

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Ефективність функціонування синхронних двигунів як засіб
компенсації реактивної потужності в мережах підприємств**

Виконав: студент (ка) 2 курсу, групи ЕТмз-61

спеціальності 141—

електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Тишко В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Буняк О.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕІ
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
“ 24 ” листопада 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Тишку Владиславу Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Ефективність функціонування синхронних двигунів як засіб компенсації реактивної потужності в мережах підприємств

Керівник роботи Буняк Олег Андронікович, к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від “24” листопада 2025 р. № 4/7-1023

2. Термін подання студентом завершеної роботи 15 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Каталожні дані синхронного високовольтного двигуна СТД-630-2: $U_{\text{НОМ}} = 6.0 \text{ кВ}$; $P_{\text{НОМ}} = 630 \text{ кВт}$; $I_{\text{НОМ}} = 70.7 \text{ А}$;

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналітичний розділ. 2. Розрахунково-дослідницький розділ. 3. Проектно-конструкторський розділ. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Аналіз споживачів та джерел реактивної потужності на виробництвах. Оцінка застосування асинхронних двигунів для компенсації реактивної потужності. Математичний опис синхронної машини. Основні рівняння моделі. Оцінка здатності синхронних двигунів до компенсації реактивної потужності. Комп'ютерна модель синхронного двигуна. Результати комп'ютерного моделювання в середовищі MatLab/Simulink.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гурик О.Я., к.т.н., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С, старший викладач		

7. Дата видачі завдання 24 листопада 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та патентний пошук	15.09.25 - 01.11.25	
2	Аналітичний розділ	15.10.25 - 01.11.25	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	15.10.25 - 01.11.25	
4	Проектно-конструкторський розділ	15.10.25 - 01.11.25	
5	Заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	15.10.25 - 01.11.25	
6	Формування пояснювальної записки та плакатів по кваліфікаційній роботі	01.11.25 - 15.12.25	
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи	15.12.25 -20.12.25	

Студент

(підпис)

Тишко В.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Буняк О.А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТмз-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2025.

У кваліфікаційній роботі проведений аналіз характеристик споживачів і джерел реактивної потужності в електричній мережі щодо застосування синхронного двигуна як ефективного засобу регулювання реактивної складової.

Подана математична модель, що істотно спрощує аналіз електромеханічних процесів у синхронному двигуні.

Побудована комп'ютерна модель, яка забезпечує можливість детального аналізу процесів керування синхронним двигуном і дає змогу визначити оптимальні параметри його регулювання.

Проведені дослідження показали, що система керування ефективно реагує на зміни навантаження.

Ключові слова: синхронний двигун, реактивна потужність, математична модель, комп'ютерна модель.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Аналіз споживачів та джерел реактивної потужності на виробництвах ...	9
1.2 Застосування синхронних двигунів для компенсації реактивної потужності	14
1.3 Аналіз систем автоматичного регулювання збудження	16
1.3.1 Синхронні компенсатори	16
1.3.2 Синхронні двигуни	18
1.3.3 Автоматичний регулятор збудження	19
1.4 Висновки до першого розділу	21
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	23
2.1 Математичний опис синхронної машини	23
2.2 Опис системи рівнянь синхронного двигуна з використанням рівнянь Парка-Горєва	27
2.3 Дослідження здатності синхронних двигунів до компенсації реактивної потужності	30
2.5 Висновки до другого розділу.....	37
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	38
3.1 Оцінка MatLab Simulink як засобу моделювання енергетичних систем ...	38
3.2 Комп'ютерна модель синхронного двигуна в пакеті Matlab Simulink	40
3.2.1 Модель синхронного двигуна	40
3.2.2 Модель обмотки збудження та системи вимірювання	43
3.3 Висновки до третього розділу	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	50
4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електродвигунів	50
4.2 Надання першої допомоги при враженні електричним струмом	51

4.3 Оцінка стійкості роботи електричних мереж до дії проникаючої радіації та радіоактивного забруднення	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	58

ВСТУП

Актуальність теми.

Ефективність функціонування промислових підприємств у великій мірі залежить від значення споживаної реактивної потужності, тобто, наскільки ефективно електрична енергія використовується в системі.

Зростання споживання реактивної потужності крім зростання струмів в мережі призводить до зниження коефіцієнта потужності, що має негативні наслідки [1, 2, 3]:

По-перше, це призводить до втрати енергії в мережах, що виникає через непотрібну реактивну потужність та спричиняє додаткові втрати для промислових підприємств.

По-друге, це призводить до зростання навантаження на мережу, що викликає перевантаження та, відповідно, зниження надійності роботи системи електропостачання.

Підвищення коефіцієнта потужності у системі електропостачання має певні переваги [2,3]:

По-перше, це дозволяє більш ефективно використовувати електричну енергію, що призводить до зниження втрат, покращення економічної ефективності.

По-друге, зростання надійності роботи системи електропостачання за рахунок запобігання перевантаженню в мережі та покращення якості електричної енергії.

Для підвищення коефіцієнта потужності у системі електропостачання застосовуються різні методи та технології. Одним із них є використання компенсаційних пристроїв – батареї конденсаторів, які, компенсують реактивну потужність і тим самим підвищують коефіцієнт потужності [1, 2, 3].

Також, важливим методом є оптимізація роботи обладнання та застосування енергозберігаючих технологій, що включає використання ефективних двигунів з високим коефіцієнтом потужності, регулювання

навантаження, встановлення інтелектуальних систем управління та моніторингу енергоспоживання.

Отже, забезпечення оптимальних величин перетоків реактивної потужності – актуальне завдання для промислових підприємств, що дозволяє не тільки підвищити ефективність використання електроенергії, а й знизити навантаження на мережу з покращенням надійності роботи електричних систем.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є оцінка ефективності використання синхронних двигунів для компенсації реактивної потужності.

Відповідно до мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз споживачів і джерел реактивної потужності на підприємствах;
- провести аналіз використання синхронних двигунів для компенсації реактивної потужності;
- дослідити здатність синхронних двигунів до компенсації реактивної потужності;
- провести математичний опис синхронної машини для спрощення чисельного моделювання;
- провести побудову комп’ютерної моделі синхронного двигуна для оцінки ефективності компенсації реактивної потужності в мережі підприємства.

Об’єкт дослідження – процеси в системах розподілення та електропостачання.

Предмет дослідження – оцінка ефективності компенