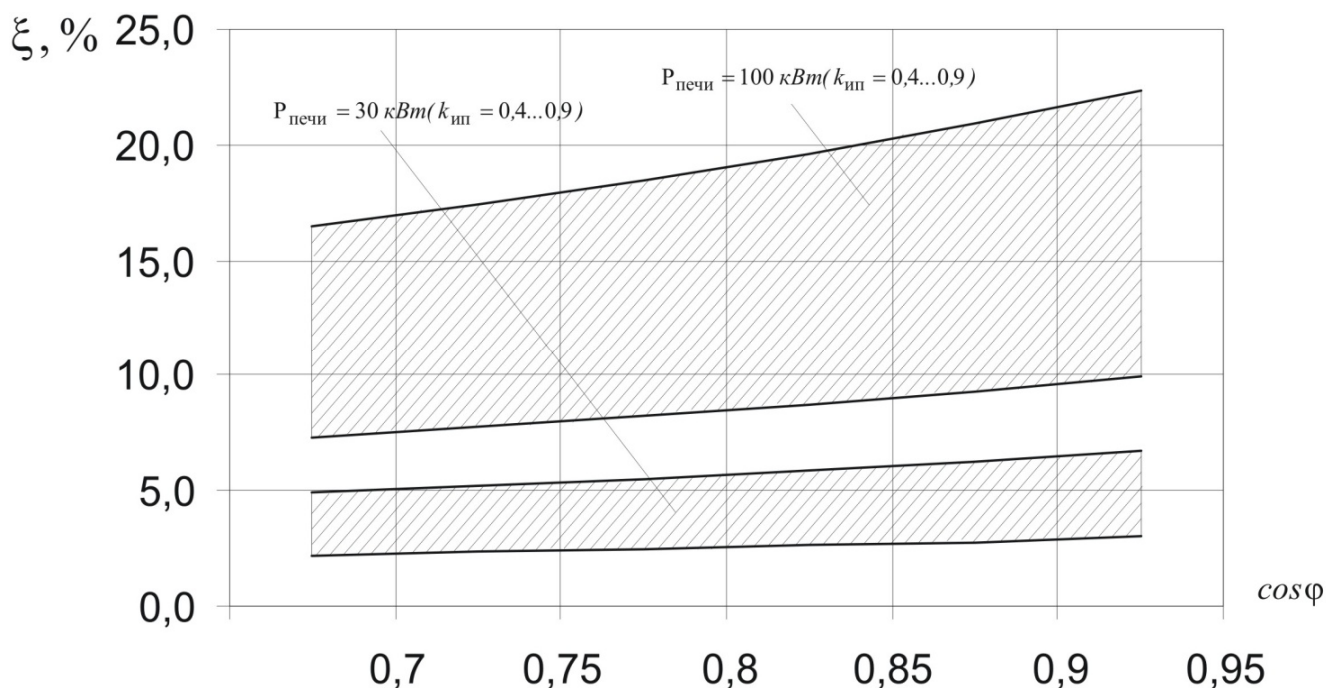


Рисунок 1.7 – Области зміни нерівномірності навантаження від коефіцієнту потужності трифазних приймачів при  $S_{\text{ном } m} = 1600 \text{ кВА}$ ,  $P_{\text{печи}} = 30 - 100 \text{ кВт}$

Необхідно відзначити, що у результаті моделювання залежності нерівномірності однофазного навантаження на рівні трифазного навантаження, отримані області можливої зміни нерівномірності з урахуванням ряду обґрунтованих допущень. Ця залежність дозволяє оцінити реальну нерівномірність при врахуванні потужності трансформаторів КТП і потужності пічних установок. Крім того, при моделюванні враховуються показники графіків навантаження і коефіцієнти потужності трифазних симетричних електроприймачів. Отримане сімейство залежностей дозволяє оцінити нерівномірність навантаження при перекладі печей на неповнофазний режим роботи. Таким чином, існує зворотна можливість оцінити, яка ж нерівномірність буде усунена за умови, що відключена фаза мала найбільше навантаження.

## **1.2 Симетрування цехового навантаження при неповнофазних режимах печей опору**

### **1.2.1 Математична модель для визначення показників несиметрії напруг**

Постановка задачі дослідження показала необхідність створення адекватної математичної моделі для розрахунку параметрів несиметрії напруги. Особливості моделі для умов, характерних для даного об'єкту дослідження такі, що передбачається використовувати неповнофазні режими електропечей опору для симетрування режиму напруг в цеховій розподільній мережі 0,4 кВ. Відмінні особливості математичної моделі для виконання теоретичних досліджень повинні відображати поведінку трифазної чотирьохдротяної мережі змінного струму при примусовому перекладі електропечі в неповнофазний режим. В даний час для даних умов найзручнішим вважається метод симетричних складових [6]. Згідно з цим методом початкова несиметрична схема представляється у вигляді трьох незалежних схем: прямої, зворотної і нульової послідовності. При такій постановці задачі розрахунок трифазної несиметричної системи зводиться до формування математичного опису режимів у вигляді системи рівнянь, отриманих за допомогою законів Ома і Кірхгофа по незалежних схемах заміщення і параметрах, які характеризують несиметричні елементи. Рішення даної системи рівнянь щодо невідомих струмів і напруг дає можливість

отримати шукані значення струмів і напруг прямої, зворотної і нульової послідовностей.

Переклад режиму живлення електропечі з симетричного на неповнофазний режим може класифікуватися як поперечна несиметрія, для дослідження якої може бути використаний метод симетричних складових.

Дамо деякі пояснення із цього приводу. Несиметрія напруг в цеховій мережі виникає при несиметричних струмах у фазах, які викликають несиметричні падіння напруг. В результаті цього змінюється режим напруги. Рівень несиметрії в конкретній точці мережі залежить від рівня несиметрії струмів і параметрів джерела енергії. З цього робимо висновок, що оскільки в даній роботі не ставилася задача зміни параметрів джерела живлення, то знижувати рівень несиметрії напруги можливо шляхом впливу на режим струмів в трифазній системі (вирівнювання значень струмів у фазах).

Сформулюємо задачу моделювання. Вище було сказано, що на параметри несиметрії роблять вплив значення несиметричних струмів і потужність (опір) джерела живлення. Тому для оцінки регульовального впливу режиму електропечі на режим цехової мережі з позиції зниження несиметрії необхідно записати системи рівнянь, які б ураховували ці зв'язки. Як джерело живлення в цеховій мережі виступають трансформатори комплектних підстанцій напругою 6/0,4 кВ. В більшості випадків для умов цехів машинобудівних підприємств потужності трансформаторів КТП вибираються з наступного номінального ряду (400, 630, 1000, 1600, 2500 кВА). Побудову математичної моделі проведемо так, щоб розраховувалися показники несиметрії безпосередньо на стороні низької напруги трансформатора. На практиці це виявляється третій ступінь розподілу напруги - магістральний шинопровод. Для оцінки поведінки трифазної системи при використуванні неповнофазних режимів живлення електропечі припустимо, що від магістрального шинопровода одержує живлення власне піч опору і решта трифазного симетричного навантаження. Такий загальний підхід дає можливість оцінити якість можливого симетруючого ефекту від електропечей.

При дослідженні несиметричних режимів електромережі приймаємо допущення:

- система первинних напруг на стороні вищої напруги трансформаторів цехових підстанцій (КТП) симетрична і не залежить від навантаження досліджуваної мережі;

- під терміном «несиметрія» в даній моделі розуміється поперечна несиметрія - підключення до мережі різних по потужності однофазних навантажень або відключення однієї з фаз трифазного навантаження;

- параметри схеми заміщення приймаються зосередженими;

- як параметри джерела живлення в моделі працюють параметри схем заміщення трансформаторів наведеного ряду потужностей;

- потужність симетричного трифазного навантаження приймаємо рівною 0,7 потужності цехового трансформатора.

Для оцінки рівнів несиметрії в електричній мережі використовуємо принцип компенсації [6], що дозволяє замінювати джерела несиметрії джерелами напруг. Після такої заміни електричний ланцюг стає симетричним і симетричні складові не залежать один від одного.

Для отримання системи рівнянь, що описує несиметричні режими, розглянемо загальний випадок схеми електропостачання ділянки цеху, від якої одержують живлення трифазні симетричні електроприймачі (СМ) і несиметричне навантаження, яке формується однією електропіччю опору (НІС) (рис. 1.8). Використовуючи принцип компенсації, несиметричне навантаження представляється трьома джерелами несиметричних напруг, які представляються симетричними складовими прямої  $\dot{U}_1$ , зворотної  $\dot{U}_2$  і нульової  $\dot{U}_0$  послідовностей.

Використовуючи вище сказане, складаємо схеми заміщення прямої, зворотної і нульової послідовності досліджуваної електричної мережі (рис. 1.9).

В схемах заміщення прийняті наступні позначення:

$\dot{E}_1$  – складова прямої послідовності ЕДС джерела енергії;

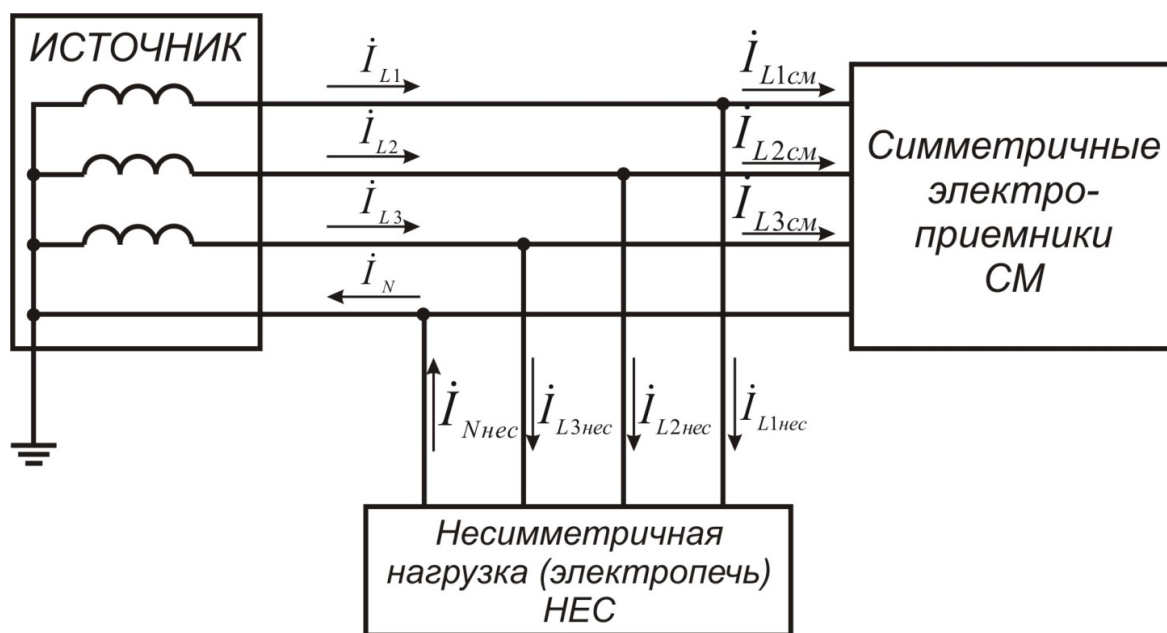


Рисунок 1.8 – Структура електричної мережі з несиметричним навантаженням

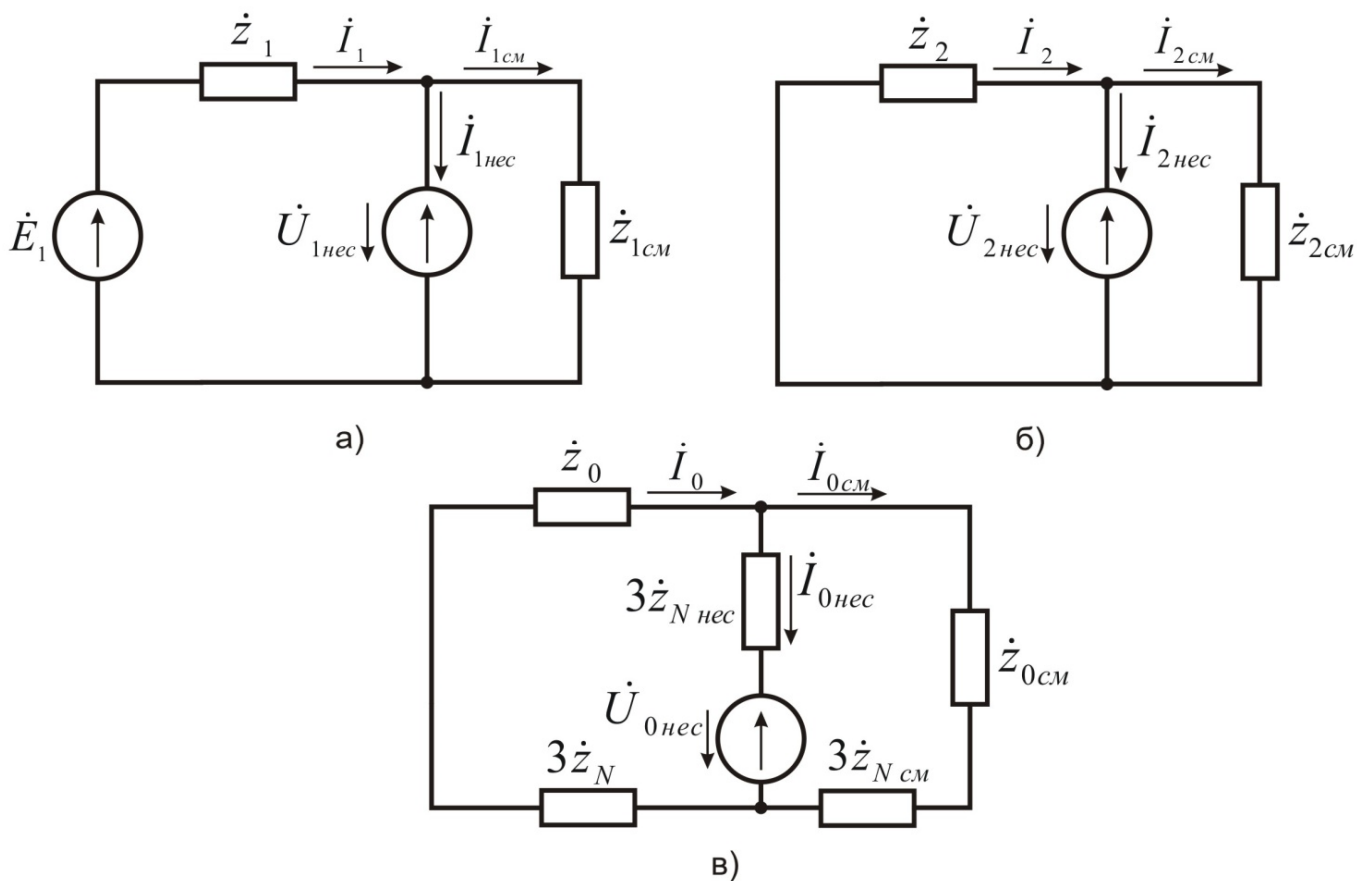


Рисунок 1.9 – Схеми заміщення прямої (а), зворотної (б) та нульової (в) послідовності

$Z_1, Z_2$  – опір джерела живлення і цехового трансформатора струмам прямої і зворотної послідовності;

$\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$  – струми прямої, зворотної і нульової послідовності на стороні НН цехового трансформатора;

$\dot{I}_{1CM}, \dot{I}_{2CM}, \dot{I}_{0CM}$  – струми прямої, зворотної і нульової послідовності в ланцюзі симетричного навантаження (СМ);

$\dot{I}_{1НЕС}, \dot{I}_{2НЕС}, \dot{I}_{0НЕС}$  – струми прямої, зворотної і нульової послідовності в ланцюзі несиметричного навантаження (НЕС);

$\dot{U}_{1НЕС}, \dot{U}_{2НЕС}, \dot{U}_{0НЕС}$  – складові прямої, зворотної і нульової послідовності напруги на несиметричному навантаженні;

$Z_{1CM}, Z_{2CM}, Z_{0CM}$  – опори прямої, зворотної і нульової послідовності симетричного навантаження;

$Z_{NCM}, Z_{NНЕС}$  – опір нейтралі симетричного і несиметричного навантаження;

$Z_N$  – опір нейтралі і нульової послідовності джерела електричної енергії і трансформатора.

З наведених схем заміщення несиметричної системи видно, що фазні напруги симетричного і несиметричного навантаження мають рівні складові прямої і зворотної послідовності. Для даного досліджуваного випадку конфігурації мережі є шлях для протікання струмів нульової послідовності (нульовий дріт мережі). Тому існує схема заміщення нульової послідовності.

Складаємо основні системи рівнянь для даної математичної моделі по схемі заміщення прямої послідовності рис. 1.9, а:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 Z_1 + \dot{U}_{1НЕС} = \dot{E}_1; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_{1CM} + \dot{I}_{1НЕС}; \\ \dot{U}_{1НЕС} = \dot{I}_{1CM} Z_{1CM}. \end{cases} \quad (1.7)$$

Рівняння для схеми заміщення зворотної послідовності рис. 1.9, б:

$$\begin{cases} \dot{I}_2 z_2 + \dot{U}_{2\text{нес}} = 0 \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\text{см}} + \dot{I}_{2\text{нес}} \\ \dot{U}_{2\text{нес}} = \dot{I}_{2\text{см}} z_{2\text{см}} \end{cases} \quad (1.8)$$

Рівняння для схеми заміщення нульової послідовності рис. 1.9, в:

$$\begin{cases} \dot{I}_0 (z_0 + 3z_N) + \dot{U}_{0\text{нес}} + 3\dot{I}_{0\text{нес}} z_{N\text{нес}} = 0 \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_{0\text{см}} + \dot{I}_{0\text{нес}} \\ \dot{U}_{0\text{нес}} + 3\dot{I}_{0\text{нес}} z_{N\text{нес}} = \dot{I}_{0\text{см}} (z_{0\text{см}} + 3z_{N\text{см}}) \end{cases} \quad (1.9)$$

Перші рівняння приведених систем є основними рівняннями узагальненої трифазної системи. В цих рівняннях шість невідомих  $\dot{I}_1, \dot{U}_{1\text{нес}}, \dot{I}_2, \dot{U}_{2\text{нес}}, \dot{I}_0, \dot{U}_{0\text{нес}}$ . Додаткові три рівняння, необхідні для розрахунку режиму несиметрії складаємо за конкретних умов схеми електропостачання несиметричного навантаження. При цьому враховуємо, що електропічна установка як правило, має схему з'єднання трифазних нагрівальних елементів “зірка з нульовим виведенням”.

Джерелом несиметрії в даній математичній моделі є трифазна електропіч опору при неповнофазних режимах живлення. Схема з'єднання нагрівачів печі показана на рис. 1.10.

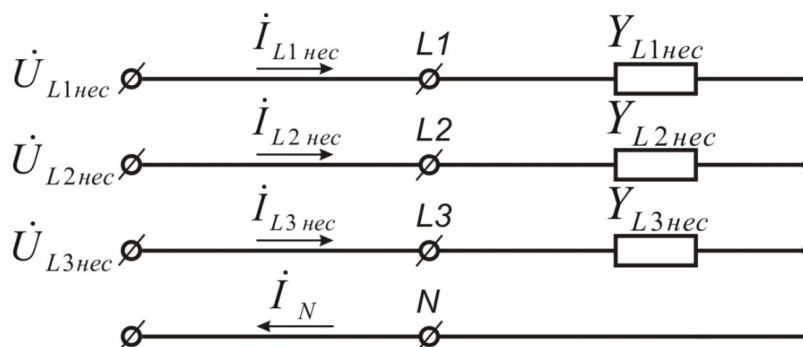


Рисунок 1.10 – Схема джерела несиметрії із з'єднанням провідностей в зірку з нулем

При з'єднанні нагрівачів в зірку фазні струми дорівнюють лінійним:

$$\dot{I}_{L1\text{нес}} = \dot{I}_{L1}, \quad \dot{I}_{L2\text{нес}} = \dot{I}_{L2}, \quad \dot{I}_{L3\text{нес}} = \dot{I}_{L3}. \quad (1.10)$$



Необхідні для розрахунків несиметрії фазні струми визначаються через параметри режиму роботи печі:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{L1\text{нес}} &= \dot{U}_{L1\text{нес}} \underline{Y}_{L1\text{нес}}, \\ \dot{I}_{L2\text{нес}} &= \dot{U}_{L2\text{нес}} \underline{Y}_{L2\text{нес}} \\ \dot{I}_{L3\text{нес}} &= \dot{U}_{L3\text{нес}} \underline{Y}_{L3\text{нес}}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Значення струмів і напруг несиметричних елементів:

$$\begin{cases} \dot{U}_{L1\text{нес}} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{L2\text{нес}} = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{L3\text{нес}} = a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0. \end{cases} \quad (1.12)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{1}{3} (\dot{I}_{L1\text{нес}} + a \dot{I}_{L2\text{нес}} + a^2 \dot{I}_{L3\text{нес}}) \\ \dot{I}_2 = \frac{1}{3} (\dot{I}_{L1\text{нес}} + a^2 \dot{I}_{L2\text{нес}} + a \dot{I}_{L3\text{нес}}) \\ \dot{I}_0 = \frac{1}{3} (\dot{I}_{L1\text{нес}} + \dot{I}_{L2\text{нес}} + \dot{I}_{L3\text{нес}}). \end{cases} \quad (1.13)$$

Підставляємо рівняння (1.11) і (1.12) в (1.13):

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{1}{3} \left[ (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + \underline{Y}_{L2\text{нес}} + \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_1 + (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a^2 \underline{Y}_{L2\text{нес}} + a \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_2 + \right. \\ \left. (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a \underline{Y}_{L2\text{нес}} + a^2 \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_0 \right] \\ \dot{I}_2 = \frac{1}{3} \left[ (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a \underline{Y}_{L2\text{нес}} + a^2 \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_1 + (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + \underline{Y}_{L2\text{нес}} + \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_2 + \right. \\ \left. (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a^2 \underline{Y}_{L2\text{нес}} + a \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_0 \right] \\ \dot{I}_0 = \frac{1}{3} \left[ (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a^2 \underline{Y}_{L2\text{нес}} + a \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_1 + (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a \underline{Y}_{L2\text{нес}} + a^2 \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_2 + \right. \\ \left. (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + \underline{Y}_{L2\text{нес}} + \underline{Y}_{L3\text{нес}}) \dot{U}_0 \right] \end{cases} \quad (1.14)$$

Приймаємо наступні позначення для приведення системи рівнянь (1.14) до вигляду, більш зручного для подальших розрахунків:

$$\begin{cases} \underline{Y}_{aY\text{нес}} = \underline{Y}_{L1\text{нес}} + \underline{Y}_{L2\text{нес}} + \underline{Y}_{L3\text{нес}} \\ \underline{Y}_{bY\text{нес}} = \underline{Y}_{L1\text{нес}} + a \underline{Y}_{L2\text{нес}} + a^2 \underline{Y}_{L3\text{нес}} \\ \underline{Y}_{cY\text{нес}} = \underline{Y}_{L1\text{нес}} + a^2 \underline{Y}_{L2\text{нес}} + a \underline{Y}_{L3\text{нес}}. \end{cases} \quad (1.15)$$

Система рівнянь (1.15) відображає параметри трифазного несиметричного електроприймача, що нехарактерно для досліджень в даній дисертаційній роботі. Тому представимо систему рівнянь при двофазному і однофазному режимах роботи ЕПС. Припустимо, що в двофазному режимі відключена фаза  $L1$ , а в однофазному фази  $L1$  і  $L2$ :

$$\begin{cases} \underline{Y}_{dY_{\text{нес}}(2\text{ф})} = \underline{Y}_{L2_{\text{нес}}\text{ЭПС}} + \underline{Y}_{L3_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \\ \underline{Y}_{eY_{\text{нес}}(2\text{ф})} = a\underline{Y}_{L2_{\text{нес}}\text{ЭПС}} + a^2\underline{Y}_{L3_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \\ \underline{Y}_{kY_{\text{нес}}(2\text{ф})} = a^2\underline{Y}_{L2_{\text{нес}}\text{ЭПС}} + a\underline{Y}_{L3_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \end{cases} \quad \begin{cases} \underline{Y}_{dY_{\text{нес}}(1\text{ф})} = \underline{Y}_{L3_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \\ \underline{Y}_{eY_{\text{нес}}(1\text{ф})} = a^2\underline{Y}_{L3_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \\ \underline{Y}_{kY_{\text{нес}}(1\text{ф})} = a\underline{Y}_{L3_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \end{cases} \quad (1.16)$$

Так само представляється можливість скласти матрицю фазних провідностей при будь-яких поєднаннях несиметричних режимів - при відключенні будь-яких фаз при перекладі ЕПС в неповнофазний режим.

Представимо систему (1.16) в матричній формі запису для узагальненого запису несиметричних режимів ЕПС:

$$\begin{Bmatrix} \underline{Y}_{dY_{\text{нес}}(i\text{ф})} \\ \underline{Y}_{eY_{\text{нес}}(i\text{ф})} \\ \underline{Y}_{kY_{\text{нес}}(i\text{ф})} \end{Bmatrix} = \|\underline{s}\| \cdot \begin{Bmatrix} \underline{Y}_{L3_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \\ \underline{Y}_{L2_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \\ \underline{Y}_{L1_{\text{нес}}\text{ЭПС}} \end{Bmatrix} \quad (1.17)$$

де  $\|\underline{s}\|$  – матриця системи симетричних координат.

Після перетворень отримаємо систему (1.14) в матричній формі запису:

$$\begin{Bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{Bmatrix} \underline{Y}_{dY_{\text{нес}}(i\text{ф})} & \underline{Y}_{kY_{\text{нес}}(i\text{ф})} & \underline{Y}_{eY_{\text{нес}}(i\text{ф})} \\ \underline{Y}_{eY_{\text{нес}}(i\text{ф})} & \underline{Y}_{dY_{\text{нес}}(i\text{ф})} & \underline{Y}_{kY_{\text{нес}}(i\text{ф})} \\ \underline{Y}_{kY_{\text{нес}}(i\text{ф})} & \underline{Y}_{eY_{\text{нес}}(i\text{ф})} & \underline{Y}_{dY_{\text{нес}}(i\text{ф})} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{Bmatrix} \quad (1.18)$$

Практична значущість системи (1.18) для даного етапу моделювання полягає в можливості визначення взаємозв'язків між струмами симетричних складових і параметрами режиму несиметричного навантаження (двофазний або однофазний режим ЕПС). Дана система доповнює основні системи рівнянь, отримані по схемах заміщення несиметричної мережі.

Для виведення недостатніх для розрахунків рівнянь побудуємо векторну діаграму струмів і напруг для даних умов підключення трифазної ЕПС при двофазному і однофазному режимі на трифазну чотирьохдротяну мережу (рис. 1.11).

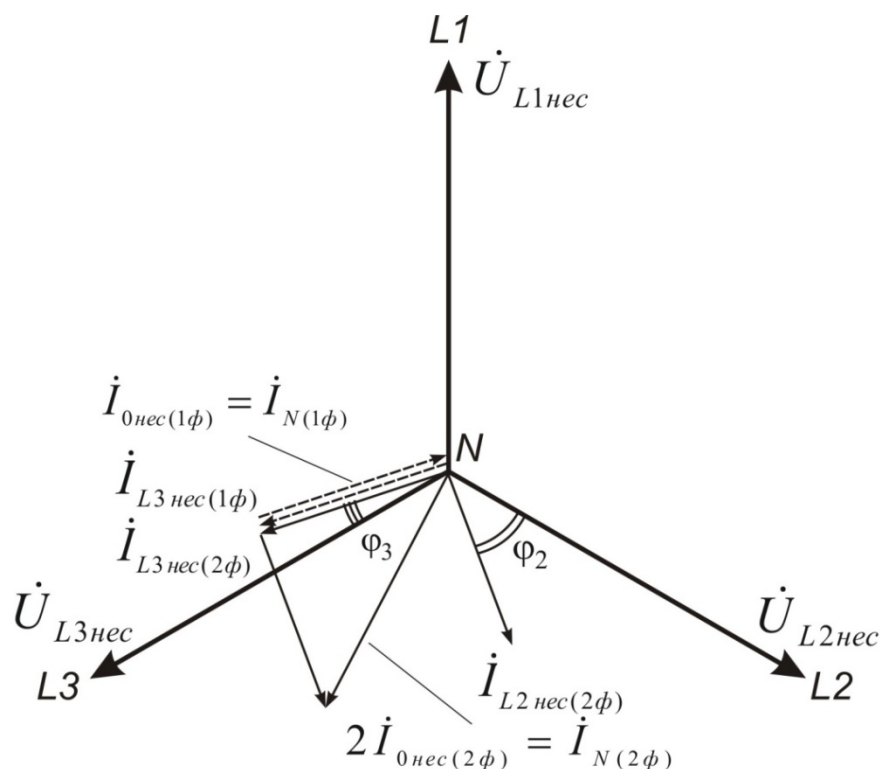


Рисунок 1.11 – Векторна діаграма струмів і напруг для схеми рис. 1.10

В наведеній діаграмі суцільними лініями надані вектори струмів двофазного режиму (відключена фаза  $L1$ ), а пунктирними вектори струму однофазного режиму ЕПС (відключена фази  $L1$  і  $L2$ ).

Використовуючи отриману векторну діаграму, можна отримати рівняння для розрахунку втрат напруги у фазі  $L1$ , необхідне для оцінки меж зміни коефіцієнтів несиметрії при зміні режимів роботи печі. Для отримання даного рівняння використовуємо відомий підхід заміни геометричної суми струмів алгебраїчною сумою їх проєкцій на вектор напруги  $\dot{U}_{L1нес}$ . Для даного випадку одержуємо:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{L1} = & \dot{I}_{L1нес} (k_{\phi} R_{наг}) \cos \varphi_1 + \dot{I}_{L1нес} (k_{\phi} X_{наг}) \sin \varphi_1 + \\ & + [\dot{I}_{L1нес} \cos \varphi_1 + \dot{I}_{L2нес} \cos(\varphi_2 + 120^\circ) + \dot{I}_{L3нес} \cos(\varphi_3 + 240^\circ)] \frac{(R_0 - (k_{\phi} R_{наг}))}{3} \end{aligned}$$

$$+ [I_{L1\text{нес}} \sin \varphi_1 + I_{L2\text{нес}} \sin(\varphi_2 + 120^\circ) + I_{L3\text{нес}} \sin(\varphi_3 + 240^\circ)] \frac{(X_0 - (k_\phi X_{\text{наг}}))}{3}$$

де  $k_\phi$  – коефіцієнт, що враховує фазність живлення нагрівачів ЕПС;

$R_{\text{наг}}, X_{\text{наг}}$  – активний і реактивний опір нагрівачів в одній фазі ЕПС відповідно.

Падіння напруги в будь-якій з фаз визначається системою рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{L1\text{нес}} = I_{L1\text{нес}} z_{\text{нес}} + I_{0\text{нес}} (z_{0\text{нес}} + z_{\text{нес}}) \\ \Delta \dot{U}_{L2\text{нес}} = I_{L2\text{нес}} z_{\text{нес}} + I_{0\text{нес}} (z_{0\text{нес}} + z_{\text{нес}}) \\ \Delta \dot{U}_{L3\text{нес}} = I_{L3\text{нес}} z_{\text{нес}} + I_{0\text{нес}} (z_{0\text{нес}} + z_{\text{нес}}). \end{cases} \quad (1.19)$$

Таким чином, підводячи підсумки, представимо алгоритм математичної моделі для визначення параметрів несиметрії в мережі 0,4 кВ за наявності нерівномірного пічного навантаження:

1. Сформована система рівнянь сталого режиму для схем заміщення прямої, зворотної і нульової послідовності мережі за вказаних умов.

Дані системи рівнянь називаються основними і в загальному вигляді записуються таким чином:

$$[\dot{Y}][\dot{I}_s]=0;$$

$$[\dot{Z}][\dot{U}_s]=0,$$

де  $[\dot{Y}]$  – матриця з'єднань вузлових провідностей гілок, що враховує неповнофазні режими ЕПС;

$[\dot{Z}]$  – матриця з'єднань контурних опорів;

$[\dot{I}_s]$  – матриця-стовпець струмів гілок схеми;

$[\dot{U}_s]$  – матриця-стовпець напруг на затисках гілок.

2. Для несиметричного елемента (електропечі) записані додаткові рівняння, які мають вигляд:

$$[\dot{I}]_s = [\dot{C}][\dot{U}]_s, \quad (1.20)$$

де  $[i]_s$ ,  $[U]_s$  – матриці-стовпці симетричних складових відповідно струмів і напруг для несиметричного елемента;

$[C]$  – матриця коефіцієнтів, розмірністю (3x3), кожний елемент якої представляє функцію параметрів несиметричного елемента.

В матричній формі одержуємо:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{10} \\ C_{21} & C_{22} & C_{20} \\ C_{01} & C_{02} & C_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

3. Визначені функціональні умови у вигляді виразів, що задають значення параметрів режиму, а також залежність між різними параметрами неповнофазного режиму, отримані при аналізі векторної діаграми. Ці умови записані у вигляді:

$$V(p_1, p_2, \dots, p_n) = V_0$$

де  $p_1, p_2, \dots, p_n$  – параметри режиму;

$V_0$  – задане значення функції.

4. Визначені схемні обмеження несиметричних елементів, які дозволяють задати певні значення параметрів несиметричного навантаження. Під схемними обмеженнями розуміється можливі конфігурації підключення несиметричних елементів до мережі (двофазний режим електропечі і однофазний режим).

5. Оскільки запропоновані режими електроспоживання печей опору можуть мати ефект корегування по відношенню до несиметричних режимів напруги, то як функціональні надані наступні умови:

- симетрування напруги на шинах цехової підстанції.

Умова має вигляд:  $|\dot{U}_2^H| = U_{2\text{зад}}$ ,

де  $|\dot{U}_2^H|$  – модуль напруги зворотної послідовності на шинах;

$U_{2\text{зад}}$  – задане значення напруги зворотної послідовності.

Ефект симетрування і регульовальні можливості електропечей з позиції впливу на несиметрію напруг.

- компенсація реактивної потужності з урахуванням симетрування напруги на шинах навантаження до значення  $|\dot{U}_2^*| = 0$ , тобто при повному усуненні несиметричних режимів.

Умова має вигляд:  $\sqrt{3}U_{\text{лном}} \text{Im}(I_{1\Sigma}^*) = Q_{\text{зад}}$ ,

де  $I_{1\Sigma}^*$  – зв'язаний комплекс сумарного струму прямої послідовності вузла навантаження (магістрального шинопровода типу ШМА);

$Q_{\text{зад}}$  – задане значення реактивної потужності вузла навантаження;

$U_{\text{лном}}$  – номінальна лінійна напруга мережі.

- регулювання напруги на шинах навантаження.

Умова має вигляд:

$$\delta U_{\text{доп}}^{(min)} \leq \frac{|\dot{U}_{L1L2}| - U_{\text{лном}}}{U_{\text{лном}}} 100\% \leq \delta U_{\text{доп}}^{(max)},$$

$$\delta U_{\text{доп}}^{(min)} \leq \frac{|\dot{U}_{L3L1}| - U_{\text{лном}}}{U_{\text{лном}}} 100\% \leq \delta U_{\text{доп}}^{(max)},$$

$$\delta U_{\text{доп}}^{(min)} \leq \frac{|\dot{U}_{L2L3}| - U_{\text{лном}}}{U_{\text{лном}}} 100\% \leq \delta U_{\text{доп}}^{(max)},$$

де  $|\dot{U}_{L1L2}|$ ,  $|\dot{U}_{L3L1}|$ ,  $|\dot{U}_{L2L3}|$  – модулі лінійних напруг на шинах навантаження;

$\delta U_{\text{доп}}^{(min)}$ ,  $\delta U_{\text{доп}}^{(max)}$  – максимальне і мінімальне допустиме відхилення напруги.

Згідно ГОСТ 13109-97, допустимі відхилення напруги в мережах 380 В в нормальному режимі роботи мережі  $\delta U_{\text{доп}} = \pm 10\%$ .

Сформована математична модель для визначення параметрів несиметрії напруг в розподільних мережах 0,4 кВ промислових підприємств. Відмінними особливостями даної моделі є врахування спеціальних неповнофазних режимів живлення електропічних установок в умовах зміни несиметрії у разі наявності інших джерел несиметрії. Ефект корегування по несиметрії при експлуатації печей в спеціальних режимах залежить від параметрів мережі (потужність КЗ і потужність живлячого

трансформатора), а також від потужності і віддаленості печі від шин низької напруги трансформатора. Розроблена модель дозволяє врахувати вказані параметри з метою вибору раціональних режимів роботи печі.

### **1.2.2 Вплив режимів роботи печі опору на показники несиметрії напруги**

Математична модель розрахунку параметрів несиметрії є системами рівнянь, записаними по схемах заміщення мережі. Сумісне рішення цих систем щодо струмів і напруг прямої, зворотної і нульової послідовності дозволяють визначити показники несиметрії при будь-якому поєднанні мережних параметрів і параметрів симетричного і несиметричного навантаження.

Для якісної оцінки симетруючого ефекту неповнофазних режимів живлення електропечей необхідно оцінити межі зміни показників несиметрії при різних комбінаціях мережних параметрів і характеристик навантажень. Тому запропоновану математичну модель представляється можливим використовувати для параметричного синтезу оптимальних співвідношень загальноцехового і електропічного навантаження для усунення несиметрії.

Для узагальнення отриманих результатів припустимо, що навантаження на шини низької напруги цехового трансформатора носить симетричний характер, а джерелом несиметрії є електропічна установка. Такий підхід дозволяє оцінити частку несиметрії, яка доводиться на неповнофазні режими печі.

Таким чином, використання спеціальних режимів роботи ЕПС, визначених як енергозберігаючі, може сформувати наступні режими електричних мереж:

- поява несиметрії напруг зворотної і нульової послідовностей. Такий режим може мати місце у разі переключення електропечі в несиметричний режим при абсолютно симетричному розподілі решті цехового навантаження по фазах. Доцільність застосування такого режиму повинна оцінюватися при порівнянні загальних витрат в електромережі і порівнянні втрат від виникнення несиметрії напруг і зменшенні не-синусоїдальності;

- зменшення коефіцієнтів зворотної і нульової послідовності напруги. Даний режим реалізується при правильному визначенні найбільш завантаженої фази мере-

жі і розподіл пічного навантаження на фази, має менше завантаження (при двофазному режимі живлення ЕПС) або перемикання всього пічного навантаження на фазу з найменшим навантаженням (при однофазному режимі живлення ЕПС);

Отже, якщо режими несиметрії напруг можуть бути поліпшені за допомогою спеціальних режимів печі, то трифазна ЕПС може розглядатися як симетруючий пристрій, що до теперішнього часу в електропостачанні промислових підприємств не практикувалося.

Для оцінки симетруючих властивостей ЕПС необхідно сформулювати регульовальну залежність. Тобто залежності коефіцієнтів  $K_{U2}$  і  $K_{U0}$  від поєднання параметрів печі і розміщення її в системі електропостачання підприємства. Ефект симетрування оцінимо при допущенні, що несиметрія моделюється тільки ЕПС, а решта навантаження має симетричний характер.

Залежності коефіцієнтів несиметрії напруги від комбінації мережних параметрів і параметрів навантаження запропонуємо називати регульовальними. Особливу увагу при аналізі даної залежності необхідно приділити потужності мережі (потужність короткого замикання), а також співвідношенням потужності печі до потужності трансформатора, потужності печі до потужності симетричного навантаження. Дане рішення проблеми несиметрії є новим, оскільки коректування несиметричних режимів здійснюється за допомогою активних опорів навантаження.

Схемні обмеження на підключення елементів корегування (нагрівачів електропечей) наведені у вигляді двофазної і однофазної схеми живлення ЕПС (рис. 1.12).

Приведені схеми пристроїв корегування до теперішнього часу не були проаналізовані. В задачах симетрування, які розв'язувалися до теперішнього часу [7-9] використовувалися КУ поперечної структури при будь-якій комбінації реактивних елементів. Відмінність запропонованих схем в тому, що опір ланок носить залежно від технологічного режиму нагріву або активний, або активно-реактивний характер.

Потужності цехових трансформаторів прийняті стандартні, найбільш часто вживані в комплектних трансформаторних підстанціях: 400, 630, 1000, 1600 кВА. Тип трансформаторів – ТМ.



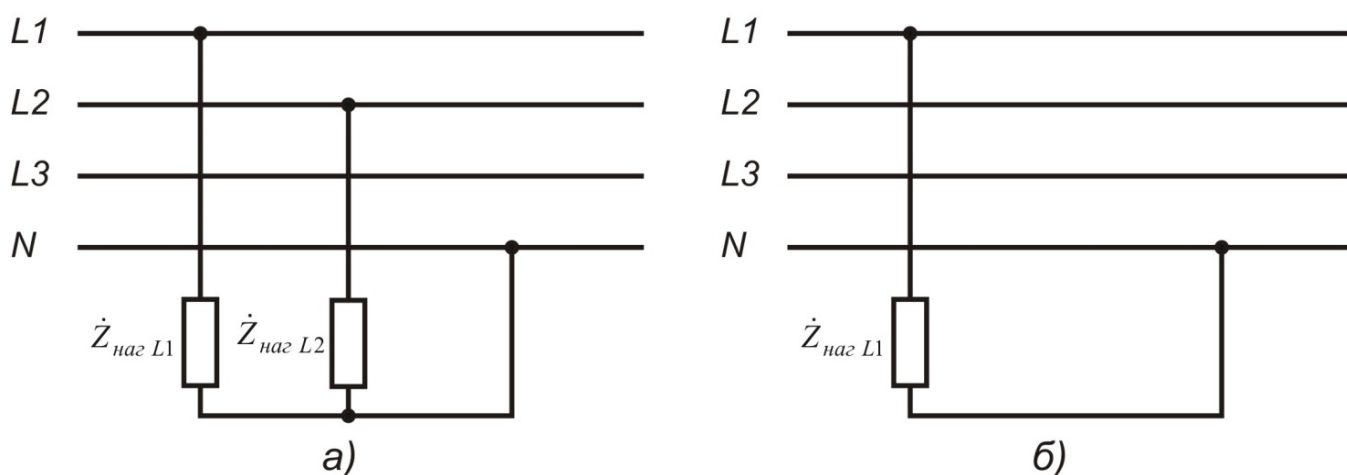


Рисунок 1.12 – Схеми пристроїв корегування поперечної структури:

а) двофазний режим електропечі, б) однофазний режим печі

За допомогою математичної моделі отриманий ряд залежності коефіцієнтів несиметрії зворотної і нульової послідовності від потужності пічної установки  $K_{U2} = f(S_{ЭПС}^*)$ ,  $K_{U0} = f(S_{ЭПС}^*)$ , приведений до симетричної трифазного навантаження цехового трансформатора (рис. 1.13-1.14).

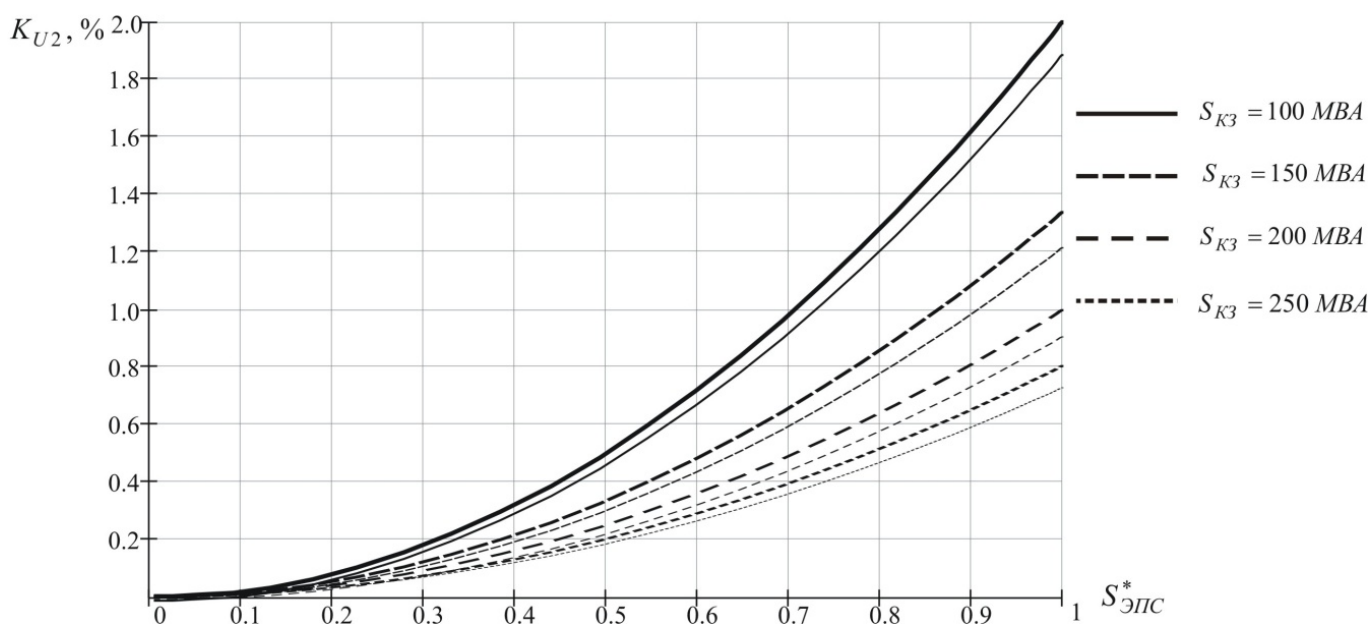


Рисунок 1.13 – Залежність коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності від несиметричного пічного навантаження при  $S_{нт} = 400$  кВА

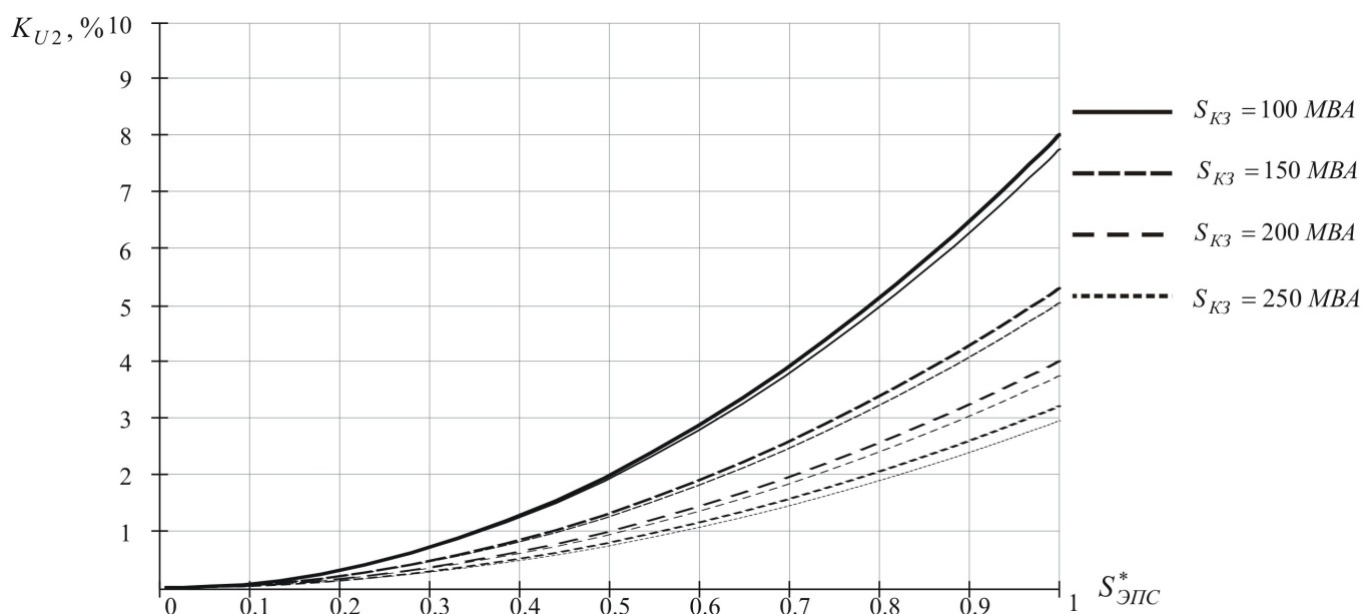


Рисунок 1.14 – Залежність коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності від несиметричного пічного навантаження при  $S_{HT} = 1600 \text{ кВА}$

При аналізі регулюючого ефекту враховувалася потужність короткого замикання на стороні 6 кВ шляхом моделювання мережних параметрів в елементах математичної моделі (опір мережі).

Слід зазначити, що значення коефіцієнтів несиметрії, відображені функціональною залежністю мають граничні (максимальні) значення при будь-яких відносинах потужностей. Мається на увазі, що в розрахунках урахувалися максимально можливі значення потужностей в неповнофазних режимах. В реальних режимах ця умова не виконується, і потужність нагрівачів може знижуватися, а, отже, знижуватимуться і коефіцієнти несиметрії. Проте отримана залежність має практичну цінність в можливості оцінки граничних коефіцієнтів несиметрії, а, значить, і граничних регулювальних характеристик.

Залежність коефіцієнтів нульової послідовності аналогічна представленій залежності. Ураховуючи роботи [6], слід: для усунення несиметрії нульової послідовності є набагато ефективніші способи (наприклад, зниження опору нульової послідовності цехових трансформаторів шляхом зміни схеми з'єднання обмоток). Цей захід знижує опір на порядок при правильно підібраній схемі з'єднання. Тому знижен-

ня коефіцієнта несиметрії нульової послідовності найбільш ефективно проводити схемними рішеннями, а не перерозподілом навантаження по фазах.

З отриманої залежності очевидно, що регулюючий ефект від застосування неповнофазних режимів живлення електропечей залежатиме від мережних параметрів (потужність  $K3$ ), а також від співвідношення пічного несиметричного навантаження до трифазного симетричного. Необхідно відзначити, що при моделюванні охопленний весь можливий діапазон зміни вказаних параметрів. Максимальні значення коефіцієнтів несиметрії спостерігаються при співвідношенні параметрів  $\frac{S_{\text{ЕПС}}}{S_{\text{Г}}^{(3)}} = 1$  (табл. 1.5), що має місце при рівній потужності пічного навантаження і трифазній симетричній. Також видно, що великі коефіцієнти несиметрії спостерігаються при двофазному режимі роботи ЕПС, однофазні режими формують дещо менші значення коефіцієнтів (нижні характеристики).

За наявності в системах цехового електропостачання трансформаторів з номінальними потужностями з вказаного ряду граничні значення коефіцієнтів несиметрії швидше за все не матимуть місця через неприпустимо велике значення потужності електропечей. Тому з практичної точки зору найбільший інтерес представляє ділянка характеристики  $\frac{S_{\text{ЕПС}}}{S_{\text{Г}}^{(3)}} = (0 \dots 0,5)$ .

Таблиця 1.5 – Максимальні значення коефіцієнтів несиметрії напруги зворотної послідовності в режимах №2

$S_{K3}$ , МВА	КУ2 %			
	2	3,15	5	8
100	2	3,15	5	8
150	1,33	2,1	3,33	5,33
200	1	1,58	2,5	4
250	0,8	1,26	2	3,2

В даному розділі отримані регульовальні характеристики, які матимуть місце при використанні ефекту корегування неповнофазних режимів електропечей опору.

Встановлені найбільш характерні діапазони зміни коефіцієнтів несиметрії при різних поєднаннях параметрів навантаження і живлячої мережі. Показано, що при даній постановці задачі досягаються граничні (максимальні) значення коефіцієнтів, які в реальних режимах роботи печей неможливі.

### **1.3 Характеристики системи індукційної передачі енергії**

#### **1.3.1 Характеристики системи індукційної передачі енергії рухомому складу за зміни протяжності виробки**

Транспорт з індукційною передачею енергії характеризується відсутністю безпосереднього електричного контакту (гальванічного зв'язку) між джерелом живлення і приймачем електричної енергії (рухомим складом), що забезпечує іскробезпеку передачі енергії.

Система електропостачання безконтактних електровозів (рухомого складу) характеризується наявністю джерела стабільного струму підвищеної частоти (тягового перетворювача частоти) і тягової мережі, яка є неоднорідною лінією з розподіленими параметрами [10]. На параметри навантаженої мережі роблять вплив поздовжня компенсація і опори, що вносяться електровозами, які є зосередженими неоднорідностями, включеними послідовно в тягову мережу.

При дослідженні електромагнітних перехідних процесів в навантаженій тяговій мережі на моделі, що представлена системою кінцево-різницевих рівнянь, необхідно виходити з того, що швидкість руху електровоза не зіставно менша за швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль, тому протягом перехідного процесу точку прикладення навантаження (координату електровоза) припустимо вважати за стаціонарну.

Математична модель навантаженої тягової мережі представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь у часткових похідних [11], після еквівалентних перетворень якої здобуто диференціальне рівняння у часткових похідних другого порядку

$$\partial^2 u / \partial x^2 = L_0 \cdot C_0 \cdot \partial^2 u / \partial t^2 - R_0 \cdot C_0 \cdot \partial u / \partial t + F'(x, t),$$

де  $u$  – миттєве значення напруги,

$x$  – координата перетину лінії,

$t$  – час,

$F(x,t)$  – функція, яка відображає для кожного перетину тягової мережі особливості у вигляді включених неоднорідностей,

$L_0, C_0, R_0$  – первинні розподілені параметри лінії.

Модель реалізована на ПЕОМ за допомогою алгоритму, в основу якого покладений метод прогонки, який найчастіше вживається при чисельному вирішенні диференціальних рівнянь у часткових похідних, що відносяться до гіперболічного типу. Побудований на підставі математичної моделі навантаженої тягової мережі алгоритм розрахунку параметрів її режиму дозволив досліджувати їх зміну при переміщеннях електровозів в підземній виробці, виходячи з допущення, що опори, які вносять навантаження, вважаються включеними в точці. Останнє обумовлено тим, що термін розповсюдження енергії на ділянці, де саме у цей час знаходиться електровоз, складає наносекунди, а похибка розрахунку при цьому виявляється вельми неістотною.

Моделювання режимів навантаженої тягової мережі показало, що при русі електровоза в перетинах, відповідних його місцезнаходженню, відбувається стрибкоподібна зміна напруги, а значення напруги в інших перетинах мережі змінюється залежно від того, знаходиться цей перетин до точки включення опору, що вноситься, або за нею відповідно на відміну від сталого режиму [11]. Такий характер зміни напруги пояснюється тим, що опір ділянок ненавантаженої мережі може бути індуктивним або ємнісним залежно від ступеня компенсації і координати перетину; результуючий опір в перетинах навантаженої мережі змінюватиметься в ту або іншу сторону, викликаючи тим самим підвищення або зниження напруги в даному перетині.

Оскільки протяжність відкатника виробок може бути різною, в залежності від неї змінюється й довжина тягової мережі. Зростання або зменшення довжини мережі викликає відповідну зміну кількості компенсуючих пристроїв. Таким чином змінюється ступінь компенсації індуктивного опору лінії. У зв'язку з цим на моделі було

досліджено, як може впливати на характеристики, зокрема тягової мережі, зміна протяжності виробки.

Розглянемо випадок руху електровоза на початку маршруту за протяжності виробки 950 м. У перетині, відповідному точці включення навантаження, відбувається стрибкоподібна зміна напруги. У перетинах мережі, розташованих до місця включення опору, що вноситься, значення напруги вищі, ніж в тих же перетинах ненавантаженої мережі. Аналогічна тенденція спостерігається і тоді, коли електровоз знаходиться у середині або кінці маршруту. Напруга у всіх перетинах змінюється в порівнянні з ненавантаженою мережею [12]. На рис. 1.15 показана картина зміни миттєвих значень напруги в перетинах тягової мережі при зміні місцезнаходження електровоза.

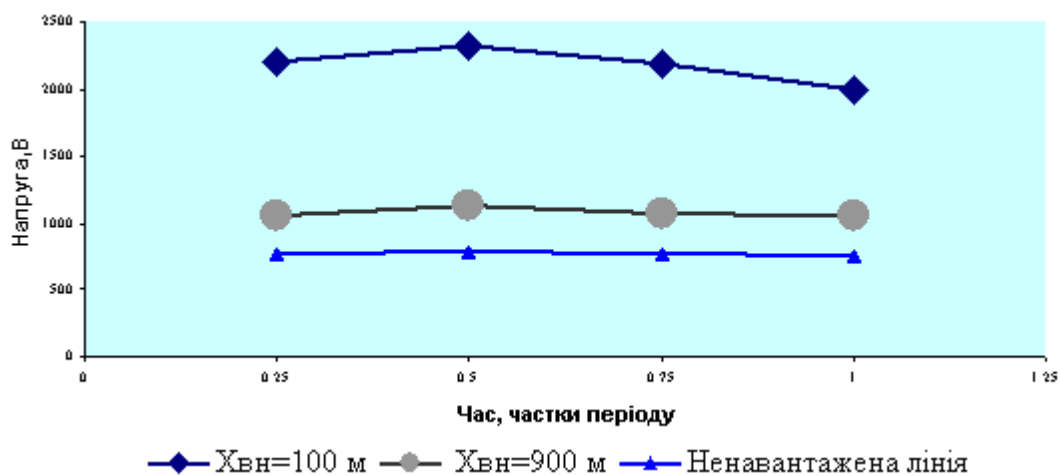


Рисунок 1.15 – Залежність напруг в перетинах тягової мережі протяжністю 950 м від координати опору, що вноситься

Слід зазначити, що напруга на елементах тягової мережі не повинна перевищувати значення 1650 В (амплітудне значення – 2120 В), оскільки може привести до виходу з ладу компенсуючих конденсаторів і спрацьовування захисту тягового перетворювача частоти [10].

Для тягових мереж протяжністю 2000 м і 4118 м відповідно також спостерігається значне підвищення напруги в перетині, відповідному початку маршруту. В точках включення навантаження, що знаходяться у середині і кінці маршруту, значення

ня напруги практично співпадають з параметрами ненавантаженої мережі (рис. 1.16; 1.17).

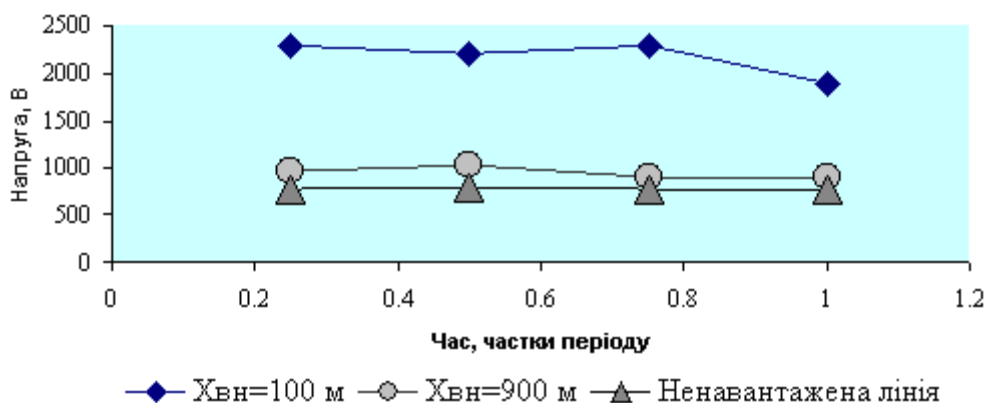


Рисунок 1.16 – Залежність напруг в перетинах тягової мережі протяжністю 2000 м від координати опору, що вноситься

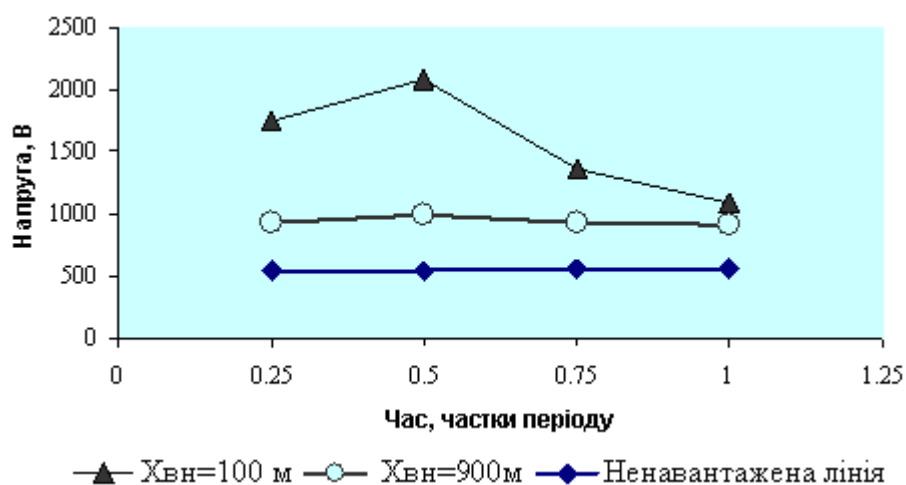


Рисунок 1.17 – Залежність напруг в перетинах тягової мережі протяжністю 4118 м від координати опору, що вноситься

Аналіз результатів розрахунку параметрів навантаженої тягової мережі показав, що за будь-яких довжин тягових мереж зміна напруги в перетинах мережі при русі електровозів залежить від координати точки включення навантаження [13]. Підвищення напруги характерне для знаходження електровоза на початку маршруту, а значення, близькі до параметрів ненавантаженої мережі спостерігаються, починаючи з середини маршруту і до його кінця. Слід зазначити, що приведені залежності

для мереж різної протяжності одержані при однакових значеннях опору, що вносяться, і є точковими оцінками параметрів режиму тягової мережі. Отримані результати дозволяють зробити висновок про необхідність регулювання навантаження тягової мережі щоб уникнути перенапружень на окремих ділянках, які призводять до порушення режимів роботи транспорту в цілому.

### **1.3.2 Аналіз параметрів тягової мережі транспорту з індукційною передачею енергії при зміні її навантаження**

Розроблені в [10, 11] математичні моделі навантаженої тягової мережі і алгоритми розрахунку її параметрів дозволяють аналізувати і прогнозувати зміну характеристик тягової мережі залежно від навантаження, яким є опори, що вносяться електровозами. Вище відмічено, що в перетинах, відповідних місцезнаходженню електровоза, відбувається стрибкоподібна зміна напруги, а значення напруги в інших перетинах мережі змінюються залежно від того, знаходиться цей перетин до точки включення навантаження або за нею відповідно незалежно від протяжності мережі. Навантаження тягової мережі нестационарне і змінюється відповідно до переміщень безконтактних електровозів і змін їх режимів роботи. Як було підкреслено вище, час розповсюдження енергії на ділянці знаходження електровоза досить малий, а похибкою розрахунку при цьому можна нехтувати через її несуттєве значення, тому опори, що вносяться електровозами, вважаються включеними в точці. Значення опору, що вноситься, залежить від параметрів регулювання приймального контуру електровоза. Сучасна тиристорна система управління приводом електровоза дозволяє одержувати активний характер опорів, що вносяться до тягової мережі. Дослідження на математичній моделі впливу значень опорів, що вносяться, на параметри режиму навантаженої тягової мережі показують, що значення напруги в перетинах мережі, відповідних місцезнаходженню електровоза, зростають при збільшенні опору навантаження. Як об'єкт досліджень розглядалися тягові лінії протяжністю 950 і 4118 метрів. У [11] показано, що характерними є координати електровоза, що знаходиться на початку, середині і кінці маршруту. На рис. 1.18 показані графіки зміни напруги залежно від значення опору, що вноситься, при знаходженні електровоза на початку



маршруту, а на рис. 1.19 – в кінці маршруту. Наведені залежності свідчать, що для лінії більшої протяжності значення напруги нижче, ніж для короткої незалежно від місцезнаходження електровоза на маршруті. Останнє пов'язане з хвильовими властивостями тягових мереж, а саме, наявністю зворотних, відбитих і заломлених хвиль, час розповсюдження яких залежить від довжини лінії. Ця тенденція спостерігається при знаходженні електровоза як на початку, так і в кінці маршруту. Аналіз значень напруги при розташуванні навантаження у середині маршруту (рис. 1.20) показує, що і в цьому випадку для коротшої лінії значення напруги вище, проте не перевищують допустимих значень, що обмежуються перевантажувальною здатністю компенсуючих конденсаторів і уставкою захисту тягового перетворювача частоти.

Проте слід зазначити, що для короткої лінії у разі знаходження електровоза на її початку при значеннях опору, що вноситься, вище 3 Ом напруга перевищує допустимі умовами експлуатації значення, а у варіантах «середина», «кінець» маршруту залишається в робочих межах. Для тягової мережі завдовжки 4118 м.

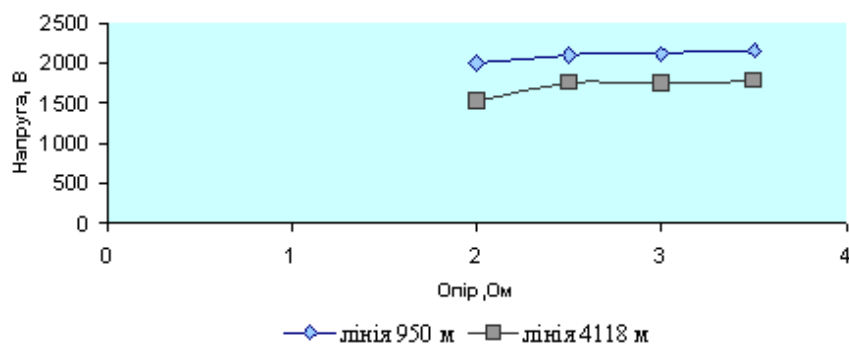


Рисунок 1.18 – Залежність напруг в перетинах тягової мережі від опору, що вноситься, за знаходження електровозу на початку маршруту

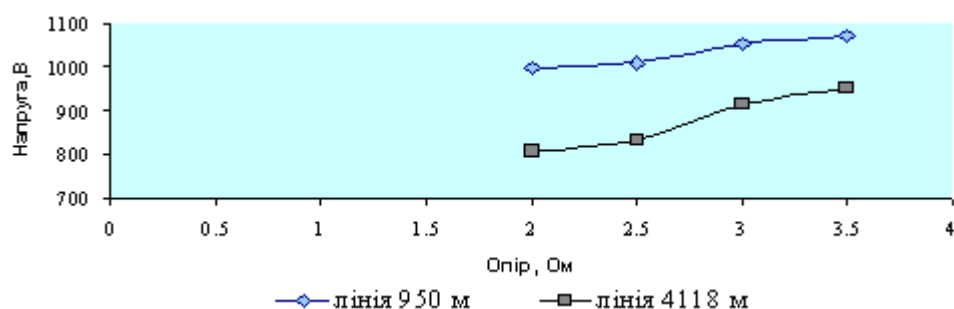


Рисунок 1.19 – Залежність напруг в перетинах тягової мережі від опору, що вноситься, за знаходження електровозу у кінці маршруту

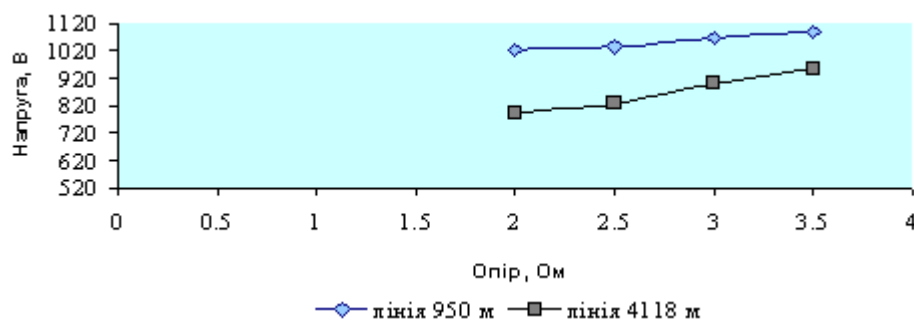


Рисунок 1.20 – Залежність напруг в перетинах тягової мережі від опору, що вноситься, за знаходження електровозу у середині маршруту

Таким чином, для забезпечення нормального режиму експлуатації транспорту з індуктивною передачею енергії при невеликих довжинах тягових мереж слід передбачати регулювання тягового приводу електровоза, що дозволяє обмежувати опір, що вноситься, значенням 3 Ом. Для ліній великої протяжності таке обмеження не потрібне.

#### 1.4 Обґрунтування параметрів енергозощаджуючих режимів

Безконтактний електричний транспорт реалізує принцип передачі електричної енергії рухомому складу шляхом електромагнітної індукції [10]. Досвід експлуатації на шахтах Донбасу підтвердив доцільність використання такої системи транспорту в гірничих умовах, а також сприяв накопиченню статистичного матеріалу як по роботі складових системи так і по режимах роботи в цілому. Система транспорту, представлена на рис. 1.21, включає джерело живлення, тягову лінію, електровози.

Режим роботи системи транспорту з індукційною передачею енергії, характеризуються такими параметрами тягової мережі, як струм  $I$ , частота  $f$ , напруга на виході джерела живлення  $U_{вих.джер.}$ , а також напруга на виході енергоприймача  $U_{вих.е.}$ . Всі параметри, в тому або іншому ступені, впливають один на одного. Раніше були розглянуті питання впливу ланцюга енергоприймача на відхилення параметрів режиму [10]. В результаті порівняння відносин параметрів (струму або потужності) за відсутності і наявності розладів була дана оцінка чутливості контуру енергоприймача при зміні параметрів режиму роботи (струм, частота) і зміні його індуктивності. На

основі отриманих даних, з метою збереження стабільності тягових і енергетичних характеристик безконтактних електровозів, виходячи із загальновідомих вимог експлуатації тягового приводу, були висунуті вимоги стабілізації робочої частоти і допустимих відхилень струму в тяговій мережі. Перетворювач частоти повинен забезпечувати стабілізацію робочої частоти з точністю  $\pm 0.1\%$  і відхилення струму в тяговій мережі повинні бути  $\pm 2\%$ . Ці вимоги і стали в основу розробки джерела живлення для системи транспорту.

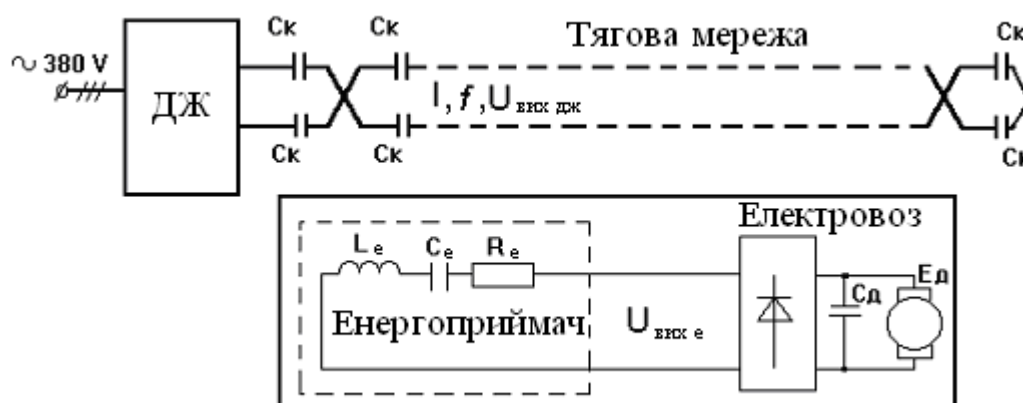


Рисунок 1.21 – Система шахтного транспорту з індукційною передачею енергії

Параметри режимів тягової мережі роблять істотний вплив на такі техніко-економічні показники тягового перетворювача, як  $ККД$ ,  $\cos\varphi$ , встановлена потужність тиристорного блоку  $P_m$ . Ці показники істотно залежать також від схемотехнічних рішень джерела живлення. Досвід експлуатації показує, що існуючі режими далеко не оптимальні, оскільки  $ККД$ ,  $\cos\varphi$ ,  $P_m$  можуть бути значно поліпшені.

Увага раніше проведених досліджень була спрямована на поліпшення такого енергетичного показника системи транспорту, як коефіцієнт потужності (інвертування з відсікаючим діодом і ін.).

Іншим важливим енергетичним показником є  $ККД$ . Одним з шляхів є зниження рівня втрат енергії як в джерелі живлення (тяговий перетворювач), так і в навантаженні (тягова мережа і електровоз). Інший шлях полягає в підвищенні напруги живлення. У зв'язку з цим виникає задача вибору різної структури і параметрів джерела живлення для роботи на підвищеній напрузі.

Перспективним представляється шлях зниження втрат за рахунок регулювання параметрів режиму роботи системи (частота, струм, вихідна напруга). Проте питання регулювання повинні розв'язуватися в тісному взаємозв'язку із забезпеченням якості електроенергії на затисках тягових двигунів. У зв'язку з цим виникає задача обґрунтування допустимих меж регулювання цих параметрів для встановлення енергозощаджуючих режимів. Така задача не знайшла достатньо глибокого опрацювання, оскільки раніше не розглядалася можливість регулювання цих параметрів в широких межах, а передбачалося, що струм і частота стабільні. Питання виникло тільки про можливе відхилення цих параметрів в невеликих межах.

Обидва напрями досліджень пов'язано з оптимізацією параметрів режиму джерела живлення системи і його навантаження. Тому задачу обґрунтування і вибору різних режимів роботи слід вважати актуальною і своєчасною з погляду економії електроенергії при транспортуванні вугілля.

Враховуючи всю складність взаємозв'язку параметрів режимів роботи системи транспорту, необхідно мати такий показник, який характеризував би ефективність тих або інших режимів роботи транспорту. Оскільки тягові характеристики електроприводу електровоза є основними, з погляду переміщення вантажу, то таким показником могла б бути якість електроенергії на виході енергоприймача. Обґрунтування поняття "якість електроенергії для комплексу шахтного транспорту з індукційною передачею енергії" має принципове значення для поліпшення і оптимізації параметрів режимів роботи всієї системи.

Як джерело живлення в системі безконтактного транспорту знайшли застосування дволанкові перетворювачі частоти, що складаються з регульованого випрямляча і інвертування. Для підтримки стабільних тягових і швидкісних характеристик електровозів незалежно від їх кількості і режимів роботи необхідно забезпечувати в номінальному режимі незмінними струм і частоту в тяговій лінії. Ці значення складають відповідно 150 А і 5 кГц. Потужність, що віддається в лінію, регулюється за рахунок зміни напруги на виході перетворювача в межах 100 - 1650 В залежно від опору що вноситься.

Проте в процесі експлуатації безконтактного транспорту існують такі режими, коли стабілізація вказаних параметрів не зовсім виправдана. Це відноситься до режимів відсутності навантаження або коли значення навантаження перевищує встановлені межі. Розглянемо окремо кожний з цих режимів і визначимо принципи, на основі яких повинна будуватися система управління перетворювачем.

#### 1.4.1 Аналіз зміни навантаження при регулюванні частоти тягової лінії

При експлуатації безконтактного транспорту можлива ситуація (розлад лінії або включення великого числа електровозів), коли значення повного опору (напруги) лінії перевищує максимально допустиме. Це неминуче приводить до відключення перетворювача. Система управління перетворювачем повинна регулювати вихідну частоту в режимі перевищення навантаження, щоб стабілізувати його вихідну потужність на максимальному рівні. Значення напруги в лінії з датчика напруги поступає на блок порівняння з максимальним рівнем напруги, з якої сигнал поступає на регульований генератор імпульсів інвертування.

Навантаження перетворювача може бути представлено у вигляді послідовного R-L-C контуру мережі і послідовно з ним включеного при збільшенні частоти додаткового опору, складається з послідовно включених  $R$  та  $L$  що вноситься електровозом. При зростанні частоти залишковий реактивний опір має індуктивний характер і дорівнює

$$X_{\Delta}(f) = 2X_e \frac{f - f_n}{f_n} = 2X_e p$$

де  $p = \frac{f - f_n}{f_n}$  – відносна зміна частоти;

$X_e$  – індуктивний опір енергоприймача.

Якщо врахувати, що добротність енергоприймача  $Q_e = X_e / R_{e2}$ , де  $R_{e2}$  – опір, вноситься електровозом за годину ( $R_{e2} = 3,48$  Ом), а відносні значення опорів контуру енергоприймача:  $X_e = 2 Q_e p$ ,  $R^* = R_{e2} / R_{вн}$ , то опір, що вноситься електровозом в мережу, визначається:

$$R_{вн} = \frac{R_{е2}(1+p)}{R^{*2} + X_e^{*2}}; \quad X_{вн} = -\frac{R_{е2}(1+p)}{R^{*2} + X_e^{*2}}$$

Повний опір навантаження інвертування

$$Z = \sqrt{(R_l + R_{вн})^2 + (X_l + X_{вн})^2}$$

Кут навантаження інвертування

$$\varphi_H = \arctg \frac{X_l + X_{вн}}{R_l + R_{вн}}$$

Враховуючи, що  $R1, X1, R2, X2, R3, X3$  - відносні опори ланцюга енергоприймача відповідно першого, другого і третього електровоза, повний опір навантаження перетворювача з урахуванням зміни частоти дорівнює

$$Z = \sqrt{\left[ R_l + R_{е2}(1+p)^2 \left\{ \frac{R1^*}{R1^* + X1^*} + \frac{R2^*}{R2^* + X2^*} + \frac{R3^*}{R3^* + X3^*} \right\} \right]^2 + \left[ 2\pi(1+p)f_H L_l - \frac{1}{2\pi(p+1)f_H C_l} - R_{е2}(1+p)X_e^* \left\{ \frac{1}{R1^{*2} + X1^{*2}} + \frac{1}{R2^{*2} + X2^{*2}} + \frac{1}{R3^{*2} + X3^{*2}} \right\} \right]^2}$$

Визначимо, яке повинне бути максимальне відхилення вихідної частоти перетворювача від номінального значення 5 кГц, щоб при збільшенні електровозами опору вище встановленої межі що вноситься для даної довжини лінії, повний опір лінії  $Z$  не перевищував 11 Ом. Розрахунок виконаний за допомогою ПЕВМ для різних значень добротності енергоприймача:  $Q = 25; 30; 35; 40; 45$ , залишкової ємності опору мережі  $X = 0; 0,5; 1,0; 1, 5; 2,0; 2,5$  Ом і довжини мережі – 2 ... 5 км.

Вихідна частота перетворювача при максимальному відхиленні від номінального значення складає 5077 Гц. Це забезпечується при довжині мережі – 5 км,

$Q = 25$ ,  $X = 2,5$  Ом. Отже система управління перетворювачем повинна забезпечувати регулювання вихідної частоти в межах 100 Гц (до 2 % від номінального значення).

### 1.4.2 Оцінка способів регулювання струму в тяговій мережі

Опір що вноситься електровозом носить активний характер. Тому повний опір тягової лінії з урахуванням опору що вноситься електровозом можна записати у вигляді:

$$Z = \sqrt{(R_l + R_{вн})^2 + X_l^2}$$

де  $R_l$ ,  $X_l$  – активний і реактивний опір лінії;

$R_{вн}$  – що вноситься електровозом опір в лінію.

Оскільки параметри лінії  $R_l$  і  $X_l$  відомі при її налаштуванні, то зміна повного опору залежить тільки від зміни значення опору що вноситься. Як правило, лінію прагнуть налаштувати в резонанс для забезпечення максимального значення  $R_{вн}$ . При цьому в режимі відсутності навантаження, коли повний опір лінії визначається тільки активним опором мережі (мережа скомпенсована), дуже ускладнено пуск перетворювача і режим стабілізації струму на номінальному рівні. Тому доводиться форсувати лінію з метою збільшення повного опору в початковий момент, що зменшує максимально можливе значення  $R_{вн}$ . Як наслідок, зменшується здатність навантаження працюючих електровозів. При номінальному струмі в лінії 150 А втрати на кілометр складають близько 30 кВт.

Істотно зменшити втрати і полегшити режим пуску перетворювача можна зниженням струму в лінії, тобто забезпечити режим "дрімаючого" струму. Проте це зниження повинне носити тимчасовий характер (на період відсутності навантаження), не роблячи впливу на тягові і швидкісні характеристики електровозів у момент їх включення. Мінімальне значення струму в лінії в режимі "дрімаючого" струму визначається можливістю забезпечення працездатності системи управління електровозом. Сам факт внесення додаткового опору в лінію повинен забезпечувати вихід і стабілізацію струму в лінії на номінальному рівні. Можливі дві умови реалізації пе-

реходу з режиму "дрімаючого" струму в номінальний: а) стрибком; б) залежно від значення опору що вноситься. Відповідно здійснюється і зворотний перехід.

Найбільш проста в практичній реалізації перша умова. Проте вона має істотний недолік – нестійкість в перехідному режимі. Для виключення цього встановлюють тимчасову затримку, що негативно впливає на маневреність електровоза. Друга умова реалізації позбавлена цього недоліку.

Повний опір в лінії, що залежить від вносимого опору, як було показано вище, можна обчислити знаючи значення струму  $I$  і напруги  $U$  на виході перетворювача:

$$Z = \frac{U_l}{I_l}.$$

На рис. 1.22 наведена принципова схема пристрою, що реалізує закон регулювання:

$$m_i I_l - m_u U_l = U_{const},$$

де  $m_i$  і  $m_u$  – масштабні коефіцієнти струму і напруги, відповідно;

$U$  – рівень напруги в системі управління перетворювачем, що забезпечує стабілізацію струму.

Сигнали, пропорційні струму і напрузі в лінії поступають в систему управління перетворювачем. Резисторами  $R1$  і  $R2$  встановлюються коефіцієнти  $m_i$  і  $m_u$  такі, які вимагаються. Досягши струму в лінії номінального рівня відбувається обмеження напруги на рівні  $U$  (резистор  $R11$  і діод  $V9$ ). Подальше його зростання, пов'язане із збільшенням опору що вноситься, не робить впливу на струм в лінії.

Визначимо співвідношення масштабних коефіцієнтів, рівнів обмеження і стабілізації. Для стабілізації параметрів в режимах "дрімає" і номінального струму справедлива наступна система рівнянь:

$$m_i I_\partial - m_u U_\partial = U_{const} ;$$

$$m_i I_n - m_u U_n = U_{const},$$



де  $I_\delta, U_\delta$  – значення "дрімаючого" струму і напруги в лінії;

$I_n$  – значення номінального струму в лінії;

$U_n$  – значення напруги в лінії при номінальному струмі в режимі холостого ходу.

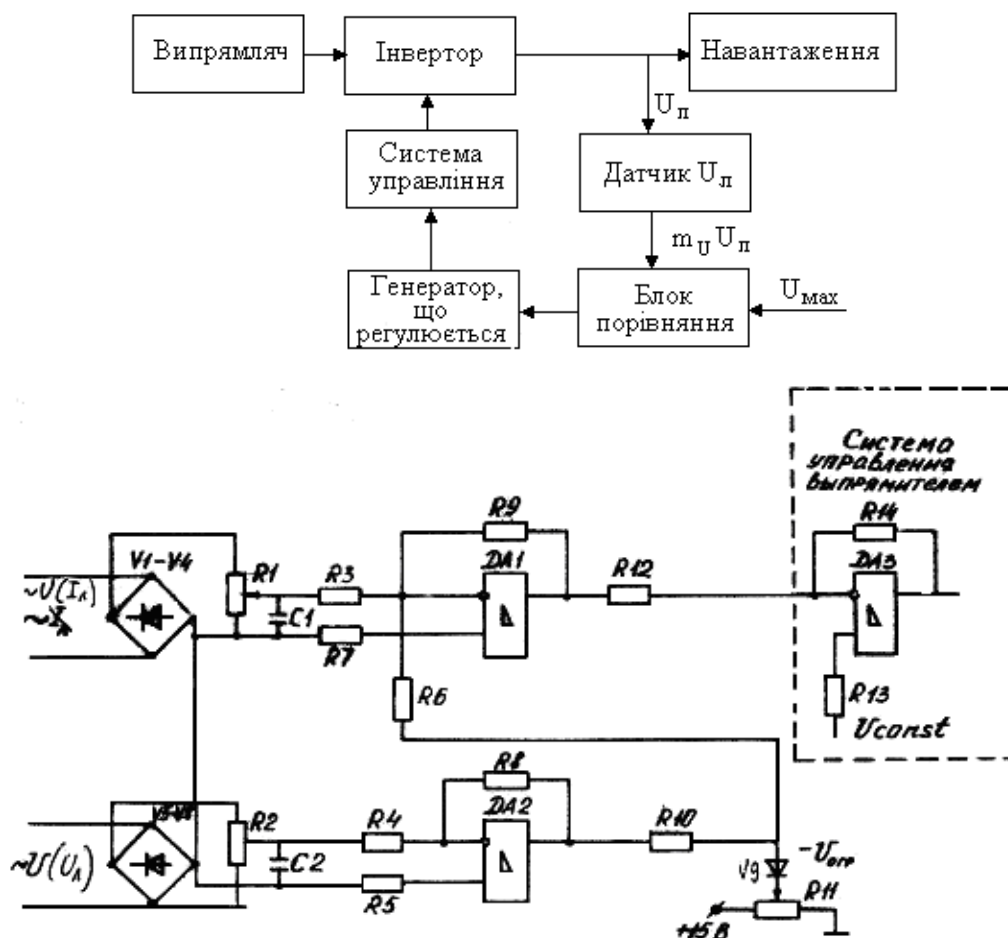


Рисунок 1.22 – Принципова схема пристрою, що реалізує закон регулювання

З системи рівнянь (4) задаючись значенням масштабного коефіцієнта  $M$ , отримаємо:

$$m_u = m_i \left( \frac{I_n - I_\delta}{U_n - U_\delta} \right),$$

$$U_{const} = m_i \left( I_\delta - \frac{I_n - I_\delta}{U_n - U_\delta} \right),$$

$$U_{opr} = m_u U_n.$$

Значення опору, при якому струм в лінії, що вноситься, досягає номінального значення:

$$R = \sqrt{\left\{ \frac{m_i}{m_u} (1 - I^*) + I^* \sqrt{R_l^2 + X_l^2} \right\}^2 - X_l^2 - R_l}.$$

Струм в лінії в перехідному режимі дорівнює

$$I = \frac{U_{const}}{m_i - m_u \sqrt{(R_l + R_{вн})^2 + X_l^2}}.$$

Як видно, значення опору що вноситься електровозами в режимі переходу від рівня "дрімаючого" струму до номінального, визначає необхідне значення струму в лінії, забезпечуючи ефективну роботу перетворювача.

### Висновки до розділу

1. Запропоновано ввести поняття коефіцієнтів використання потужності (коефіцієнтів потужності) при характерних неповнофазних режимах роботи печі опору. Такий підхід дозволить аналітично визначити залежність для розрахунків коефіцієнтів і вирішити задачу симетрування цехового навантаження з урахуванням режимів роботи печі опору.

2. В результаті моделювання нерівномірності розподілу однофазного навантаження визначені межі, в яких нерівномірність не перевищує 15 %, що означає практично рівномірний розподіл навантаження. При потужності цехових трансформаторів 630-1600 кВА та печі до 50 кВт навантаження практично рівномірно розподілено при  $K_{ucp3} = 0,3...0,9$ . При зниженні  $K_{ucp3} = 0,1...0,3$  нерівномірність різко зростає. Відмінною особливістю отриманої залежності є урахування однофазних і двофазних навантажень ЕПО та їх впливу на нерівномірність розподілу навантаження.

3. Фазу пічного навантаження, що використовується для її переведення з трифазного режиму в двофазний запропоновано підключати до фази з максимальною потужністю однофазного навантаження мережі  $P_{max}$ , а фазу для переведення печі з двофазного в однофазний - до фази з середньою потужністю однофазного навантаження  $P_{ср}$ . Це дозволяє при певних співвідношеннях між  $P_{max}$ ,  $P_{min}$  використовуву-

вати пічне навантаження як симетруючий пристрій. У цьому суть запропонованої методики симетрування та створеної на її основі технології нагрівання виробів.

4. Отримана аналітична залежність для розрахунку  $\xi$  з урахуванням несиметричних режимів роботи печі опору. Показано, що значення  $\xi$  залежить від відношення максимального  $P_{max}$  і мінімального  $P_{min}$  значень однофазних навантажень мережі. Встановлені допустимі межі зміни  $P_{max}/P_{min}$ , які забезпечують симетрування навантажень. Це склало основу для вирішення практичних задач симетрування при використанні розробленого способу управління температурними режимами печі.

5. Для якісної оцінки симетруючого ефекту спеціальних режимів ЕПО розроблена математична модель визначення показників несиметрії напруги. Відмітною особливістю даної моделі є урахування відношення пічного навантаження до загальноцехового при розрахунку несиметрії.

6. При розрахунках можливих несиметричних режимів на отриманій моделі визначають відповідні співвідношення між потужністю печі опору і потужністю навантаження трансформатора, при яких коефіцієнти несиметрії напруги не перевищують допустимого рівня, а також визначають співвідношення навантажень, при яких симетрування необхідно.

7. Моделюючи несиметрію при заданих обмеженнях, показано, що регульовальні залежності несиметричних режимів отримані для граничних (максимальних) значень коефіцієнтів несиметрії, що обґрунтовано використанням максимальних потужностей при переведенні печі в неповнофазні режими.

8. При русі безконтактних електровозів уздовж тягової мережі зміна напруги в перетинах мережі залежить від координати точки прикладання навантаження. У точці включення опору, що вноситься, відбувається стрибкоподібне зростання значення напруги. Величина стрибка напруги залежить від характеру опору, що вноситься, ступеня компенсації індуктивного опору тяговій мережі і розміщення компенсаційних пунктів.

9. Результати математичного моделювання режимів навантаженої тягової мережі свідчать про необхідність регулювання навантаження мережі щоб уникнути порушення режимів роботи транспорту в цілому.

10. За будь-яких довжин тягових мереж зміна напруги в перетинах мережі при русі електровозів залежить від координати точки включення навантаження. Підвищення напруги характерне для знаходження електровоза на початку маршруту, а значення, близькі до параметрів ненавантаженої мережі спостерігаються, починаючи з середини маршруту і до його кінця. Слід зазначити, що приведені залежності для мереж різної протяжності одержані при однакових значеннях опору, що вноситься.

11. Дослідження ліній різної довжини показало необхідність регулювання навантаження тягової мережі задля уникнення перенапружень на окремих ділянках, які призводять до порушення режимів роботи транспорту в цілому.

12. Параметри режиму тягової мережі залежать від зміни навантаження - значення опору, що вноситься електровозом, і його координати.

13. При регулюванні тягового приводу електровоза для тягових мереж невеликої протяжності необхідно обмежувати опір , що вноситься, значенням 3 Ом.

14. У зв'язку з вищевикладеним актуальним стає проблема сумісного розгляду перехідних процесів в приймально-силовому контурі електровоза, тяговій мережі і тяговому перетворювачі частоти, яка перш за все може бути вирішена шляхом математичного моделювання. Це дасть можливість визначення доцільно допустимої області варіювання параметрів режиму всього комплексу.

15. Результати можуть служити основою для створення системи управління перетворювачем, що дозволить підвищити ефективність роботи перетворювача в граничних режимах, забезпечити його стійкість та економічність в роботі.

16. Визначений максимальний рівень відхилень частоти струму тягової мережі, що забезпечує стабілізацію повного опору на рівні 11 Ом. Він складає 2 % від номінального значення 5000 Гц. Цьому рівню відповідає граничне значення напруги на виході перетворювача частоти 1650 В. Відтворення цього режиму дозволяє знизити потужність перетворювача частоти при незмінній кількості електровозів на лінії, зменшити втрати енергії в мережі живлення.

17. Показано, що зазначення струму тягової мережі при відсутності електровозів на лінії дозволяє суттєво зменшити втрати електричної енергії, підвищити ККД системи індукційної передачі енергії в цілому.

## 2 СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

### 2.1 Розробка схем керування силовим комутатором системи електропередачі підвищеної надійності

До пристроїв управління силовим комутатором системи електропередачі підвищеної готовності пред'являються наступні основні вимоги: висока чутливість до витоків струму, аж до декількох міліамперів між лініями, у тому числі однопотенційними; висока швидкодія (до 10 мкс) формування сигналу на відключення силового ключа; висока перешкодозахищеність в умовах підключення до силових ліній електропередачі з імпульсними перешкодами випадкового походження.

Структура й схемні рішення системи керування багато в чому визначаються датчиками в колах лінії електропередачі й керованим силовим ключем.

Останнім часом одержали поширення безконтактні датчики струму на основі елементів Холу. Серед них для системи електропередачі найцікавіші датчики компенсаційного типу (наприклад, виробництва HONEYWELL) (рис. 2.1). До складу датчика входить кільцевий феритовий магнітопровід, лінійний датчик Холу, установлений у розріз магнітопроводу, підсилювач постійного струму й котушка негативного зворотного зв'язку. Така побудова дозволяє забезпечити результуюче магнітне поле практично нульового значення і як наслідок його високі характеристики по швидкодії (від 1 мкс), лінійності, точності ( $0,5\% I_{ном}$ ), широкому діапазону вимірюваних струмів (до 1200 А). Струмовий вихід перетворюється у вихід по напрузі за допомогою резистора  $R$ . У результаті

$$U_{вих} = \frac{R}{n} I, \quad (2.1)$$

де  $n$  – кількість витків котушки зворотного зв'язку.

Спрощена схема включення датчиків струму  $ДТ1$  й  $ДТ2$  в одну з віток

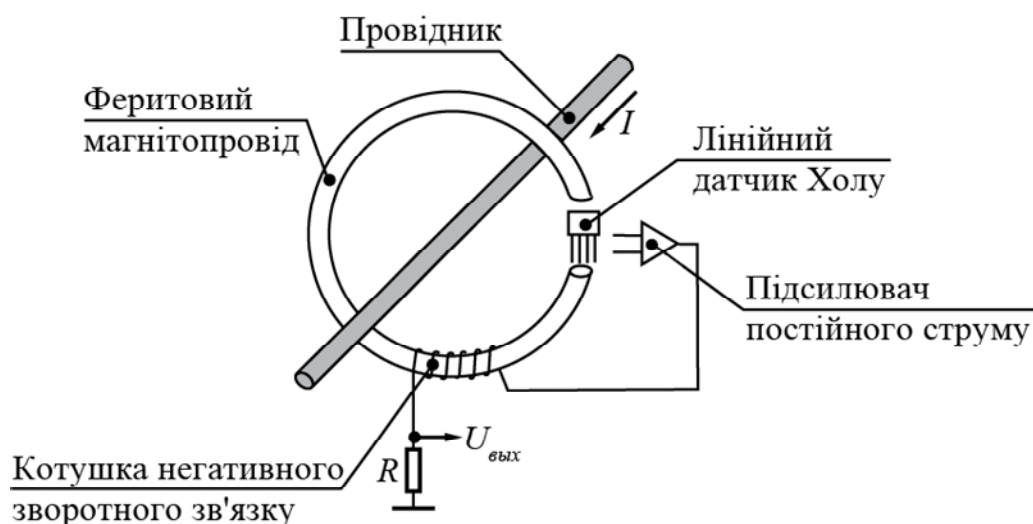


Рисунок 2.1 – Структурна схема безконтактного датчика струму компенсаційного типу

системи електропередачі представлена на рис. 2.2, а. З метою попередження синфазної перешкоди виходи датчиків підключені до диференціального підсилювача. Сигнал на виході підсилювача  $\Delta U$ :

$$\Delta U = \frac{R}{n}(I_1 - I_2)k_y, \quad (2.2)$$

де  $k_y$  – коефіцієнт підсилення підсилювача.

У випадку застосування шунтів як датчиків струму [14] входи диференціального підсилювача можуть бути підключені безпосередньо до шунтів (рис. 2.2, б). При цьому сигнал на виході підсилювача при замиканнях в однопотенційних лініях:

$$\Delta U_1 = k_y \cdot I \cdot R_{\Sigma}, \quad (2.3)$$

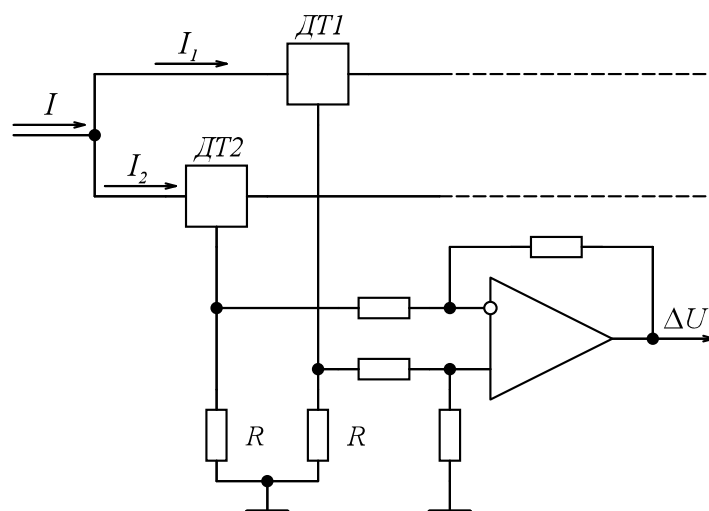
де  $R_{\Sigma}$  – визначається параметрами шунтів і лінії.

У випадку витоків струму між різнопотенційними лініями мінімальний сигнал, обумовлений витокami наприкінці лінії:

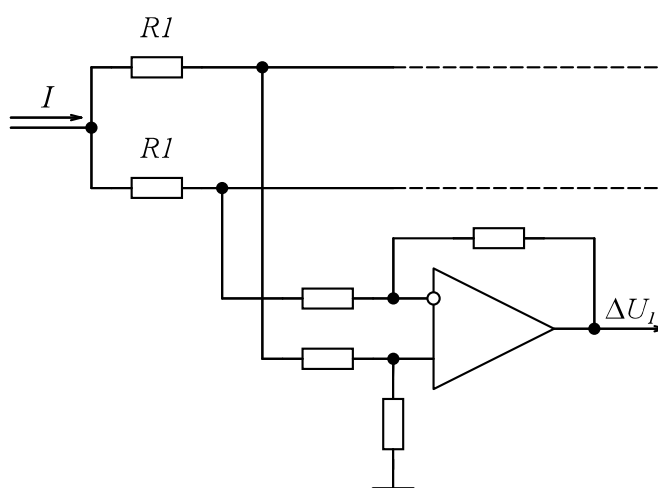
$$\Delta U_1 = k_y \cdot I \cdot R_{\Sigma 1}, \quad (2.4)$$

де  $R_{\Sigma 1}$  – визначається опором шунтів, лінії й додаткових резисторів.

Подальша обробка сигналу й принципова схема більш докладно описана в розділі 2.4.



а)



б)

Рисунок 2.2 – Спрощені схеми включення датчиків струму в одну з віток системи електропередачі

## 2.2 Аналіз роботи силових швидкодіючих комутаторів для систем випереджального вимикання

Останнім часом MOSFET і IGBT транзистори і їх модулі завдяки відомим достоїнствам значно потіснили інші напівпровідникові прилади, що застосовуються в тому числі, для комутації різних кіл. Маючи кола захисту зворотним діодом ці при-

лади можуть із успіхом використовувати в системах випереджального відключення при значному діапазоні навантажень. Однак у системах електропередачі, де в індуктивності кіл може запасатися значна енергія, часто на кілька порядків перевищуюча можливості захисного діода (як правило не більше  $30 \div 50$  мДж). При цьому необхідні додаткові засоби для ефективного гасіння цієї енергії при припустимому рівні перенапруг. При цьому достоїнства схем на зазначених приладах стають порівнянними зі схемами на тиристорах.

Інтенсивний розвиток силової напівпровідникової техніки за останні десятиліття привів до появи великої різноманітності тиристорних ключів постійного струму, які залежно від кількості керуючих сигналів у межах одного імпульсного циклу можуть бути розділені на одноопераційні, двоопераційні й багатоопераційні. До перших відносяться ключі постійного струму (переривники), у яких подається тільки один сигнал відмикання на основні тиристори, а їх запирання здійснюється автоматично після закінчення деякого часу внаслідок коливального процесу у відповідному контурі запирання [15].

У ключі другого виду запирання робочих тиристорів здійснюється після подачі додаткового сигналу керування на допоміжний тиристор, у результаті чого утворюється коло запирання робочого тиристора.

Ключі третього виду, крім цього, містять у собі додаткові керовані кола, за допомогою яких здійснюються різного роду підготовчі процеси в ключі.

Ключі другого й третього видів за принципом своєї роботи можуть бути застосовані в пристроях випереджального вимикання, тому подальший аналіз доцільно проводити стосовно до двоопераційних і багатоопераційних ключів постійного струму.

По виду комутації ці ключі можуть бути з паралельною і послідовною комутацією. Найбільш широке поширення одержали тиристорні ключі з паралельно-ємнісною комутацією (переривники) різного призначення. Недоліком цих ключів стосовно до умов роботи пристроїв випереджального вимикання є неможливість збереження здатності до відключення протягом тривалого часу через витік заряду комутуючого конденсатора при довгостроково включеному силовому тиристорі.



В інших тиристорних ключах [16-20], хоча й забезпечується компенсація втрат заряду комутуючого конденсатора при довгостроково включеному силовому тиристорі, однак розряд конденсатора відбувається при відключеному силовому тиристорі. Причому, підготовчий процес заряду цього конденсатора здійснюється після включення силового тиристора протягом досить тривалого часу. Так, у ключах, описаних в [18-20], підготовчий процес зарядки комутуючого конденсатора здійснюється через резистор, опір якого для умов роботи ключа в системі електропередачі повинен вибиратися, виходячи з необхідності надійного запирання комутуючого тиристора, включеного послідовно із цим резистором.

Забезпечення надійного запирання комутуючого тиристора можливо за умови зменшення струму через нього до величини, меншої струму втримання цього тиристора. Тому, з урахуванням величини напруги мережі, а також даних про величину струму втримання сучасних силових тиристорів, опір резистора становить від декількох кілоом до декількох десятків кілоом. У цьому випадку постійна часу заряду комутуючого конденсатора на кілька порядків перевищує необхідний час переривання споживаного від мережі струму, тобто тільки процес підготовки ключа до відключення здійснюється неприпустимо довго. У ключах, описаних в [16, 17] зарядка комутуючих конденсаторів здійснюється через дроселі й при певних параметрах дроселя може відбуватися швидше, чим у ключах із зарядним резистором. Однак і в цих ключах при значній індуктивності тягової мережі процес підготовки до відключення може значно перевищувати необхідний час відключення навантаження.

Відомий також тиристорний ключ, спеціально призначений для роботи в пристрої випереджального вимикання при струмозніманні [21]. Цей ключ характеризується малим часом підготовки до відключення, завдяки додатковим колам, за допомогою яких форсується процес зарядки комутуючого конденсатора. Процес зарядки комутуючого конденсатора здійснюється від додаткового накопичувального конденсатора великої ємності, що практично виключає вплив індуктивності мережі на тривалість цього процесу. При цьому дозарядка накопичувального й комутуючого конденсаторів від контактної мережі також форсується, завдяки імпульсам ЕРС, що наводяться в обмотках трансформатора, які підключені до цих конденсаторів (індук-

тивне форсування). Як показують експериментальні дослідження [22], процес зарядки комутуючого конденсатора може закінчуватися практично через  $15 \div 20$  мкс. Найбільша ефективність роботи ключа досягається при мінімальній індуктивності мережі, тому що у цьому випадку підвищується ефективність індуктивного форсування. Недоліком ключа, що обмежує можливості його застосування в пристроях випереджального вимикання, є низька швидкодія переривання струму при малих навантаженнях, тому що в цьому випадку суттєво затягується процес перезарядження комутуючого конденсатора. Зазначений недолік характерний для вузлів паралельної комутації, у яких комутуючий контур підключається паралельно силовому тиристорі, і відсутні кола для прискорення процесу перезаряду комутуючого конденсатора (рис. 2.3, а – в).

Процес переривання споживаного від мережі струму  $i_o$  в цих вузлах включає етап перезарядження комутуючого конденсатора  $C$  через навантаження, початок якого характеризується зміною струму  $i_o$  споживаного від мережі, а кінець – перериванням цього струму  $i$ , відповідно, запиранням тиристора  $VS2$ . Схема заміщення для розрахунків тривалості цього етапу при малому навантаженні наведена на рис. 2.3, г, на якому позначені:  $\Sigma L$  – сумарна індуктивність кола, що включає індуктивність мережі  $L_C$  і котушки контуру комутації  $L_K$ ;  $\Sigma R$  – сумарний активний опір, що складається з опору джерела живлення й мережі  $R_C$ , навантаження  $R_H$  і еквівалентного активного опору контуру комутації  $R_K$ ;  $U_C$  – напруга на комутуючому конденсаторі в момент зміни струму  $i_o$ .

Вираз для споживаного струму  $i$  (в операторній формі):

$$i(p) = i_{oH} \frac{p^2 + p \frac{E - U_C}{\Sigma L \cdot i_{oH}}}{p^2 + \frac{\Sigma R}{\Sigma L} p + \frac{1}{\Sigma LC}}, \quad (2.5)$$

де  $i_{oH}$  – початкове значення струму, що переривається.

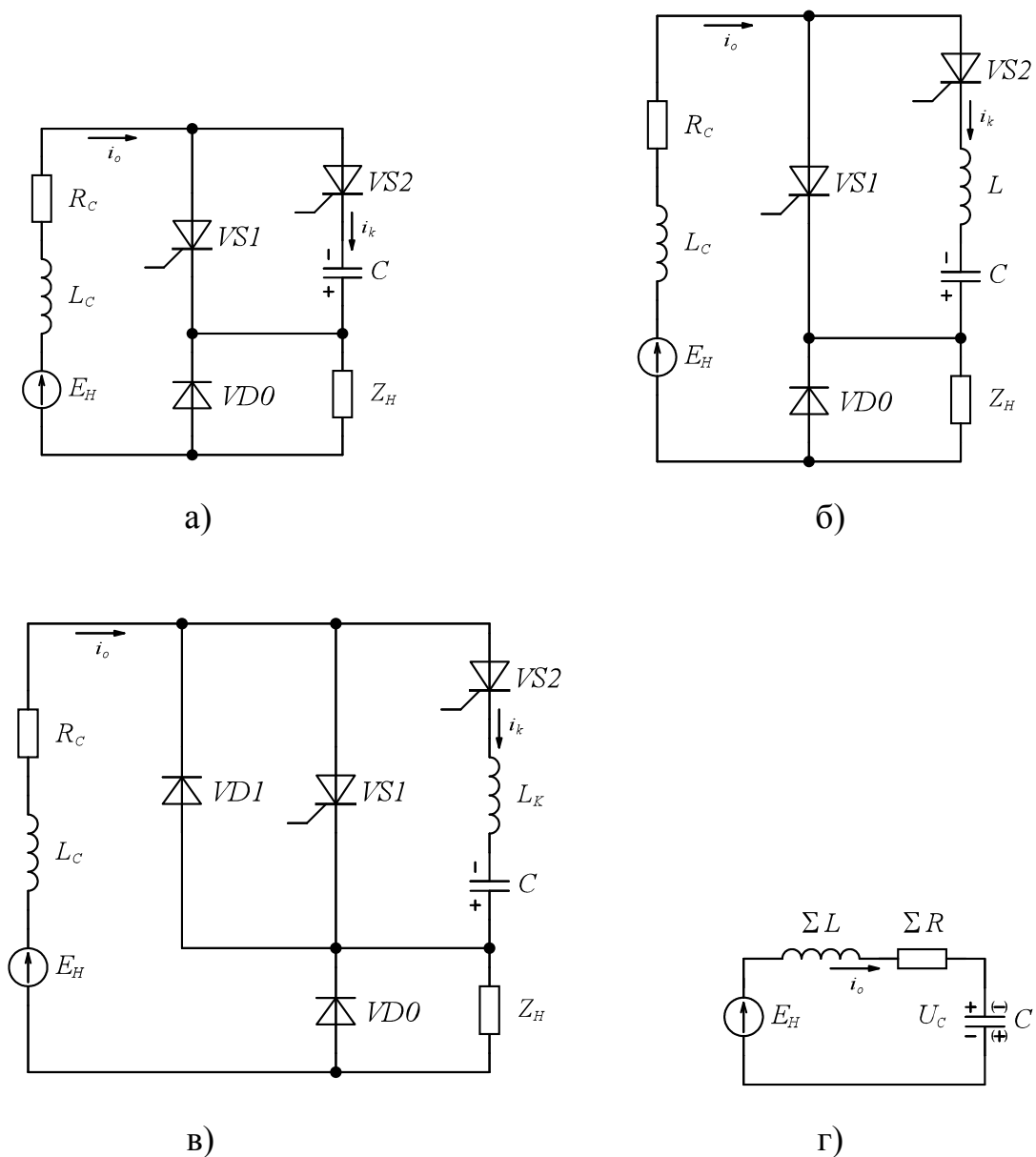


Рисунок 2.3 – Схеми вузлів комутації тиристорних ключів і схема заміщення для розрахунків часу переривання споживаного від мережі струму

Для оригіналу (2.5) маємо:

$$i(t) = i_{OH} \exp\left(-\frac{a}{2}t\right) \left[ ch(bt) + \frac{1}{b} \left( \frac{E - U_C}{\Sigma L \cdot i_{OH}} - \frac{a}{2} \right) sh(bt) \right], \quad (2.6)$$

$$\text{де } a = \frac{\Sigma R}{\Sigma L}; \quad b = \sqrt{\frac{a^2}{4} - \frac{1}{\Sigma LC}}.$$

Якщо вважати, що споживаний струм миттєво переривається при його зменшенні до величини струму втримання  $i_y$  тиристора  $VS2$ , то, підставляючи значення  $i_y$  в ліву частину рівняння (2.6) і, вирішуючи його відносно  $t$ , одержимо значення  $\tau$  часу переривання струму  $i_o$  з моменту початку зміни цього струму. Величина й знак напруги на конденсаторі  $C$  у формулі (2.6) вибираються залежно від структури комутаційного вузла відповідно до розрахункової схеми. Якщо в момент включення тиристора  $VS2$  напруга конденсатора  $C$  рівна  $U_{CO}$ , то для схеми на рис. 2.3, а  $U_C = -U_{CO}$ . У вузлі комутації, схема якого наведена на рис. 2.3, б процес зміни струму  $i_o$  починається в момент запирання тиристора  $VS1$ , тобто в момент досягнення струму контуру комутації  $i_k$  значення  $i_{oH}$ . Тривалість етапу  $\tau_1$  від моменту відмикання тиристора  $VS2$  до моменту запирання  $VS1$  може бути визначена з формули:

$$i_{oH} = \frac{U_{CO}}{\omega L_K} \exp(-\delta\tau_1) \sin(\omega\tau_1), \quad (2.7)$$

$$\text{де } \delta = \frac{R_K}{2L_K}; \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{L_K C} - \delta^2}.$$

Напруга конденсатора  $C$  у момент запирання тиристора визначається за допомогою виразу:

$$U_C = U_{CO} \frac{\omega_o}{\omega} \exp(-\delta\tau_1) \sin(\omega\tau_1 - \theta), \quad (2.8)$$

$$\text{де } \omega_o = \frac{1}{L_K C}; \quad \theta = \arctg \frac{\omega}{-\delta}.$$

Аналогічно, за допомогою формул (2.7) і (2.8) знаходиться тривалість етапу  $\tau_1$  і величина напруги конденсатора  $U_C$  у момент зміни струму  $i_o$  (момент запирання діода  $VD1$ ) для вузла, зображеного на рис. 2.3, в. Слід урахувати, що у виразі (2.7) необхідно знайти друге значення  $\tau_1'$  при якому виконується рівність. Це обумовлене тим, що при перезаряді конденсатора  $C$  струм у комутуючому контурі двічі досягає

значення  $i_{OH}$  – при збільшенні від нуля до максимального значення й при зниженні від максимального значення до  $i_{OH}$ . Причому, в останньому випадку замикається діод  $VD1$ , і починається процес зменшення струму  $i_o$ .

Аналіз виразу (2.6) – (2.8) при реальних значеннях ( $\Sigma L = 10^{-3} \div 10^{-2}$  Гн,  $L_K = 2 \cdot 10^{-5}$  Гн,  $C = 4 \cdot 10^{-4}$  Ф,  $i_y = 0,05$  А) показує, що повний час  $\tau_n = \tau + \tau_1$  переривання споживаного від мережі струму  $i_o = 1 \div 5$  А практично не залежить від індуктивності кола. На рис. 2.4 показані криві залежності значень  $\tau_n$  від величини струму, що переривається, отримані за допомогою рівнянь (2.6) – (2.8) при зазначених значеннях параметрів, що входять у них. Оскільки при малих значеннях  $i_o$  тривалість  $\tau_1 \ll \tau$  крива 1 відповідає двом вузлам, зображеним на рис. 2.3, а, б. Крива 2 відповідає комутаційному вузлу, зображеному на рис. 2.3, в при різних значеннях добротності  $Q = \sqrt{\frac{L_K}{C} \cdot \frac{1}{R_K}}$  контуру комутації. Дані графіків дозволяють зробити

висновок про те, що тиристорні ключі з розглянутими вузлами комутації, у яких не передбачені додаткові кола для прискорення перезаряду комутуючого конденсатора практично не дозволяють забезпечити випереджальне вимикання при малих струмах навантаження.

При відповідному керуванні відзначених недоліків позбавлені ключі постійного струму з додатковим керованим колом перезаряду комутуючого конденсатора, описані в [23, 24] (рис. 2.5). У цих ключах при періодичному включенні тиристора  $VS3$  забезпечується підзарядка комутуючого конденсатора незалежно від стану силового тиристора  $VS1$ . Підготовчий процес перезарядження комутуючого конденсатора, здійснюваний перед запиранням силового тиристора  $VS1$  через тиристор  $VS2$ , може мати незначну тривалість (згідно [25] тривалість цього інтервалу становить порядку 30 мкс). Процес переривання струму, споживаного від мережі, може бути значно прискорений, якщо по закінченню процесу запирання тиристора  $VS1$  дозарядка комутуючого конденсатора буде здійснюватися через дросель  $L_D$  і тиристор

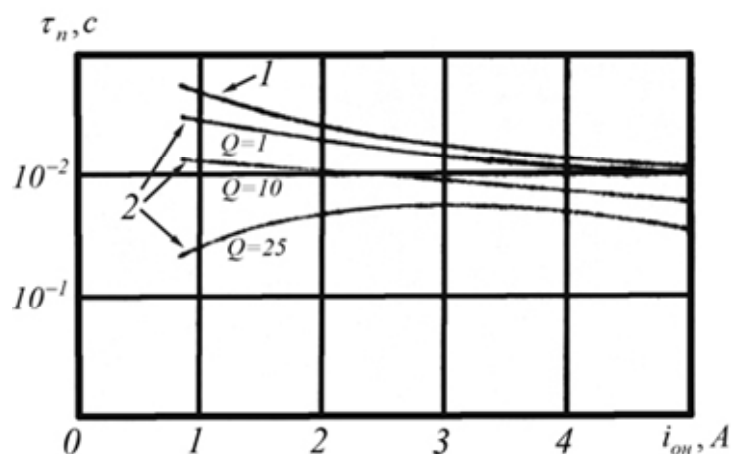


Рисунок 2.4 – Криві залежності часу переривання споживаємого струму від величини початкового струму

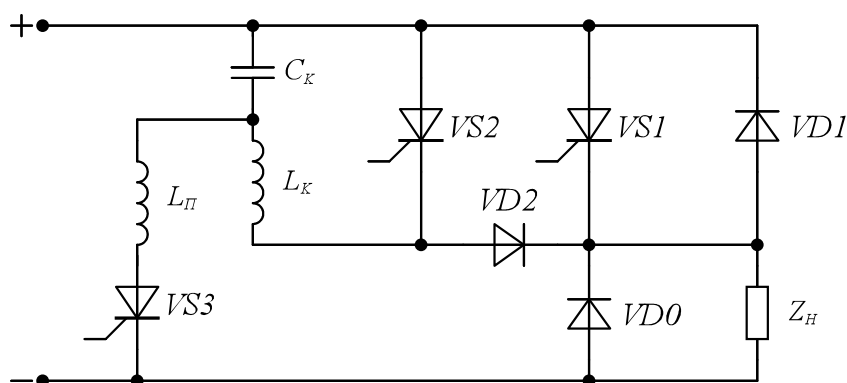


Рисунок 2.5 – Принципова схема тиристорного ключа

$VS3$ . При певних параметрах дроселя  $L_{II}$  можна забезпечити виконання вимог по швидкодії переривання споживаного струму. Недолік цих ключів стосовно до пристроїв попередження іскріння полягає в тому, що його підключення до джерела живлення може супроводжуватися іскрінням через значний зарядний струм конденсатора, що протікає через комутуючий контур і навантаження, а також можливість виникнення значних перенапруг на елементах ключа в результаті "накачування" напруги на комутуючому конденсаторі при його багаторазових перезарядженнях [26, 27].

Стосовно до умов роботи в пристроях попередження іскріння інтерес представляють також тиристорні ключі з послідовною комутацією, завдяки можли-

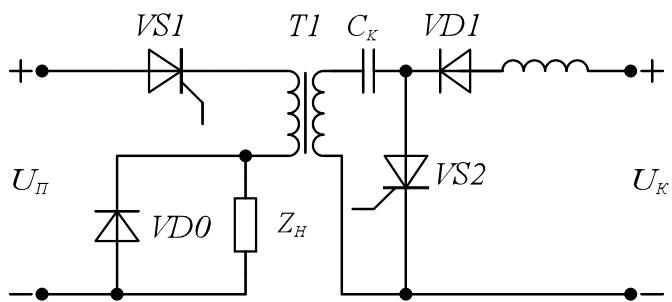
вості практично миттєвого відділення навантаження від елементів комутаційного вузла й джерела живлення при запиранні силового тиристора. Найбільше поширення серед ключів одержали ключі із трансформаторною й дросельною комутацією.

Характерною рисою ключів з послідовною трансформаторною комутацією [24, 28] (рис. 2.6) є введення за допомогою імпульсного трансформатора ЕРС зустрічно силовому струму, що протікає через тиристор  $VS1$  і навантаження. На відміну від ключів с паралельно-ємнісною комутацією в ключах, схеми яких зображені на рис. 2.6 а, б, зменшення споживаного від мережі струму відбувається відразу після включення замикаючого тиристора  $VS2$ , що дозволяє забезпечити підвищена швидкодія при перериванні споживаного від мережі струму. Істотним недоліком цих ключів є необхідність у додатковому джерелі живлення для зарядки комутуючого конденсатора.

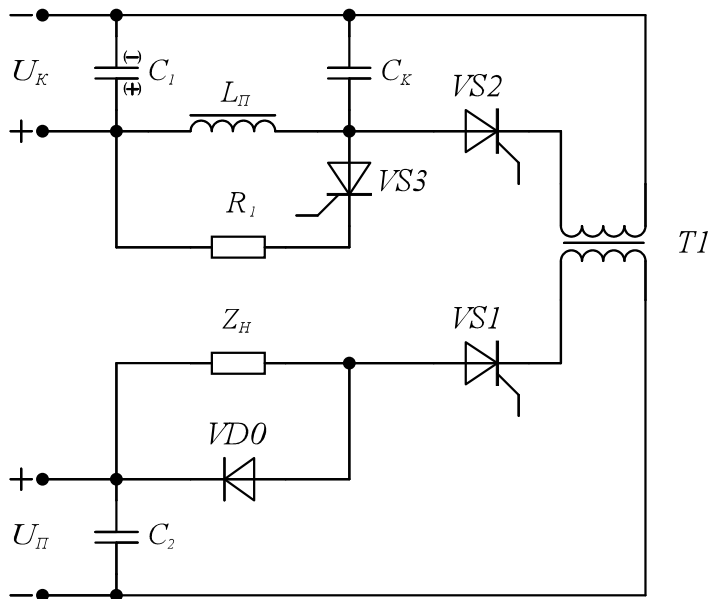
Схема тиристорного ключа з послідовною трансформаторною комутацією, у якій зарядка конденсатора й живлення навантаження здійснюються від одного джерела живлення, наведена на рис. 2.6 в. Цей ключ має незалежне від стану силового тиристора  $VS1$  коло підживлення комутуючого конденсатора  $C_K$  через діод  $VD1$  і одну з обмоток трансформатора, і характеризується малою залежністю часу перезаряду конденсатора від струму навантаження. Однак для надійної роботи ключа при максимальному навантаженні й значній індуктивності мережі буде потрібна досить велика ємність комутуючого конденсатора [29], що неминуче приведе до затягування процесів його перезаряду й зниженню швидкодії ключа.

Відзначені вище недоліки мають також тиристорні ключі з паралельною й послідовною комутацією, створені на основі універсальних схем для комутації тиристорів [17, 18].

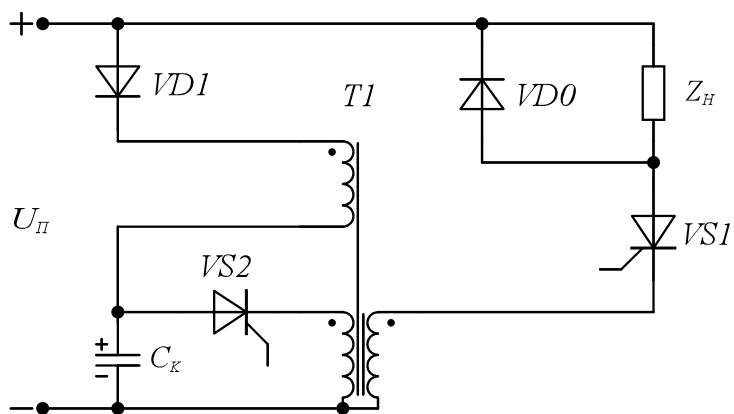
Деякі із ключів з послідовною дросельною комутацією багато в чому подібні ключам, що мають трансформаторну комутацію, і відрізняються від них лише тим, що при комутації силового тиристора комутуючий конденсатор безпосередньо підключається послідовно з навантаженням і цим тиристором [32-35] (рис. 2.7).



a)



б)



в)

Рисунок 2.6 – Схеми тиристорних ключів з послідовною трансформаторною комутацією



Процес зменшення споживаного струму в цих ключах також починається практично відразу ж після включення допоміжного тиристора  $VS2$ . На відміну від ключів із трансформаторною комутацією для запирання силового тиристора необхідно, щоб напруга на комутуючому конденсаторі в момент включення тиристора  $VS2$  перевищувала напругу живильної мережі.

Цього недоліку позбавлені ключі із дросельною комутацією [26, 36-39], у яких комутуючий конденсатор під час комутації підключається не паралельно дроселю в силовому колі, а послідовно з ним (рис. 2.8). Крім цього, ключі можуть забезпечити безіскрове підключення до джерела живлення, мають високу готовність до відключення навантаження, завдяки можливості підживлення комутуючого конденсатора й малому часу підготовчого процесу. У процесі комутації навантаження практично миттєво відділяється від джерела живлення й вузла комутації, тому тривалість процесу переривання споживаного струму не залежить від параметрів і характеру навантаження.

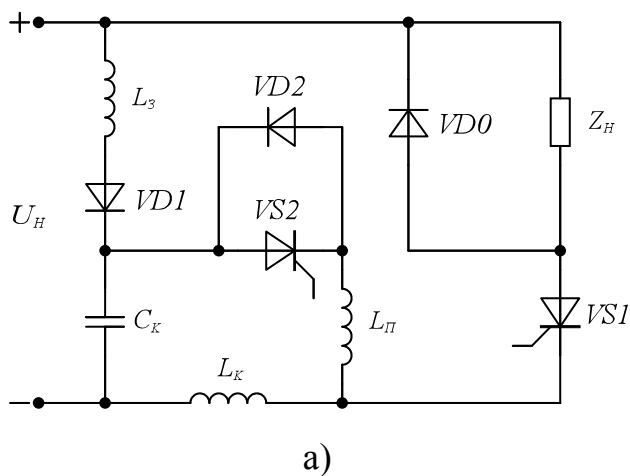
Тривалість процесу переривання споживаного від мережі струму може бути розрахована за допомогою еквівалентної схеми заміщення представленої на рис. 2.3, г. При малому опорі мережі процес зміни струму носить коливальний характер і описується рівнянням:

$$i(t) = i_{он} \exp\left(-\frac{a}{2}t\right) \cos \omega t - \frac{1}{\Sigma L \omega} \left(-U_{CO} - E - i_{он} \frac{a}{2}\right) \exp\left(-\frac{a}{2}t\right) \sin \omega t, \quad (2.9)$$

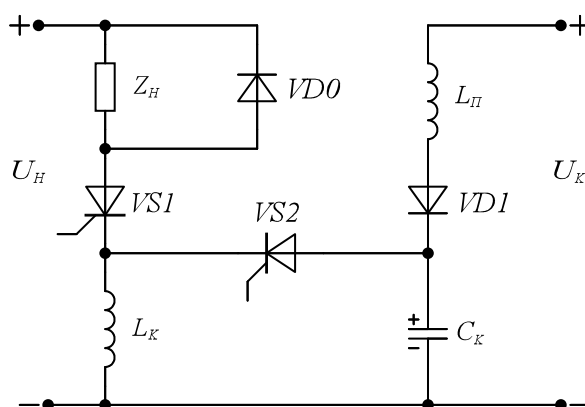
$$\text{де } a = \frac{\Sigma R}{\Sigma L}; \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{\Sigma LC} - \frac{a^2}{4}}.$$

Дорівнявши (2.9) нулю, одержимо значення часу переривання споживаного струму:

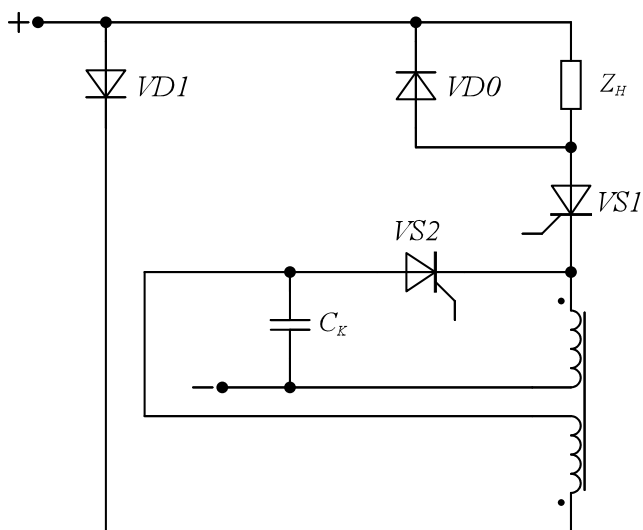
$$\tau = \frac{1}{\omega} \left( \operatorname{arctg} \frac{i_{он} \Sigma L \omega}{\frac{i_{он} \Sigma R}{2} - U_{CO} - E} + \pi \right). \quad (2.10)$$



a)

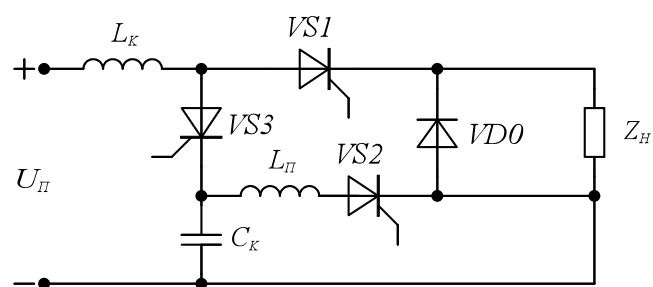


б)

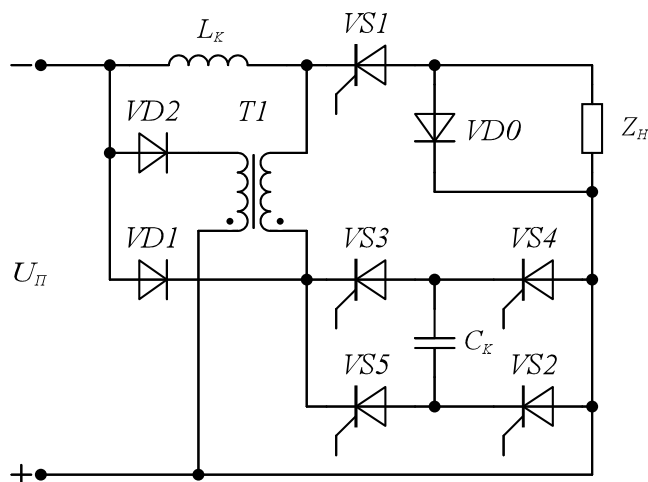


в)

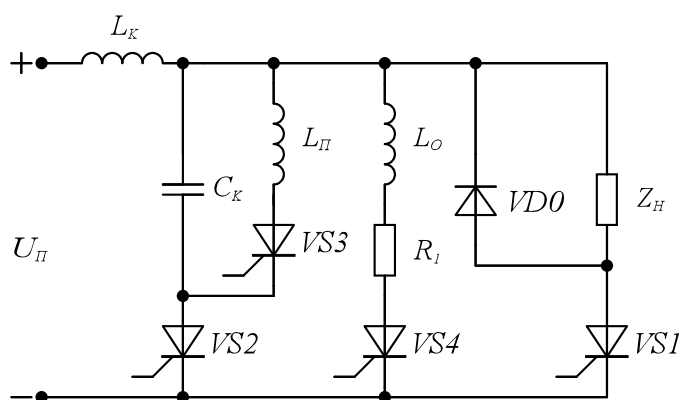
Рисунок 2.7 – Принципові схеми тиристорних ключів з послідовною дросельною комутацією (конденсатор включається паралельно дроселю)



а)



б)



в)

Рисунок 2.8 – Принципові схеми тиристорних ключів з послідовною дросельною комутацією (конденсатор включається послідовно із дроселем)

На рис. 2.9 наведені криві залежності  $\tau$  від індуктивності мережі при різних значеннях  $i_{\text{оН}}$ ,  $C = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$ ,  $E = 275 \text{ В}$ ,  $U_{\text{CO}} = E - i_{\text{оН}} \Sigma R$ ,  $L_K = 10^{-3} \text{ Гн}$ . Криві показують, що розглянуті ключі мають досить високу швидкодію при перериванні спо-

живаного від мережі струму практично у всьому необхідному діапазоні зміни цього струму й індуктивності мережі, причому при більших значеннях струму їх швидкості вище. Максимальне значення часу переривання струму (6 мс) отримане при мінімальному струмі, що переривається,  $i_{OH} = 2 \text{ A}$  і індуктивності контактної мережі  $L_C = 8 \text{ мГн}$ .

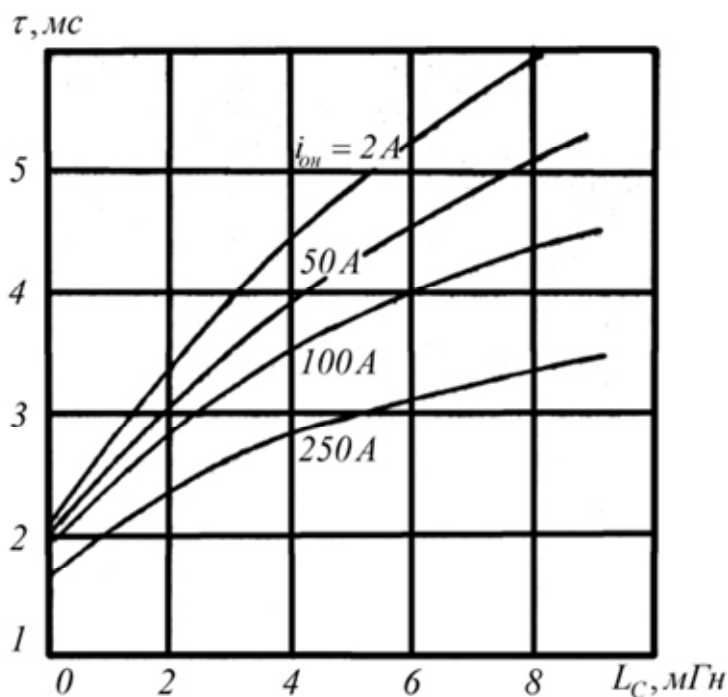


Рисунок 2.9 – Криві залежності часу переривання споживаного струму ключем з послідовною дросельною комутацією

Недолік ключа, що не має кіл для "скидання" зайвої енергії, що запасється у вузлі комутації в результаті багаторазових переривань струму (рис. 2.8 а), полягає в значних перенапругах на його елементах. Напруга на комутуючому конденсаторі може в десятки разів перевищувати напруги джерела [26].

Для усунення цих перенапруг у ключах з послідовною дросельною комутацією (рис. 2.8, б) передбачені кола для "скидання" енергії комутуючого конденсатора в живильну мережу [23]. Однак, цей метод обмеження перенапруг на елементах ключа не прийнятний в умовах роботи системи електропередачі, тому що "скидання" енергії неможливе під час відсутності інших електроприймачів, підключених до тягової мережі.

В [39] запропоноване додаткове коло  $L_O - R1 - VS4$  (рис. 2.8, в), що забезпечує відвід зайвої енергії від комутуючого конденсатора. Це коло дозволяє обмежити перенапруги практично на будь-якому необхідному рівні. Однак для забезпечення переривання струму, споживаного від мережі, необхідне переривання струму через елементи цього кола, для чого в ключі потрібен повторний цикл роботи комутаційного вузла. Це приводить до істотного затягування процесу переривання споживаного від мережі струму.

### 2.3 Розробка схеми силового швидкодіючого комутатора для систем електропередачі підвищеної надійності

Одним з найважливіших пристроїв, за допомогою яких забезпечується безпека кіл зі штучним скороченням тривалості розряду при комутації, є швидкодіючий ключ, що відключає джерело живлення від кола, що захищається. Аналіз роботи відомих систем електропередачі із замикаючим ключем показує, що найнебезпечнішими є замикання наприкінці лінії електропередачі, тому що в цьому випадку в розряді може виділитися максимальна енергія, а тривалість розряду в реальних умовах може досягати  $500\text{мкс} \div 1\text{мс}$  і більше. Очевидно, що такі ключі недостатньо ефективні. Значно скоротити енергію, що надходить у розряд і його тривалість можливо шляхом форсування процесу зменшення струму в колі за рахунок уведення додаткового джерела  $E$  (рис. 2.10). Еквівалентна схема для розрахунків перехідних процесів у колі із джерелом  $E$  наведена на рис. 2.10, б, при цьому припускаємо, що напруга на розряді значно менше напруги джерела.

Рівняння, що описує процес зміни струму в колі комутації:

$$i(t) = \frac{E}{R} \left[ \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) - 1 \right] + I_O \exp\left(-\frac{R}{L}t\right), \quad (2.11)$$

де  $L$  і  $R$  – індуктивність і опір лінії електропередачі;

$I_O$  – початкове значення струму кола в момент комутації.

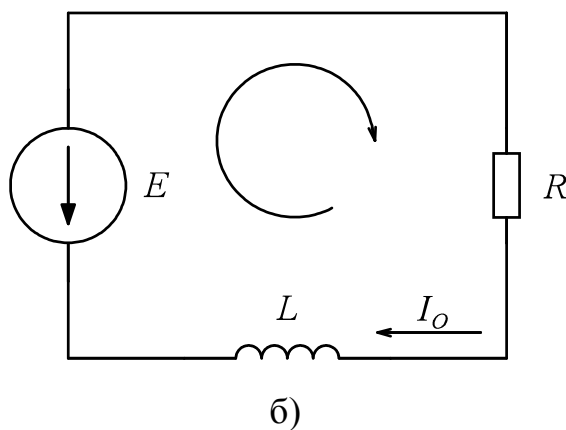
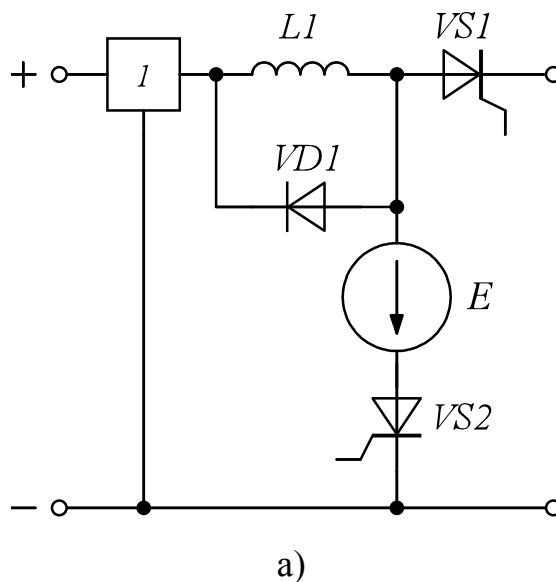


Рисунок 2.10 – Принципова схема швидкодіючого ключа (а) і  
схема для розрахунків тривалості переривання струму (б)

З (2.11) визначимо час  $t_{омк}$  протягом якого струм у колі зменшиться до нуля:

$$t_{омк} = -\frac{L}{R} \ln \frac{E}{RI_O + E}, \quad (2.12)$$

Аналіз виразу (2.12) показує, що час відключення  $t_{омк}$  в порівнянні із замикаючими ключами може бути зменшений в сотні й більше разів і становити одиниці мікросекунд, при цьому багаторазово зменшується також і енергія, що виділяється в розряді.

## 2.4 Розробка структурної та принципової схеми системи електропередачі підвищеної надійності

На рис. 2.11 наведена структурна схема одної з віток системи електропередачі підвищеної потужності.

Схема містить силовий ключ  $K$ , датчики струму  $ДТ1$  і  $ДТ2$ , диференціальний підсилювач  $ДУ$ , двухграничний компаратор  $ДК$  й чекаючий мультивібратор  $М$ . Роботу схеми розглянемо на прикладі принципової схеми експериментального зразка.

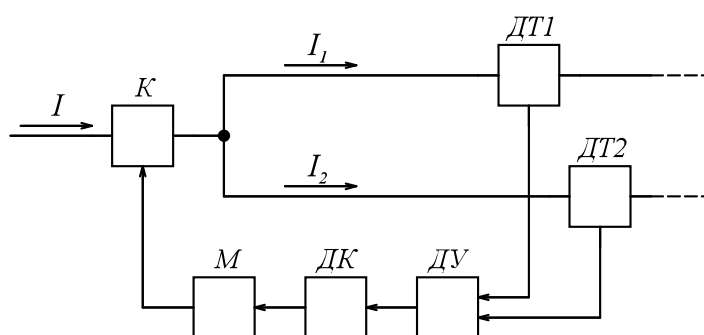


Рисунок 2.11 – Структурна схема одної з віток системи електропередачі підвищеної потужності

На рис. 2.12 наведена принципова схема експериментального зразка іскробезпечної системи передачі електроенергії підвищеної потужності при постійному струмі.

Схема містить вузол контролю струморозподілу, виконаний на операційному підсилювачі  $DA1$ . Диференціальне включення входів підсилювача дозволяє зменшити вплив струму навантаження на чутливість пристрою й значно підвищити завадостійкість схеми. Нерівномірність струморозподілу в лінії електропередачі компенсується за допомогою резисторів  $R3$  і  $R7$ . Вихід вузла контролю струморозподілу підключений до входу компараторів  $DA2$  і  $DA3$ , який визначає чутливість системи (резистори  $R11$  й  $R12$ ). Гістерезис передаточної характеристики компараторів, що досягається за рахунок уведення позитивного зворотного зв'язка (резистори  $R13$  й  $R14$ ) сприяє підвищенню завадостійкості системи. Чекаючий мультивібратор на

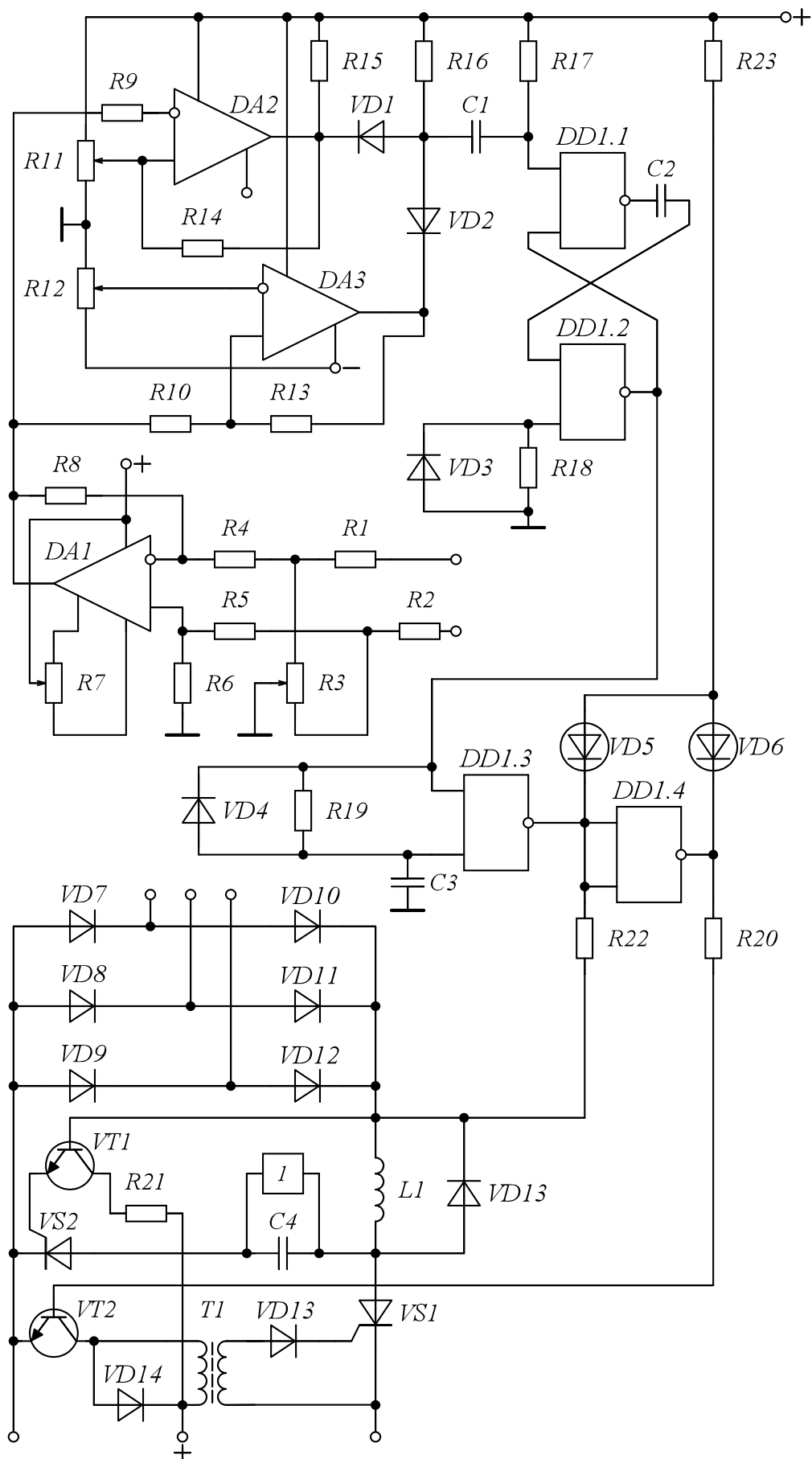


Рисунок 2.12 – Принципова схема експериментального зразка



елементах  $DD1.1$  і  $DD1.2$ , призначений для зручності експериментальних досліджень, тому що завдяки ньому забезпечується автоматичне включення системи з деякою затримкою після відключення. Чекаючий мультивібратор через елементи  $DD1.3$  і  $DD1.4$  й транзистори  $VT1$  і  $VT2$  керує роботою силового тиристорного ключа на тиристорах  $VS1$  і  $VS2$ . Тиристор  $VS2$  і конденсатор  $C4$  утворюють вузол примусової комутації силового тиристора  $VS1$ . Блок 1 забезпечує зарядку й підживлення конденсатора  $C4$  до напруги, необхідної для комутації тиристора  $VS1$ .

Пристрій працює в такий спосіб.

При виникненні обриву, замикання або появи небезпечних витоків струму у лінії електропередачі, на вході диференціального підсилювача з'являється сигнал, обумовлений зміною струморозподілу в паралельних вітках. Цей сигнал підсилюється підсилювачем  $DA1$  і приводить до спрацьовування одного з компараторів  $DA2$  або  $DA3$ . Спрацьовуванням одного з компараторів приводить до запуску чекаючого мультивібратора на елементах  $DD1.1$  і  $DD1.2$  й наступному відкриванню транзистора  $VT1$ . У результаті цього відбувається включення тиристора  $VS2$ , при цьому конденсатор  $C4$  підключається через лінію електропередачі до тиристора  $VS1$  й тиристор  $VS1$  закривається. Наступне включення тиристора  $VS1$  відбувається по закінченню часу спрацьовування чекаючого мультивібратора.

Дослідження експериментального зразка проводилося з метою оцінки енергії, що виділяється в розряді при обриві лінії, замиканнях у різних її точках, а також перевірки спрацьовування системи на іскронебезпечні витоки струму.

Експериментальні дослідження проводилися на кабельній лінії електропередачі довжиною 210 м при активному навантаженні ( $L < 40$  мкГн). Оцінка енергії, що виділялася в розряді здійснювалася по осцилограмам струму й напруги розряду, отриманим за допомогою двопробеневого запам'ятовувального осцилографа.

Дослідження проводилися при напрузі джерела до 235 В і струму навантаження до 4,3 А ( $P = 1,01$  кВт).

Результати досліджень показали, що максимальна енергія в розряді виділялася при замиканні лінії безпосередньо на виході тиристорного ключа й ця енергія не пе-

ревищувала  $10^{-4}$  Дж. При обривах у лінії незалежно від місця обриву енергія в розряді не перевищувала  $10^{-5}$  Дж.

Перевірка працездатності експериментального зразка при відключенні повільно мінливих витоків показала, що відключення надійно здійснювалося при струмі 4,7 мА на початку лінії й струмі 9 мА – наприкінці, що значно менше гранично припустимих значень.

Таким чином, проведені дослідження доводять можливість створення систем іскробезпечної електропередачі підвищеної потужності.

### **Висновки до розділу**

1. В роботі досліджені схеми керування силовим комутатором на основі безконтактних компенсаційних датчиків струму з елементами Хола та датчиків на основі резисторів. Установлені співвідношення вихідних сигналів схем залежно від виду замикання в лінії.

2. Проведений аналіз роботи силових швидкодіючих комутаторів для систем випереджального вимикання. Наведені співвідношення й графіки для оцінки швидкодії комутаторів.

3. Розроблена схема силового швидкодіючого комутатора для систем електропередачі підвищеної надійності. Проведений аналіз роботи схеми й показана можливість суттєвого підвищення швидкодії її роботи.

4. Розроблена структурна та принципова схеми системи електропередачі підвищеної надійності, описаний їхній принцип дії й наведені деякі результати випробувань макетного зразка.

## **3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО СТВОРЕННЯ НОВОГО ТИПУ СИНХРОННОГО ПРИВОДУ**

### **3.1 Розробка методу визначення раціональних параметрів ЕМС з СД та програмно-керованим збудником**

#### **3.1.1 Оцінка впливу та удосконалений метод врахування насичення магнітних кіл**

При розробці методу визначення раціональних параметрів ЕМС з СД та програмно-керованим збудником необхідно врахувати, що в перехідному та сталому режимах синхронного двигуна його параметри змінюються і можуть відрізнятися від паспортних за рахунок нагрівання обмоток, регулювання струму збудження та можливого насичення магнітної системи. Зокрема, в результаті насичення змінюється синхронний індуктивний опір  $x_d$  за повздовжньою віссю для визначення якого користуються спрямленою характеристикою холостого ходу (х.х.). Причому, паспортне ненасичене значення  $x_{d\infty}$  визначається за «методом холостого ходу і короткого замикання» по спрямленій характеристиці х.х. яка є дотичною до характеристики на початку координат [40]. За даними Г.К. Жерве [41] це є найкращим методом.

Для розрахунку сталих режимів роботи користуються спрямленою характеристикою х.х., яка проходить через початок координат та точку характеристики, що відповідає робочому режиму роботи [42]. Окрім того, можна скористатись реальною х.х.х. (за даними заводу виробника) і тим самим визначити насичене значення  $x_d$  для кожного конкретного струму збудження  $I_e$ , А.

Відповідно до «методу холостого ходу і короткого замикання» синхронний індуктивний опір  $x_d$  за повздовжньою віссю визначається як відношення фазної напруги холостого ходу  $E_\phi$ , при деякому струмі збудження, до струму фази статора  $I_\phi$  при симетричному короткому замиканні (визначається за характеристикою ко-

роткого замикання (к.з.) при тому ж струмі збудження). В загальному випадку маємо

$$x_d = \frac{E_\phi}{I_\phi} = \frac{E_\lambda}{\sqrt{3}I_\phi}, \text{ Ом}, \quad (3.1)$$

де  $E_\lambda$  – лінійна напруга холостого ходу, В.

Надалі індекс «ф» при струмі статора вказувати не будемо, оскільки він дорівнює лінійному. Характеристика к.з. лінійна і в загальному випадку визначається виразом

$$I = \frac{I_{кз}}{I_{екз}} I_e, \quad (3.2)$$

де  $I_{кз} = I_n$  – номінальний струм фази статора, А;

$I_{екз}$  – струм обмотки збудження, за якого в симетрично замкненій накоротко обмотці статора протікає номінальний струм, А.

Замість струму збудження к.з.  $I_{екз}$  в параметрах двигуна можуть вказувати відношення короткого замикання (ОКЗ)

$$ОКЗ = \frac{I_{eo}}{I_{екз}},$$

де  $I_{eo}$  – струм холостого ходу обмотки збудження, А.

Звідки струм обмотки збудження при к.з.

$$I_{екз} = \frac{I_{eo}}{ОКЗ}.$$

Відповідно характеристика к.з.

$$I = \frac{I_{кз} OKЗ}{I_{e0}} I_e.$$

Враховуючи отримані характеристики к.з., синхронний індуктивний опір за повздовжньою віссю

$$x_d = \frac{E_l \cdot I_{екз}}{\sqrt{3} \cdot I_{кз} \cdot I_e} = \frac{E_l \cdot I_{e0}}{\sqrt{3} \cdot I_{кз} OKЗ \cdot I_e}, \text{ Ом.} \quad (3.3)$$

Спрямлена характеристика х.х., що є дотичною на початку координат позначається як  $E_{л\infty}$ , а відповідно ненасичене значення синхронного індуктивного опору за повздовжньою віссю

$$x_{d\infty} = \frac{E_{л\infty} \cdot I_{екз}}{\sqrt{3} \cdot I_{кз} \cdot I_e} = \frac{E_{л\infty} \cdot I_{екз}}{\sqrt{3} \cdot I_{кз} OKЗ \cdot I_e}, \text{ Ом.} \quad (3.4)$$

Наприклад, для синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80УХЛ4 потужністю 4 МВт відповідно до даних заводу виробника двигуна маємо характеристику холостого ходу у відносних одиницях (див. табл. 3.1, а).

Таблиця 3.1 – Характеристика холостого ходу синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4

а) у відносних одиницях

Ампер витки холостого ходу (в.о.)	0	0,4932	0,7907	1,1310	1,2210	1,3321	2,08
$E^*$ (в.о.)	0	0,5	0,8	1,1	1,15	1,2	1,4

б) в абсолютних одиницях

$I_e, A$	0	94,842	152,052	217,491	234,798	256,525	399,984
$E_l, B$	0	3000	4800	6600	6900	7200	8400

Помноживши відповідні відносні значення на струм холостого ходу  $I_{e0}$  та лінійну напругу  $U_l$ , отримаємо характеристику х.х. в абсолютних одиницях (табл. 3.1, б).

Відповідно до заводських даних синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80УХЛ4 розраховані лінійна ЕРС ненасиченої машини  $E_{л\infty}$ , характеристика короткого замикання  $I$ , ненасичений  $x_{d\infty}$  та насичений  $x_d$  синхронний індуктивний опір за повздовжньою віссю. Результати розрахунку зведені в табл. 3.2 та на рис. 3.1. Відомі точки характеристики х.х. (табл. 3.1, б) на рис. 3.1 виділені хрестиками.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку синхронного індуктивного опору за повздовжньою віссю

$I_e, A$	$E_{л\infty}, B$	$E_{л}, B$	$I, A$	$x_{d\infty}, Ом$	$x_d, Ом$
0	0	0	0	3,426	3,426
94,842	3213,44	3000	541,516	3,426	3,199
152,052	5151,83	4800	868,166	3,426	3,192
217,491	7369,03	6600	1241,8	3,426	3,069
234,798	7955,43	6900	1340,62	3,426	2,972
256,525	8691,58	7200	1464,67	3,426	2,838
399,984	13552,3	8400	2283,77	3,426	2,124

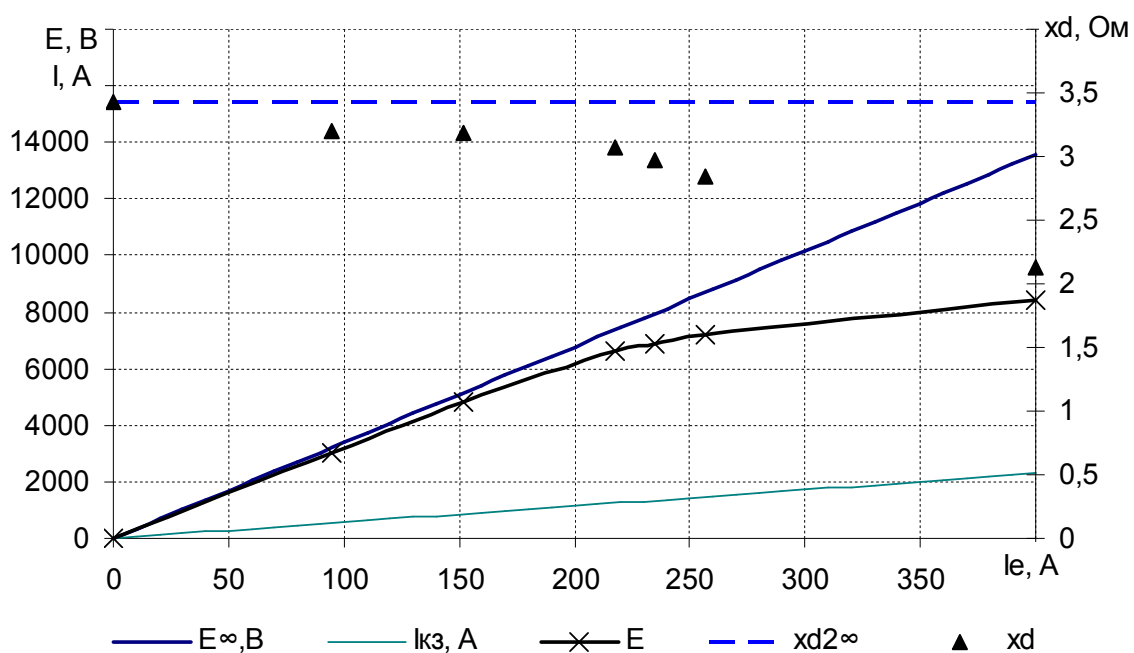


Рисунок 3.1 – Результати розрахунку синхронного індуктивного опору

Насичення всієї магнітної системи синхронного двигуна визначається величиною  $E_\delta$  [43], що наводиться результируючим магнітним потоком  $\Phi_\delta$ , який створюється струмами обмотки статора, збудження та демпферної обмотки. Результируючу ЕРС  $E_\delta$  можна розкласти на складові за поздовжньою  $E_{\delta d}$  та поперечною  $E_{\delta q}$  осями, які наводяться результируючими струмами за поздовжньою та поперечною осями відповідно.

Для практичного використання синхронного індуктивного опору за поздовжньою віссю його можна подати як функцію результируючого струму за поздовжньою віссю. Для його знаходження та використання характеристик холостого ходу та короткого замикання необхідно привести всі струми двигуна за поздовжньою віссю до обмотки збудження. Після приведення отримаємо

$$i_{\delta d} = i_{ff} + i_{df} + i_{kdf}, \quad (3.5)$$

де  $i_{\delta d}$  – результируючий струм за поздовжньою віссю, А;

$i_{ff}$  – струм обмотки збудження, А;

$i_{df}$  – струм статора за поздовжньою віссю приведений до обмотки збудження, А;

$i_{kdf}$  – струм демпферної обмотки приведений до обмотки збудження, А.

Розглянемо приведення струму обмотки якоря за поздовжньою віссю до обмотки збудження. Приведення здійснюється на підставі рівності основної гармоніки поля, що створює н.с. якоря, та еквівалентної н.с. збудження [43]. Тоді для поздовжнього струму якоря  $i_{ad}$  отримаємо

$$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d}} \frac{\omega_1 k_{obl}}{p} i_d k_{ad} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d}} \frac{\omega_f}{2p} i_{df} k_f, \quad (3.6)$$

де  $k_\delta$  – коефіцієнт повітряного проміжку;

$k_{\mu d}$  – коефіцієнт насичення магнітного кола за поздовжньою віссю;

$\delta$  – повітряний проміжок, м;

$\omega_1$  – кількість витків обмотки статора;

$k_{об1}$  – обмоточний коефіцієнт статора;

$p$  – кількість пар полюсів синхронного двигуна;

$k_{ad}$  – коефіцієнт форми поля реакції якоря за поздовжньою віссю;

$\omega_f$  – кількість витків обмотки збудження;

$k_f$  – коефіцієнт форми кривої поля збудження.

Приведений до обмотки збудження поздовжній струм якоря

$$i_{df} = k_{id}i_d, \text{ A}, \quad (3.7)$$

де  $k_{id} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega_1 k_{об1}}{\omega_f} \frac{k_{ad}}{k_f}$  – коефіцієнт приведення поздовжнього струму якоря

до обмотки збудження.

При моделюванні синхронного двигуна розраховуються приведені до обмотки статора струми збудження та демпферної обмотки, тому необхідно знайти коефіцієнти приведення цих струмів для зворотного перетворення, а потім для струму демпферної обмотки коефіцієнт приведення до обмотки збудження.

Приведений до обмотки статора струм збудження складає симетричну трифазну систему струмів, що створює магнітний потік за поздовжньою віссю. У симетричному усталеному режимі  $i_f$  відповідає амплітуді «нерухомого змінного струму» трифазної обмотки [43]. Виходячи з рівності полів основної гармоніки, що створюється реальним струмом збудження  $i_{ff}$  та приведеним  $i_f$  запишемо

$$\frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \frac{\omega_f}{2p} i_{ff} k_f = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \frac{\omega_1 k_{об1}}{p} \frac{i_f}{\sqrt{2}} k_{ad}. \quad (3.8)$$

Приведений до обмотки статора струм збудження:



$$i_f = \frac{i_{ff}}{k_{if}}, \text{ A,} \quad (3.9)$$

де  $k_{if} = \frac{6}{\pi} \frac{\omega_1 k_{об1}}{\omega_f} \frac{k_{ad}}{k_f}$  – коефіцієнт приведення струму збудження.

Отримуємо, що дійсний струм обмотки збудження:

$$i_{ff} = k_{if} i_f, \text{ A.} \quad (3.10)$$

Розглянемо приведення струму демпферної обмотки до обмотки збудження. Для початку визначимо коефіцієнт приведення даного струму до обмотки статора для знаходження дійсного значення струму. На основі рівності полів основної гармоніки, що створюються дійсним струмом  $i_{kd}$  та приведеним до обмотки статора  $i_{kds}$ , запишемо [44]

$$\frac{3}{\pi} \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \frac{\omega_1 k_{об1}}{p} i_{kds} k_{ad} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \frac{1}{2\pi} n_n (1 - k_n) i_{kd} k_D, \quad (3.11)$$

де  $n_n$  – число стрижнів на одному полюсі;

$k_n$  – груповий коефіцієнт клітки;

$k_D$  – коефіцієнт форми кривої поля демпферної обмотки.

Отримуємо приведений до обмотки статора струм:

$$i_{kds} = k_{ikds} i_{kd}, \text{ A,} \quad (3.12)$$

де  $k_{ikds} = \frac{n_n p (1 - k_n)}{6 \omega_1 k_{об1}} \frac{k_D}{k_{ad}}$  – коефіцієнт приведення струму демпферної обмотки

до обмотки статора.

Запишемо умову рівності полів основної гармоніки, що створюються струмом демпферної обмотки  $i_{kd}$  та приведенного до обмотки збудження  $i_{kdf}$

$$\frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d}} \frac{\omega_f}{\delta} i_{kdf} k_f = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d}} \frac{1}{\delta} n_n (1 - k_n) i_{kd} k_D. \quad (3.13)$$

Звідки отримаємо

$$i_{kdf} = k_{ikdf} i_{kd}, \text{ A}, \quad (3.14)$$

де  $k_{ikdf} = \frac{n_n p (1 - k_n) k_D}{\pi \omega_f k_f}$  – коефіцієнт приведення струму демпферної обмотки

до обмотки збудження.

Перепишемо вираз (3.14) з урахуванням (3.12):

$$i_{kdf} = \frac{k_{ad}}{k_D} \frac{6 \omega_1 k_{об1}}{n_n p (1 - k_n)} \frac{n_n p (1 - k_n) k_D}{\pi \omega_f k_f} i_{kds} = \frac{6 \omega_1 k_{об1}}{\pi \omega_f} \frac{k_{ad}}{k_f} i_{kds} = k_{if} \cdot i_{kds}, \text{ A}. \quad (3.15)$$

Видно, що коефіцієнт приведення еквівалентного струму демпферної обмотки, що протікає по обмотці статора, до обмотки збудження дорівнює коефіцієнту приведення струму збудження до обмотки статора.

В результаті отримуємо

$$i_{\delta d} = k_{if} \cdot i_f + k_{id} \cdot i_d + k_{if} \cdot i_{kds} = k_{if} \cdot i_f + \sqrt{2} \cdot k_{if} \cdot i_d + k_{if} \cdot i_{kds}, \text{ A}, \quad (3.16)$$

$$\text{оскільки } k_{id} = \sqrt{2} \cdot \frac{6}{\pi} \frac{\omega_1 k_{об1}}{\omega_f} \frac{k_{ad}}{k_f} = \sqrt{2} \cdot k_{if}.$$

З іншого боку, коефіцієнт приведення струму збудження до обмотки статора  $k_{if}$  можна визначити, знаючи коефіцієнт приведення опору обмотки збудження до обмотки статора  $k_{rf}$ , наступним чином

$$k_{if} = \sqrt{\frac{3}{2}} k_{rf}, \quad (3.17)$$

де  $k_{rf}$  визначається як

$$k_{rf} = \frac{R_f}{R_e}, \quad (3.18)$$

де  $R_f$  – приведений до статора опір обмотки збудження;

$R_e$  – неприведений опір обмотки збудження.

Із побудовань на рис. 3.2 видно, що залежність  $x_d$  від результуючого струму за поздовжньою віссю має досить складний характер. Її можна розділити на декілька ділянок, які можуть мати лінійну чи нелінійну залежність, та, враховуючи монотонність кривої  $x_d$  від струму, ці ділянки слід поєднати так, щоб результуюча характеристика не мала переламів. З огляду на це першу ділянку представимо параболічною функцією, яка проходить через ненасичене значення синхронного індуктивного опору  $x_{d\infty} = 3,462$  Ом, тобто у вигляді рівняння вигляду

$$x_d = 15 \cdot 10^{-6} \cdot I_{ad}^2 - 3,825 \cdot 10^{-3} \cdot I_{ad} + 3,462. \quad (3.19)$$

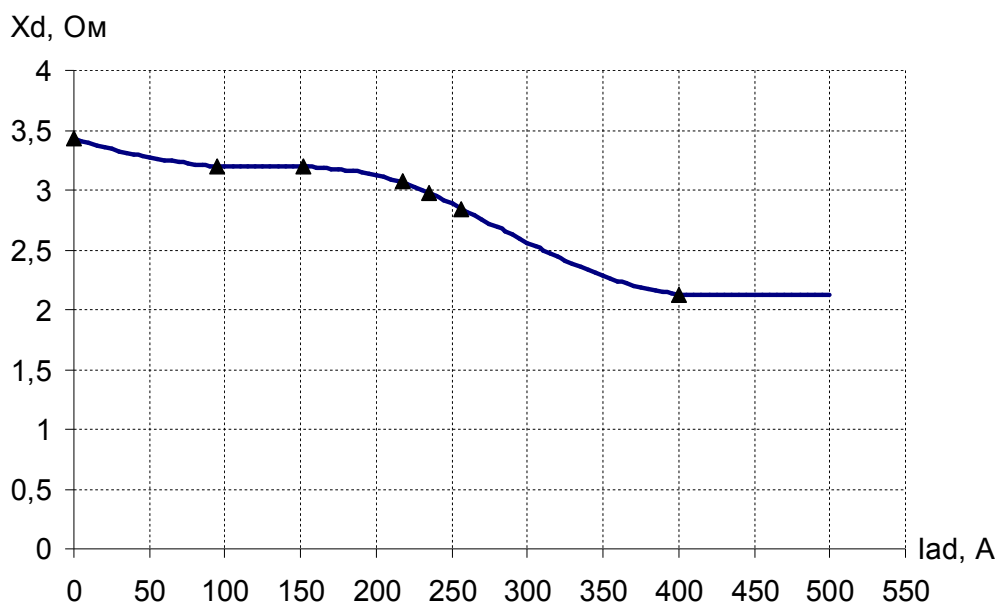


Рисунок 3.2 – До апроксимації розрахованих значень синхронного індуктивного опору з врахуванням насичення

Залежність другої ділянки представимо лінійною функцією

$$x_d = -0,0001 \cdot I_{ad} + 3,2092. \quad (3.20)$$

Третю ділянку опишемо кубічною залежністю

$$x_d = -12,86 \cdot 10^{-8} \cdot I_{ad}^3 + 44,1131 \cdot 10^{-6} I_{ad}^2 - 4,998 \cdot 10^{-3} I_{ad} + 3,38523. \quad (3.21)$$

Четверту ділянку представимо

$$x_d = 11,4 \cdot 10^{-8} I_{ad}^3 - 94,511 \cdot 10^{-6} I_{ad}^2 + 196,5646 \cdot 10^{-4} I_{ad} + 2,092068. \quad (3.22)$$

На кінцевій ділянці індуктивний опір  $x_d$  має сталий характер, оскільки за великих струмів характеристика х.х. має лінійний характер

$$x_d = 2,1203. \quad (3.23)$$

Таким чином, результуюча функція синхронного індуктивного опору за поздовжньою віссю для вибраного, в якості прикладу, синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80УХЛ4 описується системою рівнянь

$$x_d = \begin{cases} 15 \cdot 10^{-6} \cdot I_{ad}^2 - 3,825 \cdot 10^{-3} \cdot I_{ad} + 3,462, & \text{якщо } 0 \leq I_{ad} \leq 94,842; \\ -0,0001 \cdot I_{ad} + 3,2092, & \text{якщо } 94,842 < I_{ad} \leq 152,052; \\ -12,86 \cdot 10^{-8} \cdot I_{ad}^3 + 44,1131 \cdot 10^{-6} I_{ad}^2 - 4,998 \cdot 10^{-3} I_{ad} + 3,38523, & \text{якщо } 152,052 < I_{ad} \leq 256,525; \\ 11,4 \cdot 10^{-8} I_{ad}^3 - 94,511 \cdot 10^{-6} I_{ad}^2 + 196,5646 \cdot 10^{-4} I_{ad} + 2,092068, & \text{якщо } 256,525 < I_{ad} \leq 415; \\ 2,1203, & \text{якщо } I_{ad} > 415. \end{cases} \quad (3.24)$$

На рис. 3.2 маркерами показані розраховані значення синхронного індуктивного опору  $x_d$ , що наведені в табл. 3.2, а суцільною лінією – залежність відповідно до функції (3.24).

За рахунок значного повітряного зазору між полюсами в явнополюсній машині вплив насичення магнітної системи на синхронний індуктивний опір за поперечною віссю  $x_q$  буде меншим ніж за повздовжньою. Слід звернути увагу на те, що методи визначення  $x_q$ , які вказані в [40] є суто експериментальним, а необхідні дані для розрахунку в клієнтському формулярі не вказуються. Тому, з огляду на невеликий вплив насичення та відсутність необхідних даних для уточнюючого розрахунку можливо приймати синхронний індуктивний опір за поперечною віссю  $x_q$  постійним [45].

### **3.1.2 Вплив опору кола збудження на форму пускових характеристик СД з програмно-керованим збудником**

Відомо, що величина активного опору кола обмотки збудження впливає на електромагнітний момент синхронного двигуна під час пуску. Дослідимо цей вплив на удосконаленій статичній моделі синхронного двигуна. В ній враховано вплив реактора, насичення магнітних кіл, активного опору обмотки статора, нагрівання обмоток двигуна під час пуску, а також останні зміни в розрахункових даних двигунів внаслідок використання нових матеріалів, змін в конструкції і вибору режимів використання.

Вимоги до пускового моменту синхронного двигуна визначаються на основі аналізу форми механічної характеристики конкретного виробничого механізму, в тому числі з урахуванням динаміки процесу пуску. При цьому враховуються вимоги до вхідного моменту й рівень зниження напруги живлення двигуна відносно номінального [46]. Для виключення провалу пускової механічної характеристики при ковзанні  $s=0,5$  величину розрядного опору в колі збудження зазвичай вибирають 5...10 кратною відносно власного активного опору обмотки збудження. Як приклад, на рис. 3.3 наведена розрахункова форма механічної пускової характеристики серійного двигуна СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4 з новими параметрами номінальною потужністю 4 МВт, розрядним опором 3,2 Ом і номінальній напрузі живлення (крива 1).

При врахуванні зниження напруги двигуна за рахунок реактора під час пуску форма пускової характеристики суттєво погіршується (крива 2 на рис. 3.3) – кратності пускового й вхідного моментів знижуються, що для важких умов пуску з номінальним або більшим навантаженням є неприйнятним. Спільне використання відомих методів програмного керування напругою збудника і посилення пускової обмотки вирішують проблему збереження кратності пускового моменту при зниженні напруги живлення. Отримана в такий спосіб розрахункова форма характеристики представлена кривою 3 на рис. 3.3. Видно, що за рахунок застосування програмного керування збудником (живлення обмотки збудження від джерела змінної напруги частоти ковзання з початковою фазою  $-\pi/2$ ) [47] і підсиленні (збільшення активного опору) на 15% пускової обмотки [48] в умовах зниження рівня напруги двигуна дозволило отримати паспортну кратність пускового моменту 1,197.

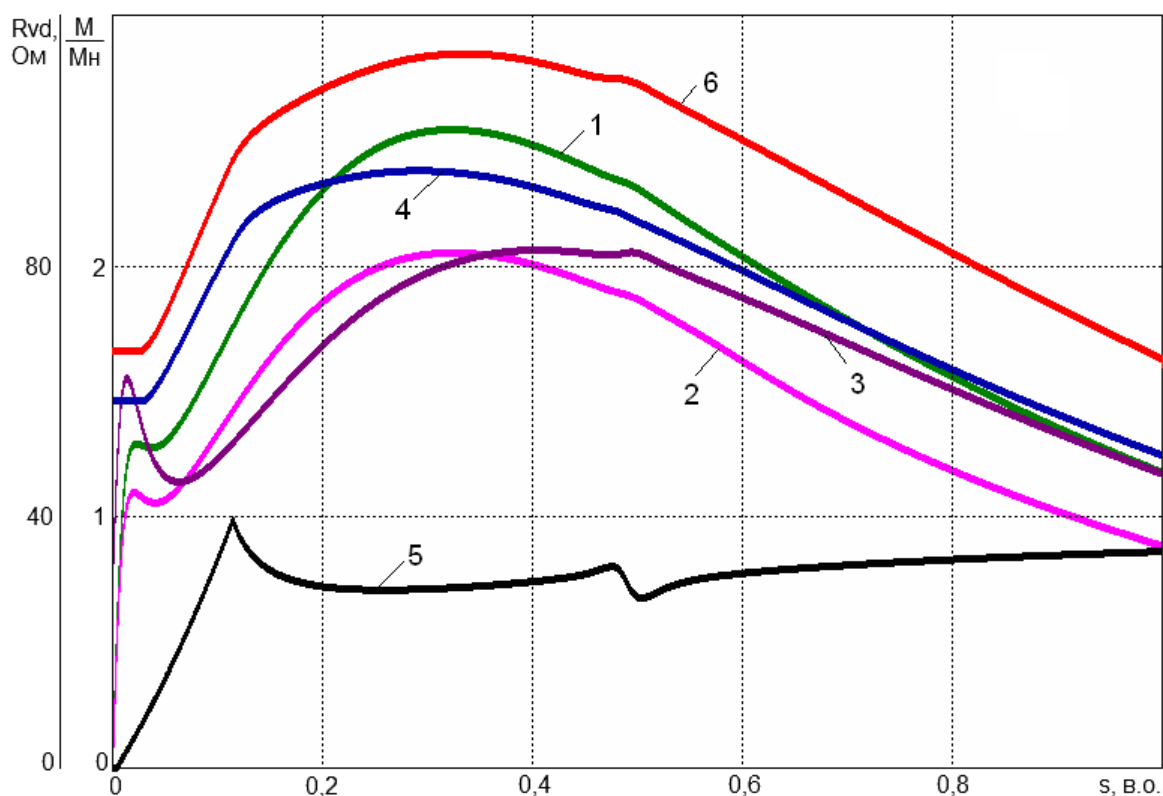


Рисунок 3.3 – Розрахункова форма пускових механічних характеристик синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4

При цьому використовується реверсивний тиристорний збудник з традиційним коефіцієнтом форсування 1,75. У цьому випадку двигун виконає плавний розгін

до синхронної швидкості за менший час, оскільки посилення пускової обмотки призводить до зростання критичного ковзання характеристики, а, отже забезпечує зростання середньої складової електромагнітного моменту в області великих ковзань. Проте використання програмного керування напругою збудника збільшує середню складову моменту в області малих ковзань, що забезпечує надійну синхронізацію двигуна з меншими динамічними навантаженнями.

**Оптимізація розрядного опору.** З літературних джерел [49] відомо про вплив розрядного опору на форму пускових механічних характеристик синхронних двигунів, зокрема той факт, що його збільшення призводить до зростання кратності пускового моменту. Причому, невелике збільшення опору кола збудження (до  $6 R_f$ ) викликає зростання вхідного моменту, а подальший приріст (після  $10 R_f$ ) призводить до зниження вхідного моменту [50]. Тому вперше запропоноване на початковій ділянці пуску вибирати максимально припустиму (виходячи з умови не перевищення за ТУ рівня перенапруг на затискачах обмотки збудження СД) кратність розрядного опору, а на кінцевій ділянці в області малих ковзань – необхідну з міркувань забезпечення максимуму середнього асинхронного моменту. Тобто, бажано, щоб розрядний опір змінювався у функції ковзання. Для підтвердження правильності цієї гіпотези на рис. 3.3 наведена крива 4 асинхронного моменту при одночасному використанні підсиленої пускової обмотки, реверсивного збудника й регульованого оптимальним чином розрядного опору. Видно, що навіть при зниженій напрузі це значно поліпшило форму механічної характеристики у всьому діапазоні ковзань (від  $s=0$  до  $s=1$ ). При цьому напруга на обмотці збудження обмежена рівнем 3500 В. Регульований розрядний опір у цьому випадку показаний на (рис.3.3, крива 5). Для такого керування необхідна максимальна величина розрядного опору 40 Ом. Вочевидь, при номінальній напрузі живлення двигуна механічна характеристика двигуна з посиленою пусковою обмоткою, реверсивним збудником і регульованим розрядним опором (крива 6 на рис. 3.3) якісно краще, ніж характеристика серійного двигуна, тому для забезпечення надійного пуску в важких умовах і більш повного використання двигуна слід застосовувати зазначені засоби.

### 3.1.3 Вплив активних опорів обмоток і кола збудження на рівень навантажень мережі живлення

Характерною особливістю пуску потужних синхронних двигунів є значні пускові струми, що протікають досить тривалий час спричиняючи негативний вплив на характеристики мережі живлення і роботу обладнання. Це особливо актуально в умовах мереж невеликої потужності. З метою зменшення пускових струмів під час пуску потужних двигунів на гірничо-збагачувальних підприємствах використовують реакторний пуск. Проте це призводить до зменшення пускового моменту, а отже при застосуванні традиційного запуску вимагає встановлення двигунів зі значним запасом потужності.

Розглянемо на удосконаленій моделі вплив використання підсиленої пускової обмотки, програмного керування збудником і оптимізації розрядного опору на рівень навантажень мережі живлення (рис. 3.4). Зрозуміло, що в динаміці після завершення процесу синхронізації струм статора буде дорівнювати номінальному.

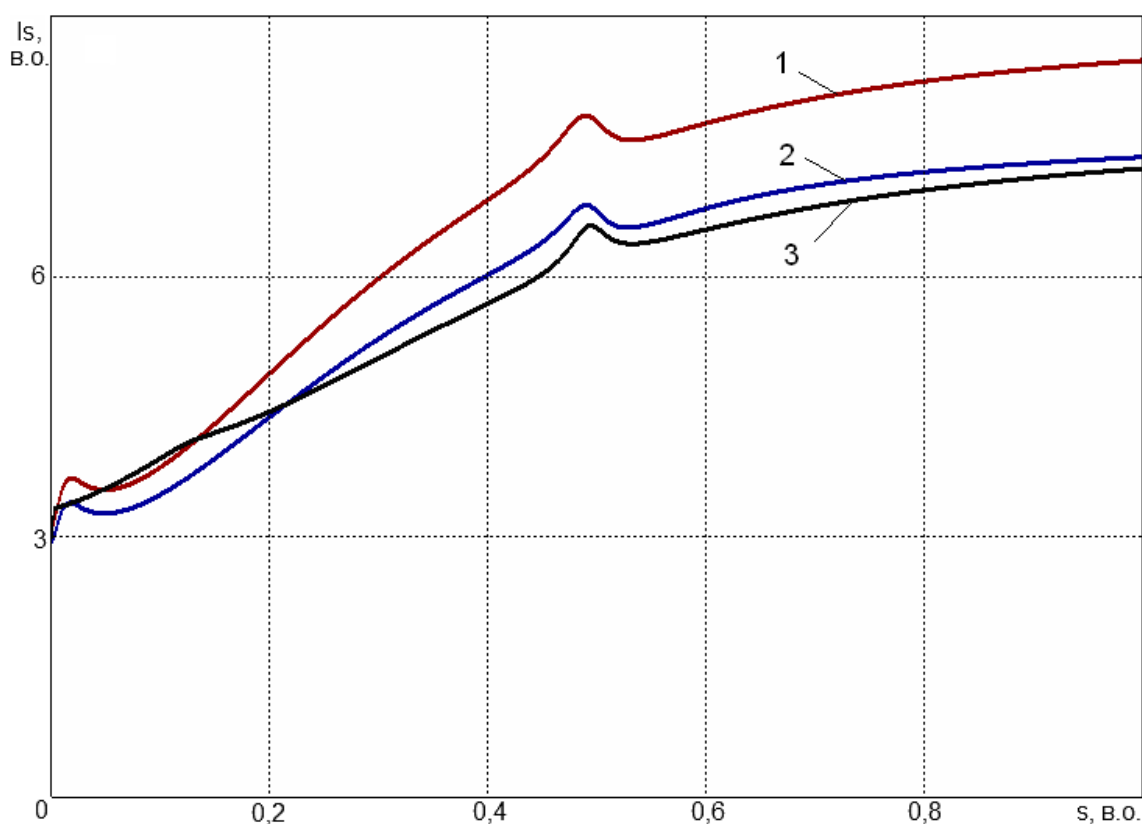


Рисунок 3.4 – Розрахункова форма пускових струмів синхронного двигуна СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4



Крива 1 рис. 3.4 показує пусковий струм синхронного двигуна при пуску без зниження напруги мережі живлення. Як бачимо, максимальне амплітудне значення пускового струму в цьому випадку є 8,5-кратним до амплітуди номінального струму, що для мереж гірничо-збагачувальних комбінатів часто буває неприпустимим.

Застосування пуску СД за допомогою реактора (рис. 3.4, крива 2) обумовлює зменшення максимального амплітудного значення пускового струму до кратності 7,4 амплітуди номінального струму. Також, пусковий струм по відношенню до прямого пуску знизився на всій ділянці розгону СД. Однак, внаслідок використання реактора знижується середня складова електромагнітного моменту, внаслідок чого затягується процес пуску двигуна і пускові струми впливають на мережу впродовж більш тривалого часу.

Використання запропонованих в роботі методів покращення пускових властивостей СД (програмне керування збудником, оптимізація величини розрядного опору в функції ковзання, підсилення пускової обмотки) призводить до зменшення максимальної величини амплітуди пускового струму до рівня 7,25 амплітуди номінального струму. І хоча при малих ковзаннях пусковий струм збільшується по відношенню до реакторного пуску, все ж такий пуск є найбільш прийнятний, оскільки окрім зниження максимальної величини пускового струму також значно збільшується середня складова електромагнітного моменту, що приведе до істотного зменшення часу розганяння приводу і вплив пускового струму на мережу буде нетривалим.

### **3.1.4 Метод визначення раціональних параметрів ЕМС з СД та програмно-керованим збудником**

Для визначення раціональних параметрів розрядного опору під час пуску СД і зменшення обчислювальних потужностей пристрою регулювання розрядного опору запропоновано апроксимувати залежність необхідного розрядного опору, яка визначена для збільшення середньої складової електромагнітного моменту і забезпечення надійної синхронізації двигуна, при виконанні умови не перевищення допустимої напруги збудника. Ця апроксимована залежність розраховує оптимальне значення розрядного опору в функції ковзання.

На рис. 3.5 наведено бажану залежність змінювання розрядного опору (суцільна лінія) та апроксимована залежність (крива з маркерами). Як бачимо, апроксимована крива достатньо точно описує необхідну залежність.

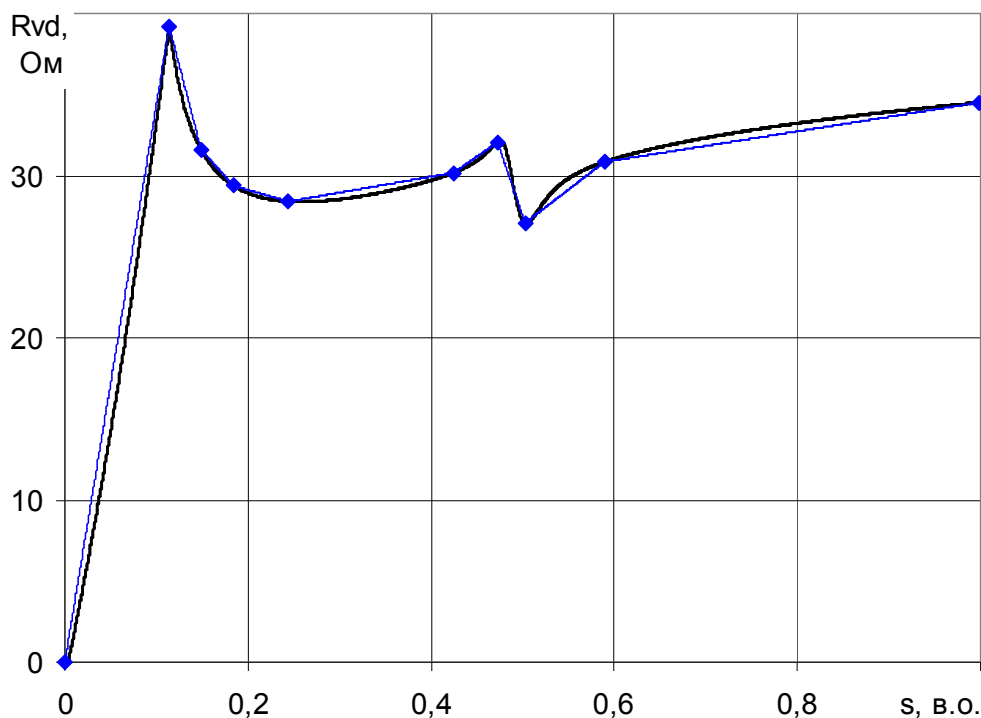


Рисунок 3.5 – Характер змінювання розрядного опору в функції ковзання

Оскільки залежність розрядного опору в функції ковзання досить нелінійна, тому доцільно з метою точнішої апроксимації розділити її на декілька ділянок, де крива має монотонний характер. Зокрема маємо наступні ділянки:

- 1) якщо  $s > 0,589$ , то  $Rvd = 8,9636 \cdot s + 25,562$ ;
- 2) якщо  $0,5025 < s \leq 0,589$ , то  $Rvd = 43,414 \cdot s + 5,2702$ ;
- 3) якщо  $0,4725 < s \leq 0,5025$ , то  $Rvd = -165,58 \cdot s + 110,29$ ;
- 4) якщо  $0,424 < s \leq 0,4725$ , то  $Rvd = 38,726 \cdot s + 13,755$ ;
- 5) якщо  $0,244 < s \leq 0,424$ , то  $Rvd = 9,8114 \cdot s + 26,015$ ;
- 6) якщо  $0,184 < s \leq 0,244$ , то  $Rvd = -16,104 \cdot s + 32,338$ ;
- 7) якщо  $0,149 < s \leq 0,184$ , то  $Rvd = -62,634 \cdot s + 40,9$ ;
- 8) якщо  $0,114 < s \leq 0,149$ , то  $Rvd = -217,98 \cdot s + 64,047$ ;
- 9) якщо  $s \leq 0,114$ , то  $Rvd = 343,83 \cdot s$ .

Отже для конкретного приводу, що розглядається, для збільшення середньої складової електромагнітного моменту під час пуску контролер керування розрядним опором повинен розраховувати завдання саме по приведеним вище рівнянням. Наведена система рівнянь описує необхідну залежність лінійними ділянками, а тому не вимагатиме потужного контролера для обчислень.

### **3.2 Розробка моделі і алгоритму дослідження динамічних властивостей ЕМС з СД та програмно-керованим збудником**

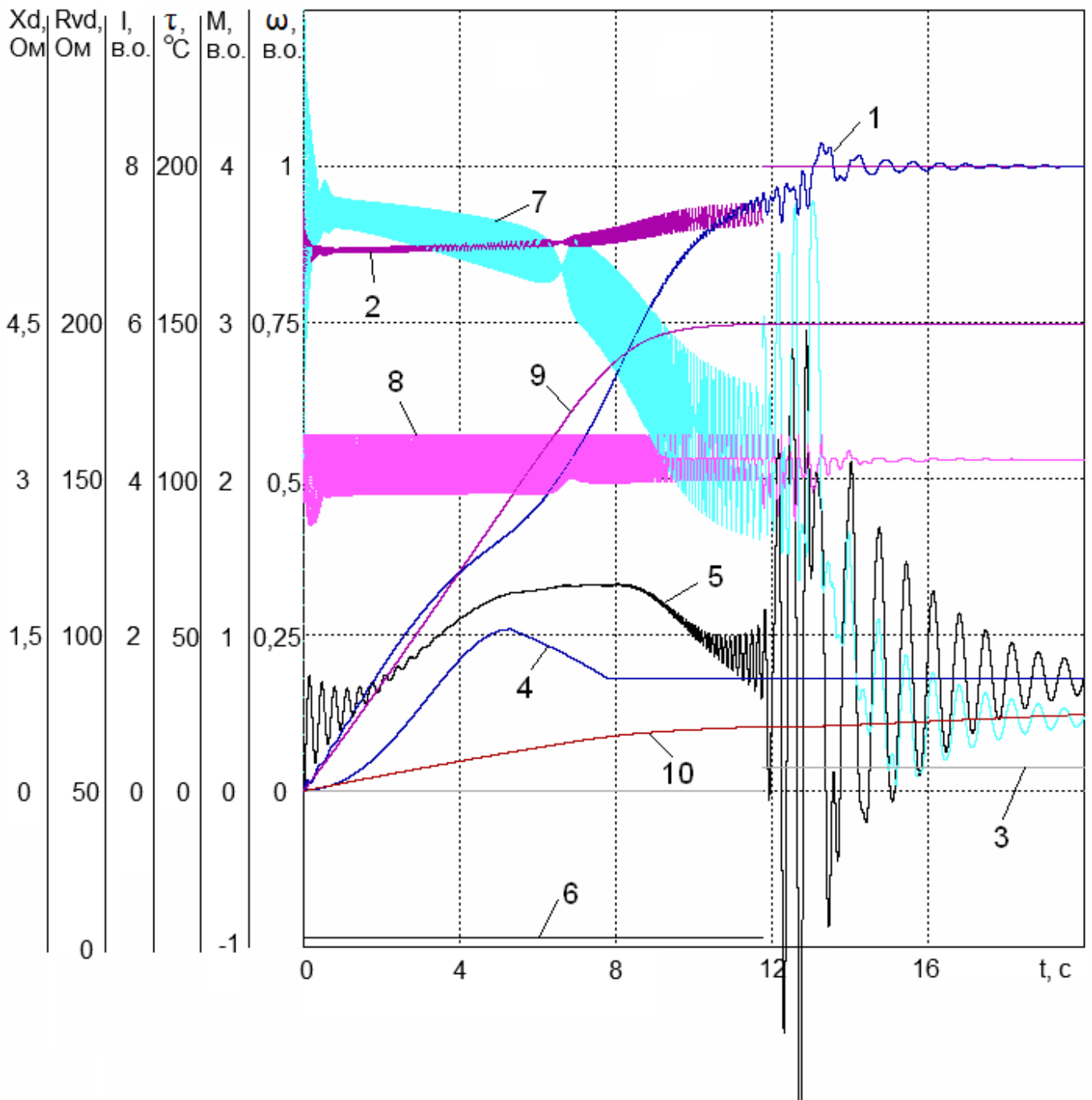
Для досліджуваної електромеханічної системи синхронний двигун – барабанний млин характерним є те, що через труднощі визначення корисної потужності млинів і неоднакові умови їх використання при подрібнюванні різних матеріалів, проблем надійності пуску двигунів в умовах слабких мереж і при використанні реактора коефіцієнт запасу встановленої потужності привода нерідко вибирають 1,15...1,3 [47]. В результаті обраний двигун працює з ККД нижче за номінальний, а вартість привода в цілому зростає. Інша важлива причина недовикористання двигуна по потужності є технологічною. Це труднощі успішного запуску після перерви в роботі млина, оскільки при цьому його завантаження „злежується” та фактично становить єдине ціле з барабаном. До моменту обвалення завантаження барабан повертається на кут близько  $90^\circ$ , що вимагає підвищеного моменту двигуна при пуску. За несприятливих умов успішний запуск млина взагалі стає проблематичним. А тому на виробництві цей режим не допускають і перед зупинкою млина його частково розвантажують за рахунок роботи млина без подачі живлення протягом близько півгодини. Це призводить до відповідних економічних втрат через зниження продуктивності млина та КПД привода. Ці ж втрати і під час виводу млина на усталений режим після перерви в роботі. До проблем млинових приводів слід віднести і труднощі синхронізації, високі коефіцієнти динамічності електромагнітного й пружного моментів привода, тривалий пуск і обмежену кількість пусків підряд тощо. Хоча потужні синхронні двигуни мають досить великі пускові і вхідні моменти, проте на виробництві виникають ситуації, коли привод запускають з повним навантаженням, а двигун не втягується в синхронізм.

При дослідженні динамічних властивостей електромеханічних систем за допомогою моделювання, для отримання достовірних результатів роботи, слід якомога точніше врахувати всі процеси, які відбуваються в цих системах. Так, для досліджуваної ЕМС синхронний двигун – барабанний млин розроблено модель динаміки пуску з урахуванням змінювання активних та реактивних опорів двигуна за рахунок нагрівання, насичення, впливу реактора. Враховано вплив активного опору обмотки статора, параметри нових синхронних двигунів. Також враховані особливості форми механічної характеристики млина зі злежалим завантаженням та коефіцієнт запасу встановленої потужності привода. Розроблена модель забезпечує можливість регулювання розрядного опору в процесі розгону СД за законом для збільшення середньої складової електромагнітного моменту без перевищення напругою збудження допустимого рівня, програмне керування збудником з урахуванням в алгоритмі керування нестабільності параметрів привода, можливість використання пускового реактора та підсилення демпферної обмотки. Така модель максимально наближена до реальної досліджуваної системи.

Для отримання порівняльних оцінок на першому етапі досліджено реакторний пуск млина ММС 90х30 зі злежалим внутрішньомлиновим завантаженням з коефіцієнтом встановленої потужності привода 1,174 (рис. 3.6). Видно, що такий пуск достатньо затяжний і становить 13 с., з коефіцієнтом динамічності пружного моменту 3,45. Кратність пускового струму 7,4.

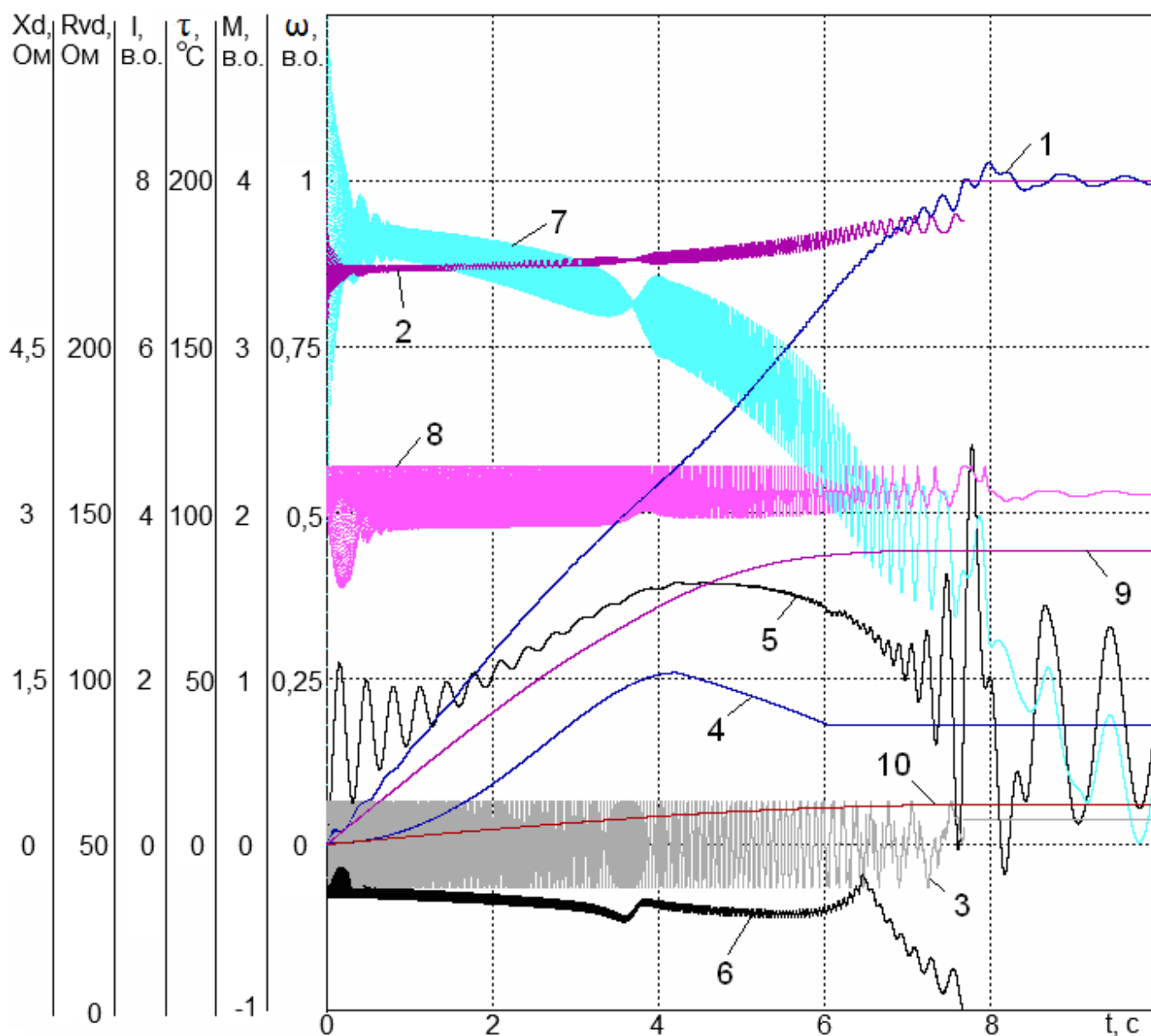
Для оцінки процесів нагрівання обмоток двигуна, насичення його магнітних кіл та впливу дії реактора на рис. 3.6 також приведені відповідні залежності. Видно, що в процесі пуску реактивний опір  $x_d$  зменшився з 3,42607 до 3,183, тобто на 7,1 %. Перегриви обмоток статора та пускової склали 23 та 150 °С відповідно. Наведена залежність 2 ілюструє рівень напруги статора під час пуску. Залежності 4, 6 та 3 ілюструють статичний момент млина при злежалому завантаженні, опір розрядного реостату і напругу збудника в процесі розганяння.

Досліджена динаміка пуску привода з підвищеним опором демпферної обмотки, програмним керуванням збудника і розрядного опору (рис. 3.7).



- |                                  |                               |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1 – швидкість двигуна;           | 2 – напруга статора;          |
| 3 – напруга збудника;            | 4 – статичний момент;         |
| 5 – пружний момент;              | 6 – розрядний опір;           |
| 7 – струм статора;               | 8 – реактивність $x_d$ ;      |
| 9 – перегрів демпферної обмотки; | 10 – перегрів обмотки статора |

Рисунок 3.6 – Реакторний пуск двигуна СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4 за нерегульованим розрядним опором



- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 – швидкість двигуна;           | 2 – напруга статора;             |
| 3 – напруга збудника;            | 4 – статичний момент;            |
| 5 – пружний момент;              | 6 – регульований розрядний опір; |
| 7 – струм статора;               | 8 – реактивність $x_d$ ;         |
| 9 – перегрів демпферної обмотки; | 10 – перегрів обмотки статора    |

Рисунок 3.7 – Реакторний пуск двигуна СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4 з використанням підсиленої пускової обмотки, програмного керування збудником і розрядним опором

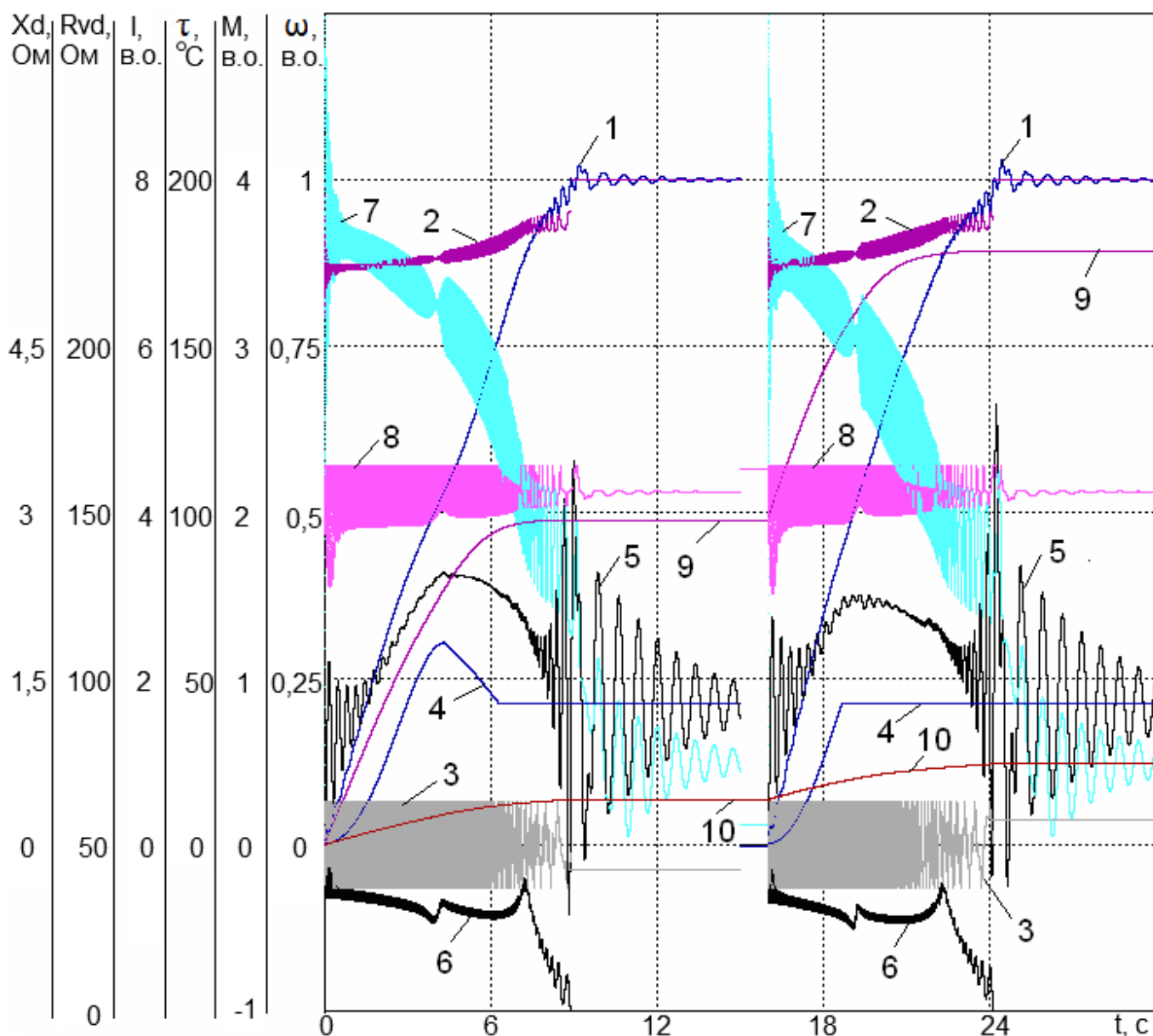
На рис. 3.7 видно, що завдяки цьому час пуску зменшився на 40% і склав 7,7 с. Коефіцієнт динамічності, за рахунок плавного входження в синхронізм, знизився на 18,5 % і став рівним 2,81. Кратність пускового струму стала 7,25. У підсумку, запропоновані удосконалення значно підвищують надійність пуску, знижують динамічні перевантаження зубчатих елементів приводу, що створює передумови для використання приводу без запасу встановленої потужності при важких умовах пуску і підвищують економічність приводу.

### **3.3 Дослідження динамічних властивостей ЕМС з програмно-керованим збудником та раціональними параметрами пускової обмотки і кола збудження**

Як приклад ефективності використання нового синхронного приводу з покращеними властивостями досліджено найбільш важкий режим пуску при злежалому завантаженні барабана після тривалої перерви в роботі млина. Прийнято, що в установленому режимі момент навантаження номінальний (привод без запасу потужності). Надійна робота приводу в такому режимі дозволить підвищити його економічність, збільшити ККД (за рахунок більш повного використання двигунів), знизити пускові струми живильної мережі тощо.

Слід зазначити, що за таких важких умов традиційний привод не забезпечує синхронізацію навіть при першому пуску. У той же час покращений привод з використанням програмного керування збудником, регулюванням розрядного опору та посиленням пускової обмотки СД дозволяє успішно забезпечити не тільки перший пуск, але й другий пуск (рис. 3.8).

Видно, що навіть для таких важких умов двигун успішно виконує два пуски підряд. Час першого розгону склав усього 8,9 с., а другого – 9,2 с. Зростання часу відбувається через нагрівання обмоток двигуна. Коефіцієнт динамічності пружного моменту для першого пуску 2,7, а другого – 3,1. Можна зробити виважений висновок, що комплексне використання посиленої пускової обмотки, регулювання розрядного опору в колі збудження та програмно керованого реверсивного збудника



- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 – швидкість двигуна;           | 2 – напруга статора;             |
| 3 – напруга збудника;            | 4 – статичний момент;            |
| 5 – пружний момент;              | 6 – регульований розрядний опір; |
| 7 – струм статора;               | 8 – реактивність $x_d$ ;         |
| 9 – перегрів демпферної обмотки; | 10 – перегрів обмотки статора    |

Рисунок 3.8 – Пуск СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4 без запасу встановленої потужності з підсиленою пусковою обмоткою, програмним керуванням збудником і розрядним опором



надійно забезпечує пуск потужних синхронних млинових приводів без запасу встановленої потужності з важкими умовами внаслідок злежалого завантаження барабана і номінальним усталеним навантаженням. При цьому ефект досягнуто без підвищення коефіцієнта форсування напруги реверсивного збудника. Пуск двигуна забезпечується без попереднього «виходжування» та застосування допоміжних засобів.

Економічні переваги – від зниження ціни приводного двигуна через зменшення його потужності й економії електроенергії за рахунок роботи двигуна з номінальним коефіцієнтом корисної дії, виключення непродуктивних режимів «виходжування» і «розгону» млина. Використання запропонованих засобів дозволяє запускати синхронні двигуни з номінальним навантаженням при збереженні теплового режиму обмоток. Запропоновані удосконалення синхронного привода перспективні і для інших механізмів з підвищеним пусковим моментом і моментом інерції.

### **3.4 Розробка рекомендацій щодо створення нового типу синхронного потужного електропривода**

#### **3.4.1 Принцип побудови адаптивного до збурень датчика електромагнітного моменту**

Для надійного та точного керування синхронним приводом необхідно контролювати поточні струми, напруги обмоток, швидкість двигуна, електромагнітний момент та кут навантаження. При чому слід урахувати, що параметри машини під час роботи під впливом нагріву обмоток та насичення магнітопроводів можуть змінюватись, а тому при контролі необхідних динамічних параметрів електромеханічної системи необхідно ввести адаптацію до зазначених змін електромагнітних параметрів двигуна.

Для адаптації привода до зміни параметрів двигуна використовуються алгоритми попередньої та поточної параметричної ідентифікації. Алгоритми поточної ідентифікації використовуються для адаптації спостерігача в процесі роботи. Алгоритми попередньої ідентифікації автоматично визначають параметри двигуна перед за-

пуском електропривода, налаштовуючи систему керування та задаючи початкові наближені значення параметрів для алгоритмів поточної ідентифікації. Розробка і реалізація стійких і достатньо точних процедур попередньої та поточної ідентифікації складає основу великої кількості сучасних досліджень [51].

В основу досліджень покладена система рівнянь Парка-Горєва, можливості контролю фактичних струмів та напруг живлення статора двигуна і швидкості його обертання. Враховано, що електромагнітний момент двигуна для системи координат  $d, q$  визначається як [52]

$$M = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d, \text{ в.о.}$$

Вирази для проекцій потокозчеплення статора у відносних одиницях за поздовжньою  $d$  та поперечною  $q$  осями мають вигляд диференційних рівнянь

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = u_d + \Psi_q \omega - r_a i_d; \quad (3.25)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = u_q - \Psi_d \omega - r_a i_q. \quad (3.26)$$

Проекції узагальнених вектора напруги  $u_d, u_q$  та струму  $i_d, i_q$  можна виразити через їх узагальнені вектори  $\bar{U}_s$  та  $\bar{I}_s$  як проекції на поздовжню  $d$  та поперечну  $q$  осі. Проекції узагальненого вектора струму визначаються його просторовим положенням  $\alpha_i$  та додатним напрямом  $\gamma$  поздовжньої вісі  $d$  (рис. 3.9).

Проекції узагальненого вектора струму за поздовжньою та поперечною осями [53]

$$i_d = I_m \cos(\gamma - \alpha_i);$$

$$i_q = -I_m \sin(\gamma - \alpha_i).$$

Поточна амплітуда узагальненого вектора струму контролюється вимірюванням миттєвих фазних струмів обмотки статора. При визначенні проекцій узагальне-

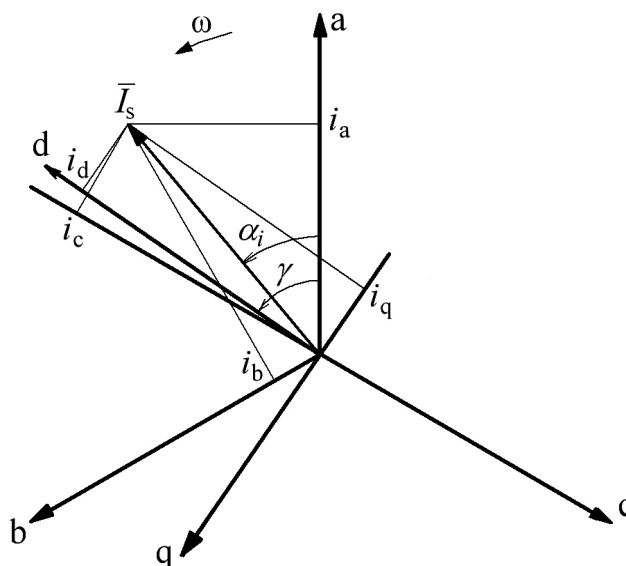


Рисунок 3.9 – Узагальнений вектор струму в осях  $d, q$

ного вектора на нерухомі, жорстко зв'язані зі статором, координатні вісі  $\alpha, \beta$  враховуємо, що вісь  $\alpha$  суміщається з віссю фази  $a$  статора, а вісь  $\beta$  випереджає її на кут  $\pi/2$  як показано на рис. 3.10.

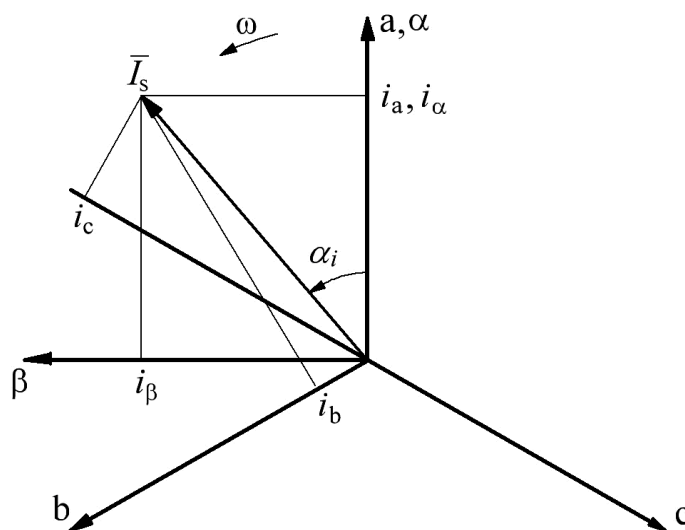


Рисунок 3.10 – Узагальнений вектор струму в осях  $\alpha, \beta$

Співвідношення між миттєвими струмами у фазовій системі координат та осях  $\alpha, \beta$  з урахуванням зменшення проєкцій у 1,5 визначаються як [52]

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3} \left[ i_a - \frac{1}{2} (i_b + i_c) \right];$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_b - i_c).$$

Амплітуда узагальненого вектора струму

$$I_m = \sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2}.$$

Проекції узагальненого вектора напруги визначаються його просторовим положенням  $\alpha_u$  та додатним напрямом  $\gamma$  поздовжньої вісі  $d$  ротора (рис. 3.11):

$$u_d = U_m \cos(\gamma - \alpha_u);$$

$$u_q = -U_m \sin(\gamma - \alpha_u).$$

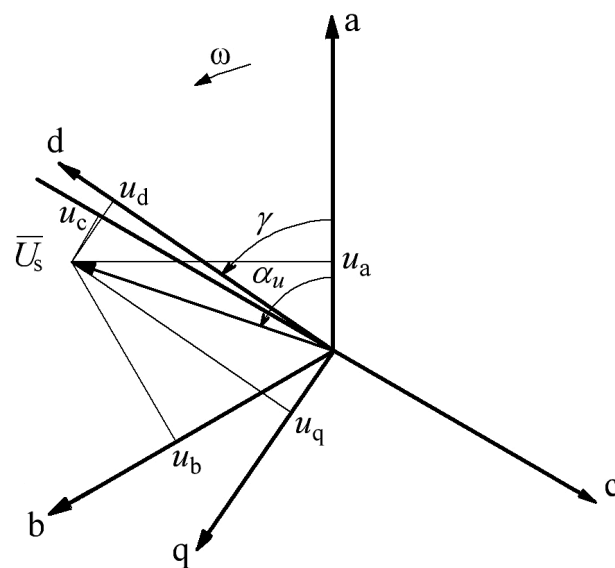


Рисунок 3.11 – Узагальнений вектор напруги в осях  $d, q$

Поточна амплітуда узагальненого вектора напруги контролюється за допомогою вимірювання миттєвих лінійних напруг статора. Проекції миттєвих фазних напруг на вісі  $\alpha, \beta$  визначаються подібно до проекцій струмів згідно побудовань на рис. 3.12.

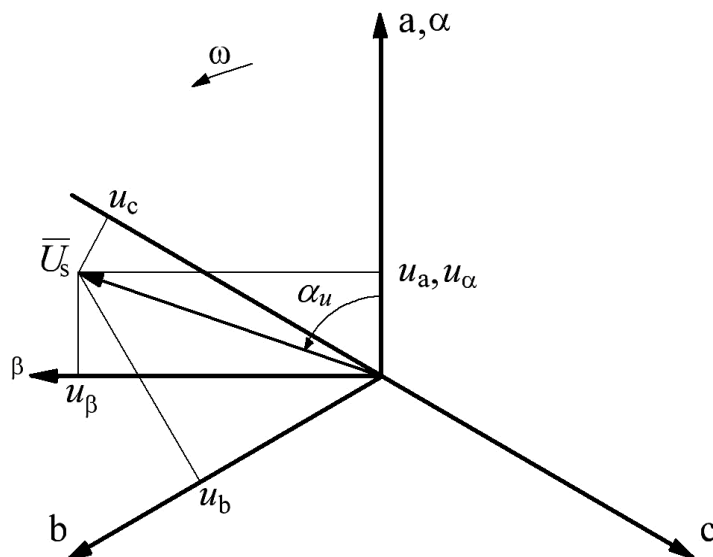


Рисунок 3.12 – Узагальнений вектор напруги в осях  $\alpha, \beta$

Отже, маємо вирази вигляду

$$u_{\alpha} = \frac{2}{3} \left[ u_a - \frac{1}{2} (u_b + u_c) \right];$$

$$u_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_b - u_c).$$

Оскільки миттєві лінійні напруги статора виражаються через фазні як

$$u_{ab} = u_a - u_b;$$

$$u_{bc} = u_b - u_c;$$

$$u_{ca} = u_c - u_a,$$

то

$$u_{\alpha} = \frac{2}{3} \left( \frac{u_{ab} - u_{ca}}{2} \right);$$

$$u_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_{bc}).$$

Амплітуда узагальненого вектора напруги

$$U_m = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}.$$

За проєкціями узагальнених векторів напруги та струму на вісі  $\alpha, \beta$  визначаємо просторове положення цих векторів за виразами

$$\alpha_u = \arctg \frac{u_\beta}{u_\alpha}; \quad (3.27)$$

$$\alpha_i = \arctg \frac{i_\beta}{i_\alpha}.$$

Просторове положення додатного напрямку  $\gamma$  поздовжньої вісі  $d$  ротора визначається швидкістю обертання ротора та його початковим положенням як

$$\gamma = \int \omega \cdot dt + \gamma_0.$$

Для знаходження початкового значення  $\gamma$  можливо скористатися методом подачі до обмотки збудження змінної напруги при нерухомому роторі за розімкненої обмотки статора. Оскільки обмотка збудження однофазна, то при протіканні по ній змінного струму виникає пульсуюче магнітне поле, напрям якого співпадає із віссю  $d$  ротора. Це магнітне поле зумовлює пульсуючу ЕРС в обмотці статора  $E_s$ , яка відстає від магнітного потоку на кут  $\pi/2$  (рис. 3.13 а).

Для знаходження напрямку пульсуючої ЕРС статора  $E_s$  необхідно на затискачах обмотки статора виміряти миттєві лінійні напруги та за виразом (3.27) знайти напрям їх узагальненого вектора, який відповідає напрямку ЕРС  $E_s$ . Слід врахувати, що наведена ЕРС відстає від магнітного потоку обмотки збудження  $\Phi_f$  на кут  $\pi/2$ , а також те, що при від'ємному напрямі струму в обмотці збудження напрям магнітного потоку буде протилежним додатному напрямку поздовжньої вісі  $d$  (рис. 3.13 б).

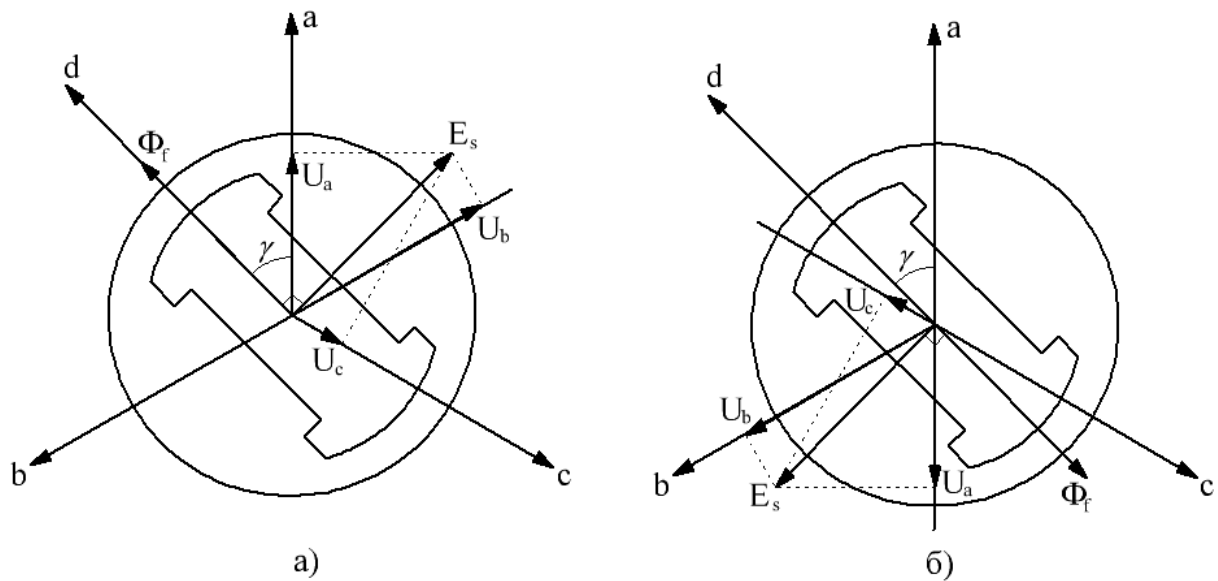


Рисунок 3.13 – Векторна діаграма напруг при додатному (а) напрямі струму збудження та від'ємному (б)

Для визначення додатного напрямку поздовжньої вісі  $d$  слід контролювати струм збудження та корегувати знайдений напрям узагальненого вектора напруги статора згідно напрямку струму збудження. Тому при визначенні початкового просторового положення додатного напрямку поздовжньої  $d$  вісі ротора для додатного струму збудження слід користуватися виразом

$$\gamma_0 = \alpha_u + \frac{\pi}{2},$$

а для від'ємного

$$\gamma_0 = \alpha_u - \frac{\pi}{2}.$$

Поточну швидкість  $\omega$  двигуна можливо контролювати, наприклад, за допомогою імпульсного датчика кутового положення встановленого на валу двигуна. Принцип роботи цифрових датчиків швидкості на базі імпульсних датчиків положення базується на підрахунку кількості вихідних імпульсів за одиницю часу. До недоліків можна віднести дискретний характер вимірювання. Підвищення точності

вимірювання досягається зменшенням кроку растру імпульсного датчика, яке можливе лише до певної межі.

У рівняння (3.25), (3.26) входить активний опір обмотки статора, яка при роботі двигуна нагрівається із відповідним зростанням опору. Для його визначення враховуємо, що сучасні потужні синхронні двигуни оснащені термопарами, які дозволяють контролювати поточну температуру обмотки статора та дозволяють контролювати її опір за виразом

$$r_a = r_{a x} (1 + \alpha \cdot \tau),$$

де  $r_{a x}$  – опір обмотки статора при температурі 15°C;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору (для міді  $\alpha = 0,004, \frac{1}{C^o}$ );

$\tau$  – перевищення температури, °C.

Отже, для визначення поточних потокозчеплень статора, кутового положення ротора та електромагнітного моменту мікропроцесорна система спостерігача, окрім введення миттєвих лінійних напруг та фазних струмів статора, струму збудження та кута повертання імпульсного датчика повинна забезпечити швидке вирішення системи із трьох диференціальних рівнянь та алгебраїчного виразу для електромагнітного моменту наступного вигляду:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = U_m \cos(\gamma - \alpha_u) + \Psi_q \omega - r_a I_m \cos(\gamma - \alpha_i);$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = -U_m \sin(\gamma - \alpha_u) - \Psi_d \omega + r_a I_m \sin(\gamma - \alpha_i);$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega;$$

$$M = -\Psi_d I_m \sin(\gamma - \alpha_i) - \Psi_q I_m \cos(\gamma - \alpha_i).$$

В наведеній системі диференціальних рівнянь, що описують метод спостереження електромагнітного моменту двигуна, відсутні змінні та неконтрольовані па-



раметри двигуна, такі як параметри демпферної обмотки, індуктивні опори обмоток двигуна та активний опір обмотки збудження. Зміна цих параметрів опосередковано враховується виміром напруги та струму обмотки статора. Тому можна стверджувати, що в ході розробки еталонної моделі спостерігача було досягнуто мети адаптованого контролю кутового положення ротора, потокозчеплення статора та електромагнітний момент двигуна за допомогою контролю миттєвих струмів і напруг живлення двигуна. Крім того, у розробленій моделі є можливість контролювати проєкції напруги та струму за поздовжньою та поперечною осями.

Дослідження ефективності роботи адаптованого спостерігача електромагнітного моменту проводиться за допомогою математичного моделювання. Для вирішення системи диференціальних рівнянь у програмі використано метод чисельного інтегрування Рунге-Кутта четвертого порядку. Програмою передбачено дослідження пуску синхронного двигуна, під час якого обмотка збудження замкнена на розрядний опір, подача постійної напруги збудження та вимкнення розрядного опору відбувається при ковзанні  $s = 0,05$ . Для визначення якості спостереження та вимог щодо швидкодії мікропроцесорної системи передбачена можливість моделювання роботи спостерігача для різного періоду обчислень, що відрізняється від кроку моделювання пуску двигуна.

Для перевірки працездатності розробленого спостерігача досліджена динаміка контролю електромагнітного моменту з періодом опитування вхідних параметрів  $T_0 = 0,00005$  с. На графік у спільній системі координат виводяться електромагнітний момент двигуна  $M$  та визначений за допомогою спостерігача  $\hat{M}$ , а також значення похибки  $e$  визначення моменту. Результат приведений на рис. 3.14. Видно, що похибка незначна та коливається навколо нульового значення. Максимальне відхилення складає 0,03 в.о. від базового моменту, тим самим підтверджується правильність розробленого адаптованого до збурень способу визначення електромагнітного моменту. Базовий момент розраховується за виразом

$$M_{\delta} = \frac{P_{\delta}}{\Omega_{\delta}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H}{\frac{\omega_{\delta}}{p_N}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H \cdot p_N}{2 \cdot \pi \cdot f},$$

де  $P_{\sigma}$  – базова потужність синхронного двигуна;

$\Omega_{\sigma}$  – базова кутова частота обертання;

$U_n$  – номінальна фазна напруга статора синхронного двигуна;

$I_n$  – номінальний фазний струм статора;

$\omega_{\sigma}$  – базова частота обертання;

$p_N$  – кількість пар полюсів синхронного двигуна;

$f$  – частота напруги живлення.

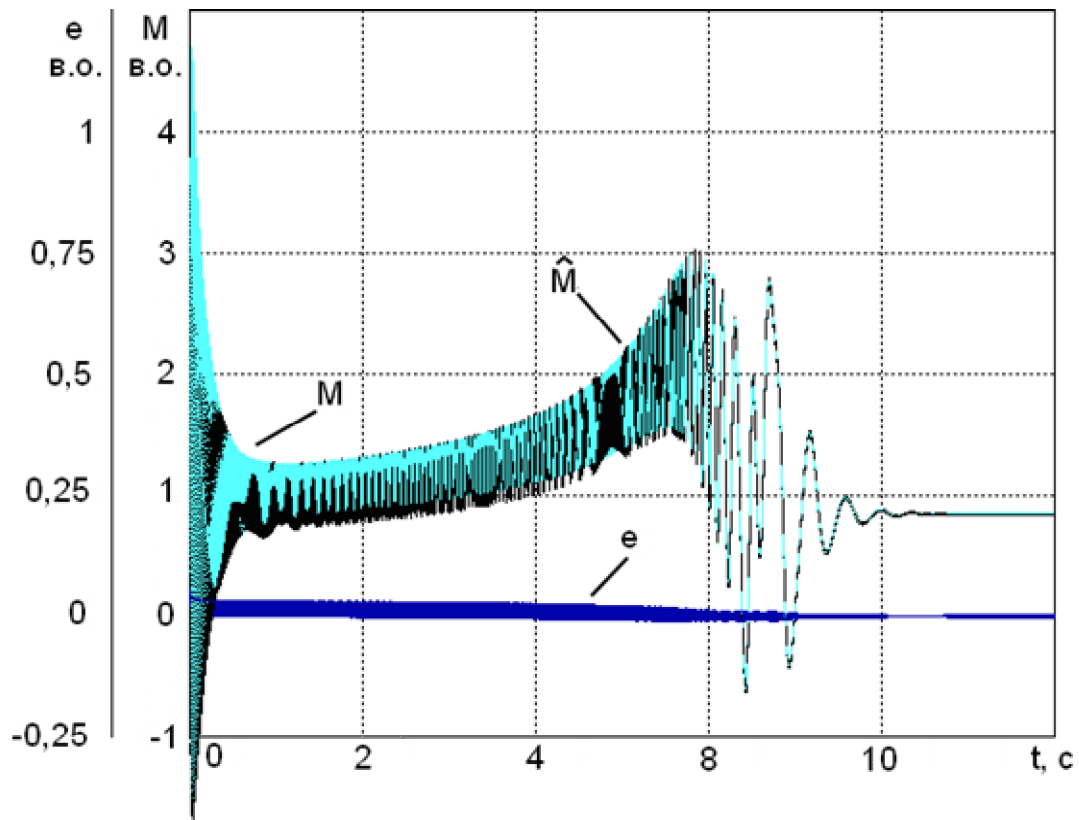


Рисунок 3.14 – Динаміка спостереження за періоду обчислення  $T_0 = 0,00005$  с.

При зменшенні кроку до  $T_0 = 0,000033$  с максимальне відхилення розрахованого моменту від дійсного значення складає 0,02 в.о. від базового моменту. Отже, для задовільної роботи необхідно, щоб мікропроцесорна система забезпечувала якомога більшу швидкодію обчислень. Для практичного використання методу необхідна розробка алгоритмів та апаратних засобів мікропроцесорного спостерігача. Перевага методу у повній адаптації до змінювання параметрів двигуна через нагрі-

вання обмоток та насичення магнітних кіл, при використанні пускового реактора та баз нього. Очевидно, що вимоги до швидкодії та розрядності мікропроцесорної системи достатньо жорсткі. Однак виправдані через повне, адаптивне врахування нестабільності параметрів двигуна. Важливим є і оптимізація чисельного методу вирішення системи необхідних алгебраїчних і диференціальних рівнянь.

### **3.4.2 Рекомендації щодо створення синхронного електропривода нового типу**

При розробці нового типу синхронного електропривода за основу взята функціональна схема, що запропонована в [54]. При цьому система керування включає в себе реверсивний збудник з пристроєм програмного керування та пристрій регулювання розрядного опору. Вхідними сигналами розробленої системи є лінійні напруги та фазні струми обмотки статора, струм збудження та сигнали імпульсного датчика кутового положення. На основі вхідних даних алгоритм керування формує закон зміни значень вихідної напруги збудника та розрядного опору. Сам алгоритм керування базується на отриманих виразах для напруги збудника [48] та розрядного опору (п. 3.1.4). З метою зменшення впливу неврахованих збурень та зміни параметрів можна застосувати корегуючий канал керування, оснований на фаззі-регуляторі, який буде ввімкнений паралельно основному.

В основі принципу роботи системи керування покладене формування гармонічної напруги збудження та регулювання розрядного опору в залежності від мети керування. Пристрій керування вмикається одночасно з подачею напруги живлення до обмотки статора двигуна, при цьому до обмотки збудження прикладається періодична напруга необхідного значення з частотою ковзання. В цей же час відбувається регулювання розрядного опору, що введений до кола обмотки збудження, шляхом широтно-імпульсної модуляції за умови не перевищення рівня напруги на затискачах обмотки. При використанні програмного керування тиристорним збудником подача номінальної напруги збудження та виведення розрядного опору відбувається при ковзанні  $s \leq 0$  та в момент однаковості змінної напруги збудника її сталому рівню після синхронізації, а не при 5%, як в традиційних системах. Удосконалена функціональна схема синхронного електропривода, що включає пристрій програмного ке-

рування збудником та регулювання розрядного опору синхронного двигуна наведе-  
на на рис. 3.15.

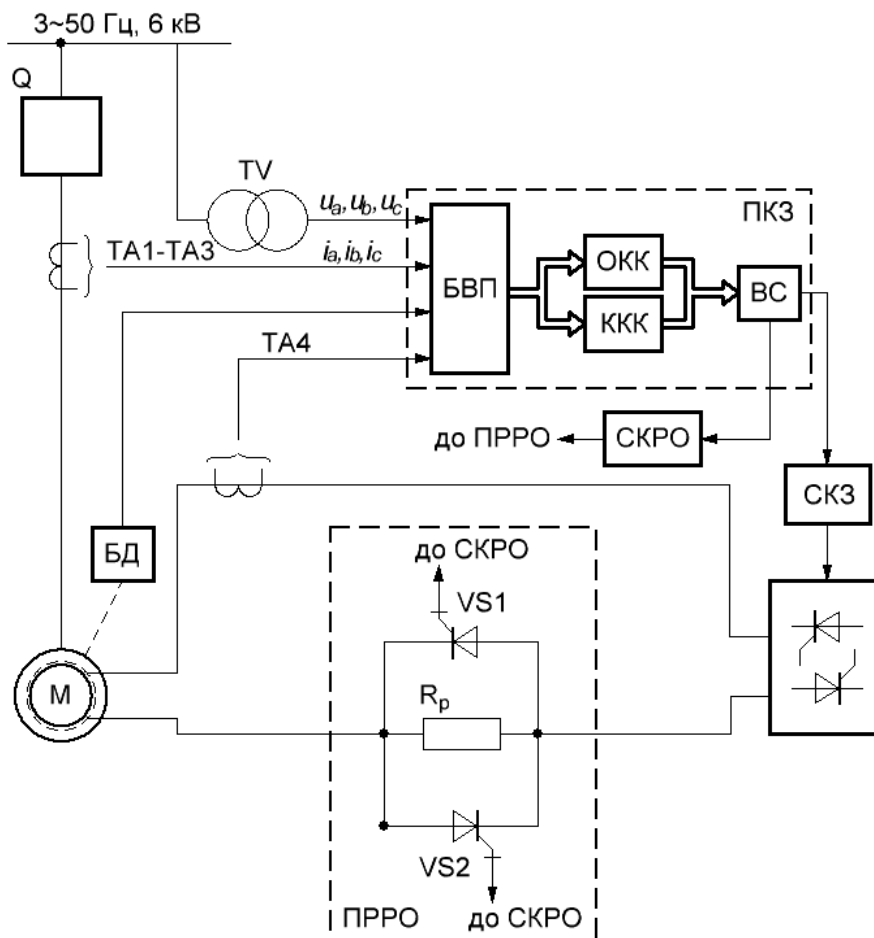


Рисунок 3.15 – Функціональна схема синхронного електропривода

Q – масляний вимикач;

TV – трансформатор напруги;

TA1-TA4 – трансформатори струму;

VS1, VS2 – повністю керовані тиристри;

$R_d$  – розрядний опір;

БД – блок імпульсного датчика;

БВП – блок перетворення вхідних сигналів;

BC – блок вихідних сигналів;

СКРО – система керування розрядним опором;

ПРРО – пристрій регулювання розрядного опору;

ПКЗ – пристрій керування збудником;

СКЗ – система керування збудником.

Пристрій регулювання розрядним опором виконано на основі повністю керованих тиристорів, що вмикаються залежно від полярності прикладеної напруги збудника для забезпечення провідності струму в обох напрямках. Повністю керовані тиристори відкриваються та закриваються подібно до транзисторів за допомогою імпульсів керування. Особливості керування тиристорами такого типу: на відміну від одноопераційних тиристорів вмикання здійснюється за допомогою імпульсу високої амплітуди струму керування 25-60 А; провідність пристрою забезпечується за рахунок неперервного струму керування, який у 5-6 разів менше основного імпульсу вмикання; вимикання здійснюється за допомогою від'ємного імпульсу високої амплітуди. Саме регулювання опору відбувається почерговим введенням та виведенням розрядного реостату шляхом вимикання та вмикання тиристорів, що з'єднані зустрічно один до одного та паралельно з ним. Імпульси керування тиристорами формуються у блоці системи керування розрядним опором (рис. 3.16). Система складається з широтно-імпульсного модулятора (ШІМ) та логічного перемикального пристрою (ЛПП). ШІМ генерує імпульси залежно від знаку струму збудження  $\pm i_{3\phi}$  на вході логічного пристрою перемикавання ЛПП.

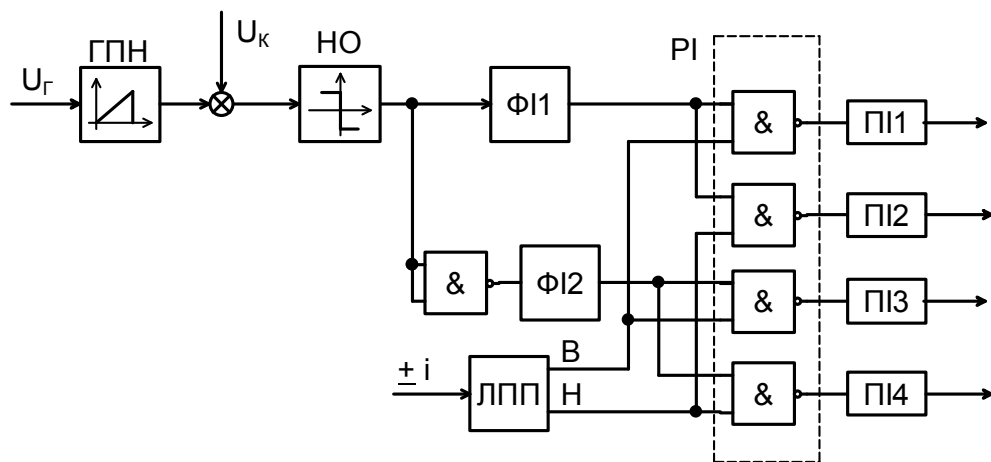


Рисунок 3.16 – Функціональна схема системи керування розрядним опором

ШІМ має у своєму складі: джерела живлення  $\pm 15$  В,  $+24$  В; ГПН – генератор пилкоподібної напруги, яка формується з необхідною частотою регулювання розря-

дною опорю;  $\Sigma$  – суматор, у якому відбувається віднімання опорної напруги та напруги завдання на опір; НО – нуль-орган, який відслідковує моменти рівності опорної напруги та сигналу завдання;  $\Phi I1$ ,  $\Phi I2$  – формувачі імпульсів вмикання та вимикання тиристорів;  $P1$  – розподільник імпульсів між тиристорами в залежності від керуючого сигналу ЛПП; ПІ1-ПІ4 – підсилювачі імпульсів.

На рис. 3.17 приведена принципова схема ШІМ, що відповідає функціональній схемі рис. 3.15. ГПН виконується на основі  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ ,  $R4$ ,  $C1$ ,  $C2$ ,  $VT1$ ,  $DA1$  та генерує сигнал  $U_{ГПН}$  з частотою імпульсів  $U_{Г}$ ; суматор  $\Sigma$  реалізований у входному колі нуль-органа НО з використанням  $R4$ ,  $R5$ ,  $VD1$ ;  $\Phi I1$ ,  $\Phi I2$  – побудовані на основі  $R6$ - $R11$ ,  $C4$ ,  $C5$ ,  $VD2$ ,  $VD3$ ,  $VT2$ ,  $VT3$ . Елемент  $DD1$  використовується для інверсування вихідного сигналу НО для формування керуючих імпульсів запирання тиристорів за допомогою  $\Phi I2$ .  $P1$ - $P4$  виконані на елементах  $DD2.1$ ,  $DD2.2$ ,  $DD3.1$ ,  $DD3.2$ , на кожен із яких надходять два сигнали відповідно від  $\Phi I$  та ЛПП. Сигнали від розподільників імпульсів надходять до підсилювачів, що реалізовані на  $R12$ - $R19$ ,  $VD4$ - $VD7$ ,  $VT4$ - $VT7$ . Після чого вони подаються до тиристорів, де оброблюються драйвером та перетворюються на керуючі імпульси вмикання та вимикання тиристорів. Діаграма роботи широтно-імпульсного модулятора представлена на рис. 3.18.

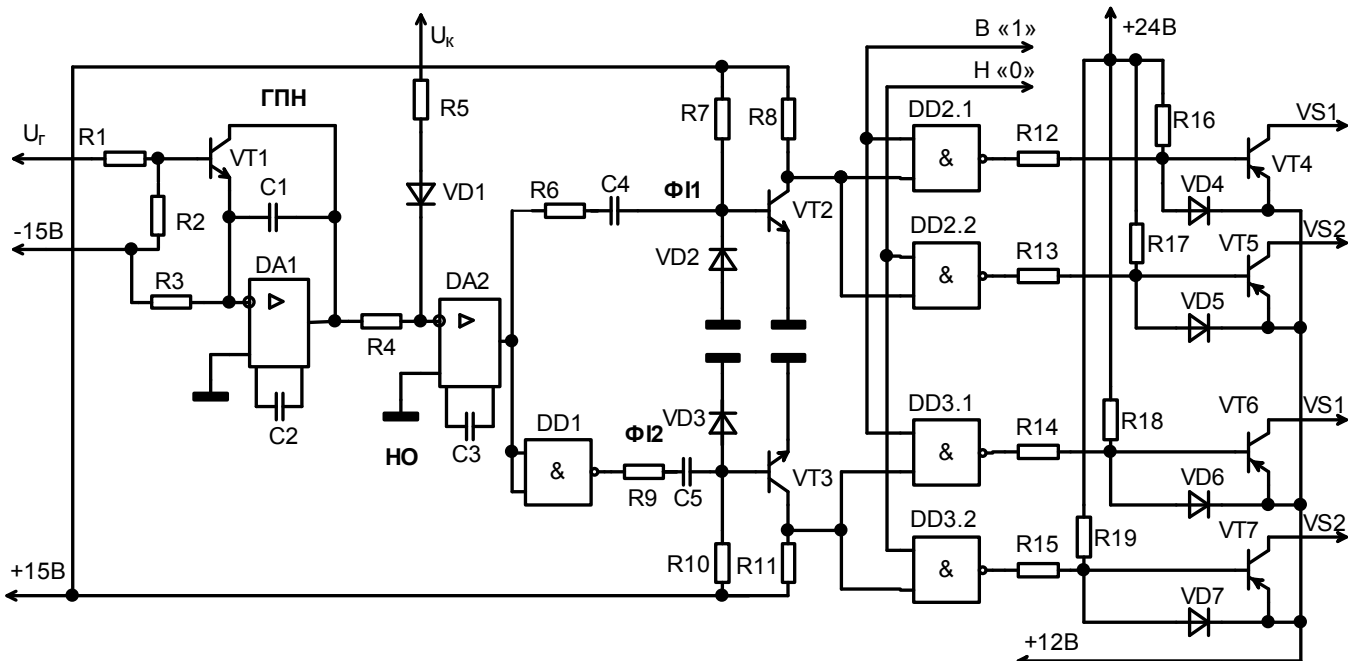


Рисунок 3.17 – Принципова схема ШІМ

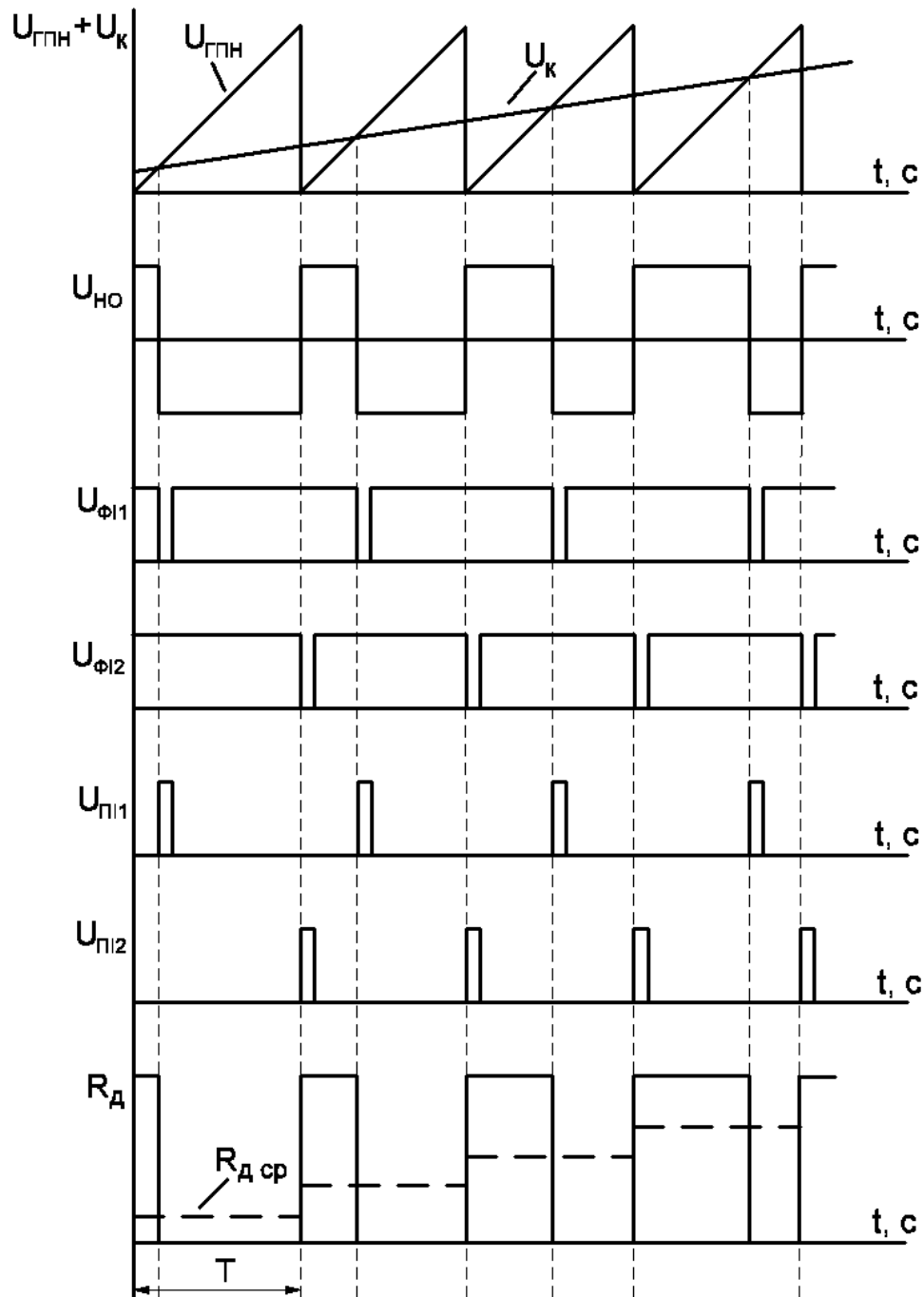


Рисунок 3.18 – Діаграма роботи широтно-імпульсного модулятора

Принцип формування керуючих імпульсів базується на порівнянні значення завдання на опір з опорною напругою, що змінюється пилкоподібно та має однаковий період зміни (рис. 3.16). У час, коли значення завдання менше за опорне, сигнали керування подаються на тиристори і розрядний реостат виводиться з обмотки збудження, в іншому випадку тиристори вимикаються і реостат вводиться до обмот-

ки. Таким чином при різному значенні завдання на розрядний опір отримуємо різний час введення реостату до обмотки, і тому отримуємо бажане середнє за період значення опору, що може змінюватись від нуля до номінального значення.

Регулювання розрядного опору виконується пристроєм регулювання розрядного опору (ПРРО), що складається з, власне, реостату, стабілітронів та тиристорів для його введення та виведення. Формування гармонічної або постійної напруги збудника відбувається за допомогою реверсивного збудника (РТЗ), що включає систему керування збудником (СКЗ) та силовий блок (СБ). Керуючі сигнали ПРРО та СКЗ формує мікропроцесорна система за допомогою блоку формування вихідних сигналів (ВС). До блоку перетворення вхідних сигналів (БВП) подаються напруги від трансформаторів струму та напруги статора, а також струму збудження. Обробка цифрових кодів вхідних величин та імпульсів БД кута повороту двигуна виконується основним (ОКК) та корегувальним (ККК) каналами керування. Основний канал формує сигнали керування напругою збудника та величиною розрядного опору за розробленим алгоритмом, а корегувальний методами нечіткої логіки – додатковий сигнал через відхилення та швидкість відхилення електромагнітного моменту від заданого.

Перспективним напрямком вдосконалення систем керування синхронними двигунами є впровадження адаптованого до збурень, таких як насичення магнітних кіл та зміна активних опорів через нагрівання обмоток, контролю електромагнітних параметрів двигуна для забезпечення більшої надійності та точності керування. Запропонований метод спостереження базується на використанні в якості вхідних миттєвих значень фазних напруг та струмів обмотки статора. Нестабільність електромагнітних параметрів двигуна опосередковано враховується виміром миттєвих значень напруги та струму статора, та, як у випадку з активним опором обмотки статора, через безпосереднє вимірювання температури обмотки за допомогою термопари. Подальший напрямок наукових досліджень вбачається у вдосконаленні розробленого адаптованого методу спостереження шляхом оптимізації закономірностей визначення параметрів двигуна для зменшення вимог щодо швидкодії мікропроцесорної системи.



## Висновки до розділу

1. В результаті дослідження впливу опору кола збудження на форму пускових характеристик синхронних двигунів з програмно керованим збудником і підсиленою пусковою обмоткою виявлено, що регулювання розрядного опору під час пуску СД, з умовою не перевищення допустимого по ТУ рівня перенапруг на затискачах обмотки збудження, дозволяє значно покращити пускову характеристику СД. Що приведе до збільшення надійності пуску зі зменшенням часу розгону привода. Також за рахунок плавного входження в синхронізм за допомогою програмного керування, зменшаться динамічні навантаження зубчастих елементів привода.

2. Використання запропонованих в роботі методів покращення пускових властивостей СД (програмне керування збудником, оптимізація величини розрядного опору, підсилення пускової обмотки) призводить до зменшення максимальної величини пускового струму, зменшує загальний негативний вплив пуску потужних синхронних двигунів на мережу живлення.

3. Розроблено метод визначення раціональних параметрів активного опору кола обмотки збудження в функції ковзання при виконанні умови не перевищення допустимої напруги збудника, що дозволяє отримати збільшення середньої складової електромагнітного моменту і забезпечує надійну синхронізацію двигуна.

4. Розроблено удосконалену модель динамічних властивостей електромеханічної системи синхронний двигун – барабанний млин, що враховує особливості форми механічної характеристики навантаження, вплив активного опору обмотки статора та реактора, нагрівання активних опорів обмоток і насичення магнітних кіл двигуна. Крім того, розроблена модель забезпечує можливість використання оптимізації розрядного опору в процесі розгону СД, програмного керування збудником синхронного двигуна та можливість підсилення пускової обмотки.

5. В результаті дослідження доведено, що комплексне використання посиленої пускової обмотки, оптимізованого розрядного опору в колі збудження та програмно керованого реверсивного збудника, забезпечує надійний пуск потужних синхронних

млинових приводів без запасу встановленої потужності, зі злежалим завантаженням барабана і номінальним усталеним навантаженням.

В результаті використання запропонованого приводу будуть отримані економічні переваги від зниження ціни приводного двигуна внаслідок зменшення його потужності, економії електроенергії за рахунок роботи двигуна з номінальним коефіцієнтом корисної дії, виключення непродуктивних режимів «виходжування» і «розгону» млина. Використання запропонованих засобів дозволяє запускати синхронні двигуни з номінальним навантаженням при збереженні теплового режиму обмоток з одночасним зменшенням навантажень мережі живлення.

6. Розроблено рекомендації на створення синхронного потужного електропривода нового типу з запропонованими в роботі посиленням демпферної обмотки, регулюванням розрядного опору в колі збудження й програмно керованим реверсивним збудником.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Запропоновано ввести поняття коефіцієнтів використання потужності при характерних неповнофазних режимах роботи печі опору. Такий підхід дозволить визначити аналітичну залежність для розрахунків коефіцієнтів і вирішити задачу симетрування цехового навантаження з урахуванням режимів роботи печі опору.

2. В результаті моделювання нерівномірності розподілу однофазного навантаження визначені межі, в яких нерівномірність не перевищує 15 %, що означає практично рівномірний розподіл навантаження. При потужності цехових трансформаторів 630-1600 кВА та печі до 50 кВт навантаження практично рівномірно розподілено при  $K_{u\text{ср}3} = 0,3...0,9$ . При зниженні  $K_{u\text{ср}3} = 0,1...0,3$  нерівномірність різко зростає. Відмітною особливістю отриманої залежності є урахування однофазних і двофазних навантажень ЕПО та їх впливу на нерівномірність розподілу навантаження.

3. Фазу пічного навантаження, що використовується для її переведення з трифазного режиму в двофазний запропоновано підключати до фази з максимальною потужністю однофазного навантаження мережі  $P_{\text{max}}$ , а фазу для переведення печі з двофазного в однофазний – до фази з середньою потужністю однофазного навантаження  $P_{\text{ср}}$ . Це дозволяє при певних співвідношеннях між  $P_{\text{max}}$ ,  $P_{\text{min}}$  використовувати пічне навантаження як симетруючий пристрій. У цьому полягає суть запропонованої методики симетрування та створеної на цій основі технології нагрівання.

4. Отримана аналітична залежність для розрахунку  $\xi$  з урахуванням несиметричних режимів роботи печі опору. Показано, що значення  $\xi$  залежить від відношення максимального  $P_{\text{max}}$  і мінімального  $P_{\text{min}}$  значень однофазних навантажень мережі. Встановлені допустимі межі зміни  $P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$ , які забезпечують симетрування навантажень. Це склало основу для вирішення практичних задач симетрування при використанні розробленого способу управління температурними режимами печі.

5. Для якісної оцінки симетруючого ефекту спеціальних режимів ЕПО розроблена математична модель визначення показників несиметрії напруги. Особливістю даної моделі є урахування відношення пічного навантаження до загально цехового в процесі визначення ступеня несиметрії.

6. При русі безконтактних електровозів уздовж тягової мережі зміна напруги в перетинах мережі залежить від координати точки прикладання навантаження. У точці включення опору, що вноситься, відбувається стрибкоподібне зростання значення напруги. Величина стрибка напруги залежить від характеру опору, що вноситься, ступеня компенсації індуктивного опору тяговій мережі і розміщення компенсаційних пунктів.

7. За будь-яких довжин тягових мереж зміна напруги в перетинах мережі при русі електровозів залежить від координати точки включення навантаження. Підвищення напруги характерне для знаходження електровоза на початку маршруту, а значення, близькі до параметрів ненавантаженої мережі спостерігаються, починаючи з середини маршруту і до його кінця. Слід зазначити, що приведені залежності для мереж різної протяжності одержані при однакових значеннях опору, що вноситься.

8. Дослідження ліній різної довжини засвідчено необхідність регулювання навантаження тягової мережі задля уникнення перенапружень на окремих ділянках, які призводять до порушення режимів роботи транспорту в цілому.

9. При регулюванні тягового приводу електровоза для тягових мереж невеликої протяжності необхідно обмежувати опір, що вноситься, значенням на рівні 3 Ом.

14. Показано, що зазначення струму тягової мережі при відсутності електровозів на лінії дозволяє суттєво зменшити втрати електричної енергії, підвищити ККД системи індукційної передачі енергії в цілому.

16. В роботі досліджені схеми керування силовим комутатором на основі безконтактних компенсаційних датчиків струму з елементами Хола та датчиків на основі резисторів. Установлені співвідношення вихідних сигналів схем залежно від виду замикання в лінії.

17. Проведений аналіз роботи силових швидкодіючих комутаторів для систем випереджального вимикання. Наведені співвідношення й графіки для оцінки швидкодії комутаторів.

18. Розроблена схема силового швидкодіючого комутатора для систем електропередачі підвищеної надійності. Проведений аналіз роботи схеми й показана можливість суттєвого підвищення швидкодії її роботи.

19. Розроблена структурна та принципова схеми системи електропередачі підвищеної надійності, описаний їхній принцип дії й наведені деякі результати випробувань макетного зразка.

20. В результаті дослідження впливу опору кола збудження на форму пускових характеристик синхронних двигунів з програмно керованим збудником і підсиленою пусковою обмоткою виявлено, що регулювання розрядного опору під час пуску СД, з умовою не перевищення допустимого по ТУ рівня перенапруг на затискачах обмотки збудження, дозволяє значно покращити пускову характеристику СД. Що приведе до збільшення надійності пуску зі зменшенням часу розгону привода. Також за рахунок плавного входження в синхронізм за допомогою програмного керування зменшаться динамічні навантаження зубчастих елементів приводу.

21. Використання запропонованих в роботі методів покращення пускових властивостей СД (програмне керування збудником, оптимізація величини розрядного опору, підсилення пускової обмотки) призводить до зменшення максимальної величини пускового струму, негативного впливу на мережу живлення.

22. Розроблено метод визначення раціональних параметрів активного опору кола обмотки збудження в функції ковзання, при виконанні умови не перевищення допустимої напруги збудника, що збільшує середню складову електромагнітного моменту і забезпечує надійну синхронізацію двигуна.

23. Розроблено удосконалену модель динамічних властивостей електромеханічної системи синхронний двигун – барабанний млин, що враховує особливості форми його механічної характеристики, вплив активного опору обмотки статора та реактора, нагрівання обмоток і насичення магнітних кіл двигуна. Крім того, розроблена модель забезпечує можливість використання оптимізації розрядного опору в процесі розгону СД, програмного керування збудником синхронного двигуна та можливість підсилення пускової обмотки.

24. В результаті дослідження пускових процесів отриманих в результаті роботи удосконаленої моделі достатньо доведено, що комплексне використання посиленої пускової обмотки, оптимізованого розрядного опору в колі збудження й програмно керованого реверсивного збудника, забезпечує надійний пуск потужних синхронних

млинових приводів без запасу встановленої потужності з важкими умовами внаслідок злежалого завантаження барабана і номінальним усталеним навантаженням.

В результаті використання запропонованого приводу будуть отримані економічні переваги від зниження вартості приводного двигуна внаслідок зменшення його потужності та економії електроенергії за рахунок його роботи з номінальним коефіцієнтом корисної дії, виключення непродуктивних режимів «виходжування» і «розгону» млина. Використання запропонованих засобів дозволяє запускати синхронні двигуни з номінальним навантаженням при збереженні теплового режиму обмоток з одночасним зменшенням навантажень мережі живлення.

25. Розроблено рекомендації на створення синхронного потужного електропривода нового типу з запропонованими в роботі посиленням демпферної обмотки, регулюванням розрядного опору в колі збудження й програмно керованим реверсивним збудником.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Лапшин В.И. Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов. // Под общ. ред. В.И. Лапшина, В.М. Шулаева. – Ч.1, Сборник докладов 4-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Харьков, 2003.
2. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1985. – 264 с.
3. Шидловский А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
4. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с.
5. Шидловский А.К. Эффективные режимы работы электротехнологических комплексов / А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк, С.И. Выпанасенко, В.В. Слесарев. – Д.: НГА Украины, 2000.
6. Півняк Г.Г. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – 376 с.
7. Борисов Б.П. Повышение эффективности использования электроэнергии в системах электротехнологии / [Б.П. Борисов, Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.К. Шидловский]. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 240 с.
8. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1985. – 264 с.
9. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с.
10. Пивняк Г.Г. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, И.П. Ремизов, С.А. Саратикянц и др.; под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра - 1990. – 245 с.

11. Зражевский Ю.М. Особенности моделирования режимов работы тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии / Ю.М.Зражевский, Е.И.Хованская, А.В.Бобров // Электротехника и электроэнергетика, 2001, №2. – С. 66-68.

12. Хованская Е.И. Оценка параметров режима нагруженной тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии при изменении протяженности выработки / Е.И. Хованская, И.А. Шедловський // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 69, С. 144-147.

13. Хованская Е.И. Анализ параметров тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии при изменении ее нагрузки / Е.И. Хованская, И.А. Шедловський // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.-2002.-Вип.69, С. 147-150.

14. Підвищення ефективності використання електроенергії в технологічних системах: Звіт по НДР (проміжний)/НГУ; Наук. кер. Півняк Г.Г.; Шифр теми ГП-435; № ДР0106U001377.- Дніпропетровськ, 2010.- 141с.

15. А.с. по заявке № 4425525/31-11, СССР, МКИ В60М5/02. Рельсовая цепь с устройством для ограничения потенциалов рельсов / А.С. Головченко, А.Б. Иванов, И.А. Кириллов (СССР). Заявлено 18.05.88.

16. А.с. 650230 СССР, МКИ НОЗК 17/53. Прерыватель постоянного тока / Л.И. Бронштейн, Г. А. Нефедов (СССР). – № 2199663; Заявл. 15.12.75; Опубл. 28.02.79. Бюл. № 8.

17. А.с. 336806 СССР, МКИ НОЗК 17/56. Прерыватель постоянного тока с параллельно-ёмкостной коммуникацией / Л.И. Бронштейн (СССР). – № 1392866/24-7; Заявл. 26.12.69; Опубл. 21.04.72. Бюл. № 14.

18. Тиристоры. Технический справочник. Перевод с англ. / Под ред. В.А. Лабунцова, С.Г. Обухова, А.Ф. Свиридова. – М.: Энергия. 1971. – 560 с.

19. Управляемые полупроводниковые вентили / Ф. Джентри, Ф. Гутцвиллер, Н. Голоньяк и др. – М.: Мир, 1967. – 455 с.

20. Горохов В.А., Щедрин М.Б. Тиристоры в импульсных схемах. – М.: Советское радио, 1972. – 304 с.



21. А.с. 913594 СССР, МКИ НОЗК 17/56. Ключ постоянного тока / А.Б. Иванов, А.С. Головченко, И. А. Кириллов, Ю.П. Сердюков, Б.Н. Сироченко (СССР). – № 2959481. Заявл. 11.07.80; Оpubл. 15.03.82. Бюл. № 12.

22. Головченко А.С., Иванов А.Б., Кириллов И.А. Исследование устройства подавления дугообразования для рудничных контактных электровозов // Горн. электромеханика и автоматика: Респ. межвед. научн. сб. –1984. – Вып. 44. – с. 29-31.

23. Патент 2103128 Франция, МКИ НОЗК 17/00. Переключатель на тиристорах / Оpubл. 1972. Изобретения за рубежом. Бюл. № 8 . – с. 44.

24. Справочник по преобразовательной технике / Под ред. И.М. Чиженко. – Киев: Техніка, 1978. – 448 с.

25. Morgan R.E. Time ratio control with combined SCR and SR commutation. IEEE, Transaction on Communication and Electronics, 1967, № 7.

26. Лисицын А.Г., Игольников Ю.С. Расчёт величины накачки напряжения на коммутирующем конденсаторе в установившемся режиме в тиристорном импульсном преобразователе тока // Изв. ВУЗов. – Энергетика. – 1975. – № 2. – с. 44-47.

27. Глазенко Т.А. Принцип построения и расчёта тиристорных широтно-импульсных преобразователей систем электропривода постоянного тока / Устройства преобразовательной техники. – 1969, вып. 2.

28. А. с. 450357. МКИ НОЗК 17/72. Тиристорный ключ / В.В. Андрущук, В.В. Андрущук (СССР). – № 1966441/26-9; Заявл. 15.10. 73; опубл. 15.11.74. Бюл. № 42.

29. Иванов А.Б., Головченко А.С. Исследование токосъёмных устройств с параллельными ветвями для рудничных контактных электровозов // Горн. электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч. – техн. сб. – 1973. – Вып. 23. – с. 94-97.

30. А. с. 448602 СССР, МКИ НОЗК 17/72. Устройство для отключения тиристоров / М.Е. Гольц, В.М. Остреров, Б.П. Шевченко, А.М. Альтер, Г.А. Макаров, С.А. Мезенцев (СССР). – № 1893588/26-9; Заявл. 19.03.73; опубл. 30.10.74. Бюл. № 40.

31. А.с. 479252 СССР, МКИ НОЗК 17/56. Устройство для коммутации тиристоров / М.Е. Гольц, В.М. Остреров, Б.П. Шевченко (СССР). – № 1899443/24-7; Заявл. 30.03.73; опубл. 30.07.75. Бюл. № 28.

32. Wagner R. Elektronischer Gleichstromsteller als Feldsteller für elektrische Maschinen. – "Siemens Zeitschrift", 1965, № 6, s. 729-733.

33. А.с. 441667 СССР, МКИ НОЗК 17/56. Переключатель цепи постоянного тока / В.В. Андрущук, В.В. Андрущук (СССР). – № 1620157/24-7; Заявл. 15.02.71; опубл. 25.08.74. Бюл. № 32.

34. Заявка 3414922 ФРГ, МКИ НОЗК 17/72. Электронный переключатель. / Оpubл. 1985. Изобретения за рубежом. Бюл. № 10, 1986. – с. 38.

35. Заявка 2566208 Франция, МКИ НОЗК 17/72. Электронный коммутатор. / Оpubл. 1985. Изобретения за рубежом. Бюл. № 10, 1986. – с. 42.

36. А.с. 843231 СССР, МКИ НОЗК 17/56. Тиристорный ключ постоянного тока / Л.П. Иванов (СССР). – № 2807927/18-21; Заявл. 13.08.79, опубл. 30.06.81. Бюл. № 24.

37. А.с. 1036229 СССР, МКИ НОЗК 17/56. Электронный коммутатор / Л.П. Иванов, Ю.А. Ганшин (СССР). – № 2867773/18-21; Заявл. 10.01.80, опубл. 7.04.88. Бюл. № 13.

38. А.с. 1066431 СССР, МКИ НОЗК 17/56. Электронный коммутатор постоянного тока / Ю.А. Ганшин (СССР). – № 2901163/18-21; Заявл. 1.04.80; опубл. 7.04.88. Бюл. № 13.

39. Dawson F. P., Lansing L.E., Dewan S.B. A fact DC current breaker. – IEEE Trans. Ind. Appl, 1985, 3, № 21, p. 1176-1181.

40. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний.

41. Г.К. Жерве. Промышленные испытания электрических машин. «Энергия» Л., 1968.

42. Я.Б. Данилевич, В.В. Домбровский, Е.Я. Казовский. Параметры электрических машин переменного тока. «Наука» М.–Л., 1965, стор. 160.

43. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л. «Энергия», 1974, 840 с. с ил.

44. Павлюк К., Беднарек С., Пуск и асинхронне режимы синхронных двигателей. Пер. с польск. М.: Энергия, 1971. – 272 с.

45. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2. – Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е перераб. Л., «Энергия», 1973, 648 с. с ил.

46. Кириченко В.В., Боровик Р.О., Барабан В.В. Дослідження впливу розрядного опору на ефективність програмного керування синхронним приводом // Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" науково-технічного журналу "ЕЛЕКТРОІНФОРМ". – 2009. – С. 384-385.

47. Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко, В.В. Кириченко, Р.О. Боровик. Комплектний синхронний електропривод з програмним керуванням. // Доповіді національної академії наук України. Математика, природознавство, технічні науки. – 2007, – №7. – С. 93-97.

48. Розробка теорії програмного керування електромеханічними системами з потужними синхронними двигунами: Національний гірн. ун-т. / д-р техн. наук, проф. В.І. Кириченко / Звіт про НДР (заключний) № ДР 0106U001376; – Дніпропетровськ, 2007. – 151 с.

49. Бабурин В.Б., Сумцов И.А. О повышении продольного электромагнитного момента машин переменного тока в асинхронном режиме // Труды ВНИИЭ – вып 57. – М.: Энергия, 1979. – С. 65-71.

50. Сиротин А.А. Автоматическое управление электроприводами, М., «Энергия», 1969, изд.2-е перераб. и дополнен.

51. Гончаров А.С., Поваляев В.А., Миронов С.М. Анализ современного состояния в области создания электроприводов с бездатчиковым управлением и методов построения САР в условиях ограниченной информации о векторе состояния, Электротехнические комплексы и системы управления, ЗАО "Воронежский инновационно-технологический центр", 2008. – № 1. – с. 13-16.

52. Кононенко Е.В., Сипайлов Г.А., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). Учебное пособие для вузов. – Москва: «Высшая школа», 1975. – 279 с.

53. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М. – Л.: «Госэнергоиздат», 1963. – 744 с.

54. Кириченко В.В. Обоснование режимов управления и энергетических параметров комплекса низкочастотная мельница-синхронный электропривод: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Днепропетровск, 2003. – 213 с.

**Додаток А**

Державний ВНЗ «НГУ»

**ЗАТВЕРДЖУЮ****Проректор з наукової роботи****Д-р техн. Наук, проф.****О.С. Бешта****" 30 " листопада 2011р.****ЗВІТ****про патентні дослідження****28 листопада № \_\_\_\_\_**  
(дата)**«Підвищення ефективності використання електроенергії в технологічних системах» шифр теми ГП-435 \_\_\_\_\_**  
(найменування, шифр теми)**Етап: «Дослідження системи контролю струморозподілу однопотенціальних віток мережі електропередачі підвищеної надійності» \_\_\_\_\_****Начальник НДЧ****Р.О. Дичковський****Керівник****підрозділу-виконавця****О.Б. Іванов****Зав. ПЛВ****О.О. Філонова****Нормоконтролер****Л.О. Савостенко**

## СПИСОК АВТОРІВ

Кирилов І.А.	старший науковий співробітник
Федоров С.І.	старший науковий співробітник
Камишанський П.В.	науковий співробітник

## ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Організація-виконавець розробки: **Державний ВНЗ «НГУ»**

(Національний гірничий університет).

Початок розробки – 2010, січень

Кінець розробки – 2011, грудень

**Об'єктом дослідження** є: процеси контролю струморозподілу одно потенціальних віток та випереджального вимикання для запобігання аварійних порушень в мережі електропостачання.

Мета етапу НДР – розробка системи електропостачання для вибухонебезпечних виробництв на основі випереджального вимикання електромереж при аварійній ситуації.

Актуальність проекту: у підземних виробітках шахт прокладені тисячі кілометрів броньованих і гнучких кабелів не маючих ефективного механічного захисту. Найбільшу аварійність мають кабелі які виготовленні в нормальному (не рудничному) виконанні і прокладені безпосередньо в забоях з високою ймовірністю виникнення небезпечної концентрації метану та пилу. Виходячи з цього кабельне господарство систем електропостачання вугільних шахт заслуговує на особливу увагу з погляду запобігання вибухів і пожеж.

Галузь використання – підприємства паливно-енергетичного комплексу України, шахти з викидами метану та наявності вогнебезпечної пилу, наукові заклади, що займаються дослідженнями та розробкою вибухобезпечного обладнання.

В представленому документі наведені дані про патентний пошук конструктивних рішень по захисту від вибухів та пожеж, які спричинені розривами, замиканнями та витоками в системах електропостачання вугільних шахт.

## ЗМІСТ

1. Завдання на проведення патентних досліджень.
2. Довідка про пошук.
3. Регламент пошуку.
4. Форма Г.1.1. Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу.
5. Форма Г.1.4. Техніко-економічні показники ОГД та об'єктів аналогічного призначення.
6. Форма Г.1.5. Аналіз новизни, винахідницького рівня та промислової придатності ОГД.
7. Форма Г.2.4. Аналіз можливості застосування в ОГД відомих об'єктів промислової власності.
8. Довідка про оцінку науково-технічного рівня результатів НДР ГП-435.



## ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи НГУ

О.С. Бешта

" 15 " січня 2010 р.

## Завдання

## на проведення патентних досліджень

по темі: «Підвищення ефективності використання електроенергії в технологічних системах» шифр теми ГП-435Етап: «Дослідження системи контролю струморозподілу однопотенціальних віток мережі електропередачі підвищеної надійності»Мета патентних досліджень: визначення патентної ситуації відносно ОГД

Таблиця А.1 Види робіт при проведенні патентних досліджень та виконавці:

Види робіт	Підрозділи-виконавці	Відповідальні виконавці (П.І.Б.)	Строки виконання робіт	Звітний документ
1	2	3	4	5
1. Визначення патентоздатності ОГД	Кафедра електричних машин, НГУ	Кирилов І.А. Федоров С.І. Камишанський П.В	3-4 квартал 2010 р.	Довідка про пошук
2. Техніко-економічні показники в ОГД та об'єктів аналогічного призначення		Кирилов І.А. Федоров С.І. Камишанський П.В	3-4 квартал 2011 р.	Форма Г.1.4.
3. Аналіз новизни, винахідного рівня, промислового використання		Кирилов І.А. Федоров С.І. Камишанський П.В	3-4 квартал 2011 р.	Форма Г.1.5.
4. Аналіз можливості використання в ОГД відомих об'єктів промислової власності		Кирилов І.А. Федоров С.І. Камишанський П.В	3-4 квартал 2011р.	Форма Г.2.4., Звіт про патентні дослідження

Керівник підрозділу-виконавця робіт,  
теми ГП-435, професор

О.Б.Іванов

Зав. ПЛВ

О.О. Філонова

## ДОВІДКА ПРО ПОШУК №\_1

Завдання на проведення патентних досліджень \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_, 15.01.2010 р.

Етап \_\_\_\_\_ перший \_\_\_\_\_

Номер, дата регламенту пошуку \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_

Початок пошуку \_\_\_\_\_ 06.2010 \_\_\_\_\_ Закінчення пошуку \_\_\_\_\_ 12.2010 \_\_\_\_\_

Таблиця В.1 Джерела інформації, використані під час проведення пошуку

Предмет пошуку (ОГД)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні дані першого та останнього за хронологією джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша науково-технічна інформація
1	2	3	4	5	6
Системи, пристрої запобігання вибухам та пожежам, які спричинені розривами, замиканнями та витокami в системах електропостачання вибухонебезпечних підприємств.	Україна	МПК: E21F 5/00 E21F 9/00 E21L 2/00 E21L 4/00 G05F1/56 H02J 1/00 H02H 3/16 H02M 1/12 H02M 1/08 H02H 3/08 H02H 3/14 H02H 7/00 H02H 7/06 H02H 7/26 H02H 9/04 H05B 39/00	УКРПАТЕНТ – база даних патентів України	<a href="http://base.ukrpate nt.org">http://base.ukrpate nt.org</a> 01.01.2000 01.12.2010	Спеціалізована БД "Винаходи (корисні моделі) в Україні
			Бюлетень "Промислова власність"	Державний департамент інтелектуальної власності, Бюлетень "Промислова власність" 2005-2010	Вісник НТУ «ХП», Технічна електродинаміка, Науковий вісник НГУ
			РОСПАТЕНТ - Российское патентное ведомство - Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам	<a href="http://www1.fips.ru">http://www1.fips.ru</a> и 01.01.2000 01.12.2010	Информационные ресурсы ФГУ ФИПС свободного доступа и базы данных.
	База даних «Патенты России»		Бюлетень «Перспективные технологии и новые разработки», 2005 – 2010	<a href="http://www.sibpatent.ru">www.sibpatent.ru</a>	

	Країни Європи	PRIORSMART - более 60 онлайн патентных баз данных.	<a href="http://www.priorsmart.com/">http://www.priorsmart.com/</a> 2000-2010	
		ЕАПВ - Евразийское патентное ведомство	Software for Intellectual Property. 2005 –.2010	
	США	USPTO - полнотекстовая база данных патентного ведомства США	<a href="http://www.uspto.gov/patents">http://www.uspto.gov/patents</a>	www.ieee.org;
		Журнал «Изобретение стран мира»	Журнал «Изобретение стран мира», 2005-2010	
	Японія	Patent Abstracts of Japan (PAJ) - базы данных Патентного ведомства Японии	<a href="http://www.ipdl.inpit.go.jp">http://www.ipdl.inpit.go.jp</a> 01.01.2000 01.12.2010	www.ieee.org; www.jpo.go.jp
		Журнал «Изобретение стран мира»	Журнал «Изобретение стран мира», 2005-2010	
	Китай	Поиск патентів світу: Espacenet Patent search	<a href="http://worldwide.espacenet.com/">http://worldwide.espacenet.com/</a>	

## В.2 Висновки про виконання регламенту пошуку

Пошук виконаний за джерелами науково-технічної літератури та патентної документації відповідно регламенту в обсязі фонду технічної бібліотеки, патентного відділу НГУ та міжнародних патентних організацій, що є достатнім для даного етапу патентного дослідження.

Керівник підрозділу-виконавця робіт, теми ГП- 435,  
професор

О.Б. Іванов

Керівник ПЛВ

О.О. Філонова



**Форма Г.1.1 Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу**

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомості щодо його діяльності
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
БЛОК ІСКРОЗАХИСТУ	<p>(11) Номер патенту: 48390            (21) Номер заявки: u200911140            (22) Дата подання заявки: 02.11.2009            (24) Дата, з якої є чинними права: 10.03.2010            (51)МПК (2011.01):H05B 39/00,E21F 9/00            (72) Винахідник: Липовецький Леонід Семенович (UA); Бенін Євген Юлійович (UA); Фельдман Семен Данилович (UA); Федоренко Геннадій Леонідович (UA)</p> <p>(73) Власник: ФЕДОРЕНКО ГЕННАДІЙ ЛЕОНІДОВИЧ (UA)            Патент опубліковано 10.03.2010, бюл. № 5/2010</p>	патент діє
БЛОК ІСКРОЗАХИСТУ	<p>(11) Номер патенту: 5833            (21) Номер заявки: 20040907343            (22) Дата подання заявки: 07.09.2004            (24) Дата, з якої є чинними права: 15.03.2005            (51) МПК (2011.01): H05B 39/00, E21F 09/00, F21L 4/00            (72) Винахідник: Липовецький Леонід Семенович (UA); Бенін Євген Юлійович (UA); Фельдман Семен Данилович (UA); Федоренко Геннадій Леонідович (UA); Левін Ілля Рувімович (UA)</p> <p>(73) Власник: ФЕДОРЕНКО ГЕННАДІЙ ЛЕОНІДОВИЧ (UA)            Патент опубліковано 15.03.2005, бюл. № 3/2005</p>	патент не діє
ІСКРОБЕЗПЕЧНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ	<p>(11) Номер патенту: 49348            (21) Номер заявки: 2001117798            (22) Дата подання заявки: 15.11.2001            (24) Дата, з якої є чинними права: 15.08.2005            (51) МПК (2011.01): E21F 9/00            (72) Винахідник: Левін Ілля Рувімович (UA); Федоренко Геннадій Леонідович (UA)            (73) Власник: ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖ. СЕРВІС-ЦЕНТР "СТЕМ" (UA)            Патент опубліковано 15.08.2005, бюл. № 8/2005</p>	патент не діє

ІСКРОБЕЗПЕЧНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИ- ВЛЕННЯ	(11) Номер патенту: 60665 (21) Номер заявки: 2003010736 (22) Дата подання заявки: 28.01.2003 (24) Дата, з якої є чинними права: 11.06.2007 (51) МПК: E21F 9/00 (2006.01), G05F 1/46 (2006.01), H02H 7/18 (2006.01) (72) Винахідник: Сидяк Володимир Олександрович (UA); Сіроткін Олександр Арнольдович (UA); Коломійцев Анатолій Кузмич (UA) (73) Власник: ВАТ «АВТО- МАТГІРМАШ" ІМ. В.А. АНТИПОВА (UA) Патент опубліковано 11.06.2007, бюл. № 8/2007	патент не діє
БЛОК ІСКРОЗА- ХИСТУ	(11) Номер патенту: 61807 (21) Номер заявки: u201101409 (22) Дата подання заявки: 08.02.2011 (24) Дата, з якої є чинними права: 25.07.2011 (51) МПК (2011.01): F21L 2/00, H01H 73/00 (72) Винахідник: Брюханов Олександр Михайлович (UA); Коптиков Віктор Пав- лович (UA); Гладков Олександр Юрійо- вич (UA); Муфель Лев Абрамович (UA); Гречка Анатолій Васильович (UA) (73) Власник: ДЕРЖАВНИЙ МАКІЇВСЬКИЙ НАУКОВО- ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ З БЕЗПЕКИ РОБІТ У ГІРНИЧІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ (UA) Патент опубліковано 25.07.2011, бюл. № 14/2011	дію патента припи- нено, але може бути поновлено
СПОСІБ ЗАБЕЗ- ПЕЧЕННЯ ІСК- РОБЕЗПЕЧНОС- ТІ ЛІНІЙ, ЯКІ ЖИВЛЯТЬ ІН- ДУКТИВНІ НА- ВАНТАЖЕННЯ І ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙС- НЕННЯ	(11) Номер патенту: 40715 А (21) Номер заявки: 97073855 (22) Дата подання заявки: 21.07.1997 (24) Дата, з якої є чинними права: 15.08.2001 (51) МПК (2011.01): E21F 9/00 (72) Винахідник: Колосюк Володимир Петрович (UA); Колосюк Андрій Воло- димирович (UA) (73) Власник: ДЕРЖАВНИЙ МА- КІЇВСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ПО БЕЗПЕЦІ РОБІТ В ГІР- НИЧІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ (UA) Патент опубліковано 15.08.2001, бюл. № 7/2001	патент не діє
СИСТЕМА ЕЛЕ- КТРОЖИВЛЕН-	(11) Номер патенту: 20872 (21) Номер заявки: u200609346	патент не діє

НЯ З ЗАХИСТОМ	<p>(22) Дата подання заявки: 28.08.2006  (24) Дата, з якої є чинними права:  15.02.2007  (51) МПК:G05F 1/56 (2006.01)  (72) Винахідник: Ніколенко Сергій  Іванович (UA); Романов Юрій Іванович  (UA)  (73) Власник: КАЗЕННЕ  ПІДПРИЄМСТВО "НАУКОВО-  ВИРОБНИЧИЙ КОМПЛЕКС "ІСКРА"  (UA)  Патент опубліковано 15.02.2007, бюл. №  2/2007</p>	
СПОСІБ ІСКРО- БЕЗПЕЧНОГО ЕНЕРГОЖИВ- ЛЕННЯ НАВАН- ТАЖЕНЬ ПОС- ТІЙНОГО СТРУМУ З НА- ПРУГОЮ ЖИВ- ЛЕННЯ РІЗНИХ РІВНІВ І СИС- ТЕМА ДЛЯ ЙО- ГО ЗДІЙСНЕННЯ	<p>(11) Номер патенту: 65873  (21) Номер заявки: 2003065572  (22) Дата подання заявки: 17.06.2003  (24) Дата, з якої є чинними права:  25.07.2007  (51) МПК (2011.01): E21F 9/00  (72) Винахідник: Сидяк Володимир  Олександрович (UA); Сіроткін Олександр  Арнольдівич (UA); Коломійцев Анатолій  Кузьмич (UA); Шапошнік Василь Івано-  вич (UA)  (73) Власник: ВІДКРИТЕ АКЦІО-  НЕРНЕ ТОВАРИСТВО "АВТО-  МАТГІРМАШ" ІМЕНІ В.А.АНТИПОВА  (UA)  Патент опубліковано 25.07.2007, бюл. №  11/2007</p>	патент не діє
СИСТЕМА ІСК- РОБЕЗПЕЧНОГО ЕЛЕКТРОЖИВ- ЛЕННЯ	<p>(11) Номер патенту: 7603  (21) Номер заявки: 3003873/SU  (22) Дата подання заявки: 13.11.1980  (24) Дата, з якої є чинними права:  29.09.1995  (51) МПК: H02H 7/26 (2006.01), E21F  5/00 (2006.01)  (72) Винахідник: Кириченко Борис  Мефодієвич (UA); Губкін Анатолій Ва-  сильович (UA); Гура Анатолій Микито-  вич (UA)  (73) Власник: ДОНЕЦЬКИЙ НА-  УКОВО-ДОСЛІДНИЙ ТА ПРОЕКТУ-  ВАЛЬНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ ІН-  СТИТУТ ПО АВТОМАТИЗАЦІЇ ГІРНИ-  ЧИХ МАШИН АВТОМАТГІРМАШ  (UA)  Патент опубліковано 29.09.1995, бюл. №  3/1995</p>	
ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	<p>(11) Номер патенту: 5655  (21) Номер заявки: 20040706270</p>	патент не діє

ІСКРОБЕЗПЕКИ ЛІНІЙ, ЩО ЖИ- ВЛЯТЬ ІНДУК- ТИВНЕ НАВАН- ТАЖЕННЯ	(22) Дата подання заявки: 27.07.2004 (24) Дата, з якої є чинними права: 15.03.2005 (51) МПК (2011.01): E21F 9/00 (72) Винахідник: Колосюк Володимир Петрович (UA); Діденко Валерій Петро- вич (UA); Колосюк Андрій Володимиро- вич (UA) (73) Власник: ДЕРЖАВНИЙ МАКІЇВСЬКИЙ НАУКОВО- ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ З БЕЗПЕКИ РОБІТ У ГІРНИЧІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ (UA) Патент опубліковано 15.03.2005, бюл. № 3/2005	
ІСКРОБЕЗОПА- СНОЕ УСТРОЙ- СТВО ЭЛЕКТ- РОПИТАНИЯ	(19) RU(11) 2305190 (13) C1 (51) МПК E21F9/00 (2006.01) H02H9/04 (2006.01) (21), (22) Заявка: 2006108881/09, 22.03.2006 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 22.03.2006 (45) Опубликовано: 27.08.2007 (72) Автор: (73) Патентообладатель Нейман Владимир Борисович (RU)	по данным на 07.11.2011 - может пре- кратить свое действие
ІСКРОБЕЗОПА- СНАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОН- НОГО ПИТАНИЯ ИДЕНТИФИКА- ТОРОВ АВТО- МАТИЗИРО- ВАННЫХ СИС- ТЕМ ТАБЕЛЬ- НОГО УЧЕТА	(19) RU(11) 2296222 (13) C1 (51) МПК E21F9/00 (2006.01) (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ (21), (22) Заявка: 2005123179/03, 21.07.2005 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 21.07.2005 (30) Конвенционный приоритет: 11.04.2005 (п.1) UA 200503398 (45) Опубликовано: 27.03.2007 (72) Автор(ы): Терещенко Валерий Ни- колаевич (UA)  (73) Патентообладатель(и): ООО "НПП Агентство маркетинговых исследований АМИ (UA)	по данным на 07.11.2011 - действует
High efficiency intrinsically safe power supply	US 005365420A Patent number: 5365420 Filing date: Jun 14, 1993 Issue date: Nov 15, 1994 Inventor: Gary R. Cadman Original Assignee: Scully Signal Company Current U.S. Classification 363/50 International Classification H02M 710	
Intrinsically safe universal switching	US 6590788(B2) Applicants	



power supply - Patent	SIEMENS MILLTRONICS PROCESS Inventors MERCIER CLAUDE Classification Codes H05K3/46, H02M7/217, H05K1/16	
PROTECTIVE CIRCUIT FOR INTRINSICALLY SAFE ELECTRO- MAGNETIC AC- TUATORS, AND PROTECTIVE CIRCUIT FOR INTRINSICALLY SAFE ENERGY SUPPLY SYS- TEMS	US 2006/0181156 A1 Patent #: 7872846 Issue Dt: 01/18/2011 Appli- cation #: 11341112 Filing Dt: 01/27/2006 Application number: 11/341,112 Inventors: Jens Titschert, Achim Sondermann Current U.S. Classification 307/130 Issued patent: US7872846 (Issue date Jan 18, 2011)	
Intrinsically-safe power supply device for mining	Page bookmark CN 101867298 (A) Pub- lication date: 2010-10-20 Inventor(s): ZHIJIAN FAN; GUORUI LIU; BINGNI QU; JIANCHENG SONG; MUQIN TIAN; CHUNYU XU + Applicant(s): UNIV TAIYUAN TECH- NOLOGY + Classification: - international: H02H7/10; H02H9/04; H02M1/44; H02M3/335	
Explosion-proof and intrinsically- safe heavy-current output power sup- ply for mining	Page bookmark CN 201590770 (U) Publication date: 2010-09-22 Inventor(s): XIAOLONG FENG; CHAOHUI HUANG; JIANSHENG QIAN; HONGJIAN WANG; XING WANG + Applicant(s): XUZHOU ZHONGKUANG DAHUAYANG COMMUNICATION EQUIPMENT CO LTD + Classification: nternational:H02M1/14; H02M1/36; H02M7/12	

**Форма Г.1.4 Техніко-економічні показники ОГД та об'єктів аналогічного  
призначення**

Найменування та одиниці виміру	Техніко-економічні показники			
	об'єкта за стандартом або технічними умовами	об'єкта-аналога (держава, фірма, організація, модель, рік освоєння) США, SIEMENS MILLTRONICS PROCESS., US006590788B2	ОГД	перспективного зразка
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Іскробезпечна потужність, Вт</b>	-	<b>36</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
<b>Напруга живлення, В</b>	-	<b>9 - 35</b>	<b>70</b>	<b>9-70</b>
<b>Індуктивність навантаження, мГн</b>	-	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

**Форма Г.1.5 Аналіз новизни, винахідницького рівня та промислової придатності ОГД**

ОГД, його складові частини		Прототип		Очікуваний результат	Можливості використання у промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
1	2	3	4	5	6	7
Система електропередачі підвищеної надійності для вибухонебезпечних виробництв.	Система електропередачі підвищеної надійності для силових та іскробезпечних мереж на основі випереджального вимикання при аварійних режимах.	Patent US6590788(B2) Classification Codes H05K3/46, H02M7/217, H05K1/16 Filed: Jan 14, 2002 Published: Jul 08, 2003 Prior Publication US 2002/0154520 A1, Oct. 24, 2002 Intrinsically safe universal switching power supply	Система безпечної електропередачі для вибухонебезпечних підприємств, що забезпечує іскробезпеку за рахунок вимикання аварійних режимів.	Підвищення іскробезпечної потужності для іскробезпечності та безпеки силових електричних мереж вибухонебезпечних підприємств.	Можливе використання у таких галузях промисловості, як гірнична, хімічна, нафтопереробна та інш.	Готується заявка на винахід.

**Форма Г.2.4 Аналіз можливості застосування в ОГД відомих  
об'єктів промислової власності**

<b>ОГД, його складові ча- стини</b>	<b>Документи на об'єкти промислової власності (бібліографічні дані)</b>	<b>Суть об'єкта промислової власності</b>	<b>Очікуваний результат від застосування</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Модуль перетворювання АС/ДС з блоками струмообмеження та стабілізації.	<p>Page bookmark CN 201590770 (U) - Explosion-proof and intrinsically-safe heavy- current output power supply for mining Publication date: 2010- 09-22 Inventor(s): XIAOLONG FENG; CHAOHUI HUANG; JIANSHENG QIAN; HONGJIAN WANG; XING WANG + Applicant(s): XUZHOU ZHONGKUANG DAHUAYANG COMMUNICATION EQUIPMENT CO LTD + Classification: - international: H02M1/14; H02M1/36; H02M7/12 Application number: CN20092049035U 20091013 Priority number(s): CN20092049035U 20091013</p>	Вхідна змінна напруга 127 В перетворюється в вихідну стабілізовану напругу 20 В за допомогою блоків перетворювання АС/ДС, струмообмежуючих кіл та модулів стабілізації напруги.	Підвищення іскробезпечної потужності та безпеки використання в процесі часткового застосування з новим створеним технічним рішенням.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

О.С.Бешта

" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 р.

## ДОВІДКА

про оцінку науково-технічного рівня результатів НДР ГП-345

«Дослідження системи контролю струморозподілу однопотенціальних віток мережі електропередачі підвищеної надійності»

(шифр та назва теми)

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Найменування та одиниця виміру	Значення техніко-економічних показників	
	кращого аналога	розробленого об'єкту
Іскробезпечна потужність, Вт	36	50
Напруга живлення, В	9 - 35	9-70
Індуктивність навантаження, мГн	1	1

Відомості НОУ-ХАУ особливі рішення по випереджальному вимиканню мереж та пристроїв живлення вибухонебезпечних підприємств.

## ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ НДР

\_\_\_\_\_ перевищує сучасний рівень науки і техніки

(відповідає сучасному рівню науки і техніки, перевищує, не відповідає)

Керівник ПЛВ

Керівник НДР

\_\_\_\_\_ Філонова О.О.

" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 200\_\_ р.

### **Висновки:**

Був виконаний патентний пошук за джерелами науково-технічної літератури та патентної документації відповідно регламенту в обсязі фонду технічної бібліотеки, патентного відділу НГУ та міжнародних патентних організацій. В процесі часткового застосування результатів патентного пошуку з новим створеним розробниками конструктивним рішенням системи контролю струморозподілу однопотенціальних віток мережі електропередачі підвищеної надійності отримано підвищення іскробезпечної потужності, а також зменшення рівня іско- та вибухонебезпеки. В системі контролю струморозподілу однопотенціальних віток мережі електропередачі використані особливі рішення (НОУ-ХАУ) по випереджальному вимиканню мереж та новітні розробки для пристроїв живлення вибухонебезпечних підприємств.

## Додаток Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 директор проектно – конструкторського  
 технологічного інституту  
 ВАТ «Дніпроважмаш» Драгомірецький Ю.О.  
 20.07.2010 р.



## АКТ

про впровадження результатів наукової теми ГП-435  
 «Підвищення ефективності використання електроенергії в  
 технологічних системах»

Цим підтверджуємо, що результати наукової теми ГП-435 використовуються на ВАТ «Дніпроважмаш» при аналізі та формуванні електричних режимів нагрівальних установок (електропечей опору), які застосовуються на виробництві для термічної обробки деталей. Особливо важливими, і тому практично корисними, вважаємо результати:

- запропоновані в темі ГП-435 неповнофазні режими електроспоживання печей опору дозволили підвищити енергетичні показники приймачів електроенергії;

- ефективність регулювання режимів електропечей залежить від співвідношення потужності самої печі та іншого трифазного навантаження.

Застосування запропонованих режимів електропечей призводить до підвищення середніх енергетичних коефіцієнтів у межах: 0,76 для  $k_m$ ; 0,81 для  $k_c$ ; 0,835 для  $k_w$ .

## Додаток В

Витяг з протоколу № 12 засідання кафедри систем електропостачання від 09 грудня 2011р.

ПРИСУТНІ: академік НАН України, проф. Півняк Г.Г., професори: Випанасенко С.І., Заїка В.Т., Білий М.М., доценти: Зражевський Ю.М., Корольов А.М., Рухлов А.В., Олішевський Г.С., Кириченко В.В., , ст. викладач Ковальов О.Р., асистенти: Кольцов І.Б., Рухлова Н.Ю., Бобров О.В., Лисенко О.Г., Румянцев А.С.

СЛУХАЛИ: інформацію докт. техн. наук, професора Випанасенка С.І., відповідального виконавця теми ГП-435 „Підвищення ефективності використання електроенергії в технологічних системах”, про заключний звіт.

ПОСТАНОВИЛИ: 1. Науково-дослідна робота виконана у відповідності з технічним завданням та календарним планом у повному обсязі.  
2. Результати НДР відповідають сучасному рівню науки та техніки.  
3. Заключний звіт по темі ГП-435 схвалити та рекомендувати до затвердження.

Заст. зав. кафедрою СЕП,  
д-р. техн. наук, професор

С.І. Випанасенко

Вчений секретар кафедри

Ю.В. Хацкевич



## Додаток Г

## ВИТЯГ З ПРОТОКОЛУ № 3

засідання секції науково-технічної ради університету за науковим напрямом  
«Проблеми гірничої та металургійної електроенергетики, енергозбереження»

м. Дніпропетровськ

12 грудня 2011 г.

## ПРИСУТНІ:

голова ради, професор Іванов О.Б., професори: Шкрабець Ф.П., Казачковський М.М.,  
Випанасенко С.І., Корсун В.І., доц. Рухлов А.В.

СЛУХАЛИ: вед. наук. співробітника Випанасенко С.І., відповідального виконавця теми  
ГП-435 „Підвищення ефективності використання електроенергії в технологічних сис-  
темах ", про заключний звіт науково-дослідної роботи за 2011 рік. Викладені отрима-  
ні результати, основні із них є:

- досягнуто покращення показників існуючих технологій індукційної передачі енергії рухомому складу, розпресовування з'єднання циліндричних деталей, технологій термообробки деталей із використанням печей опору.;
- створено методики розрахунків швидкодіючих силових комутаторів мережі електропередачі стосовно до умов їх експлуатації;
- розроблено нові принципи проектування потужних електроприводів із синхронними двигунами з бажаними пусковими властивостями в умовах номінального навантаження та істотно зниженої напруги збудника.

За результатами роботи було опубліковано 5 статей. По звітній НДР захищена одна дисертація Дрешпак Н.С.

ВИСТУПИЛИ: професор Шкрабець Ф.П., який дав задовільну оцінку результатів викона-  
ної роботи. Він відмітив, що зміст виконаних досліджень відповідають етапам кален-  
дарного плану, а наукові і практичні результати – меті НДР. Рекомендовано заключ-  
ний звіт по НДР затвердити.

ПОСТАНОВИЛИ: 1. Науково-дослідна робота виконана відповідно технічному завдання  
та календарному плану робіт у повному обсязі.

2. Науково-технічний рівень розробки відповідає сучасному рівню науки і техніки.  
Робота містить наукові і практичні результати, які є основою для обґрунтування енер-  
го-ресурсоберігаючих режимів і ефективності використання електроенергії в техно-  
логічних системах.

3. Матеріали, що викладені в звіті, не містять відомості, які можуть бути віднесені до  
державної таємниці.

4. Заключний звіт схвалити і рекомендувати до затвердження.

Голова секції,  
професор

О.Б. Іванов

Вчений секретар,  
доцент

А.В. Рухлов

## Додаток Д

### РЕЦЕНЗІЯ

на звіт по науково-дослідній роботі ГП-435

« Обґрунтування енергоресурсо-зберігаючих режимів і принципів керування електроенергетичних комплексів гірничо-металургійних підприємств »

Робота, що рецензується, проведена в 2010-2011 році, та спрямована на підвищення ефективності використання електроенергії в технологічних системах.

В результаті виконаної роботи розроблено методика та пристрій для забезпечення однорідності магнітного поля при розпресовуванні циліндричних деталей, обґрунтовано режим нагрівання при ліквідації натягу посадки, досліджені процеси в тяговій мережі, електричні навантаження печей опору та коефіцієнти попиту для повнофазного та неповнофазного режимів, завдання симетрування навантаження. Це поліпшує режими експлуатації та показники енергоефективності технологічних процесів, очікується суттєва економія енергоносіїв та зменшення викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище. Досягнуто покращення показників існуючих технологій індукційної передачі енергії рухомому складу, розпресовування з'єднання циліндричних деталей, технологій термообробки деталей із використанням печей опору.

Розроблено методи контролю струморозподілу однопотенціальних гілок з метою випереджального вимикання при їх розриві та виявлення короткого замикання на початкових стадіях, схеми комутаторів для електропередачі підвищеної надійності, методи їх самоналагодження та самоконтролю, структурна та принципова схеми електропостачання підвищеної надійності, що дозволить підвищити рівень безпеки на вибухонебезпечних виробництвах. Внаслідок виконання проекту створено методики розрахунків швидкодіючих силових комутаторів мережі електропередачі стосовно до умов їх експлуатації.

За мінімального запасу потужності забезпечено надійний запуск двигунів з мінімальним пусковим струмом за зниженої напруги живлення, розроблено принципи формування їх динамічних властивостей шляхом оптимізації конструктивних параметрів та алгоритмів програмного керування збудниками. Розроблені рекомендації щодо створення електроприводів, які забезпечать запуск із номінальним навантаженням за знижених напруги, струмів і втрат в елементах мережі живлення. Розроблено нові принципи проектування потужних електроприводів із синхронними двигунами з бажаними пусковими властивостями в умовах номінального навантаження та істотно зниженої напруги збудника, програмні продукти для оптимізації вибору параметрів демпферної обмотки, системи збудження та її активного опору, методичні рекомендації щодо їх використання в конкретних умовах. Надані рекомендації щодо розробки потужного синхронного комплектного електропривода з підвищеною енергетичною ефективністю та надійністю.

Рецензент  
канд. техн. наук  
професор

М.В. Рогоза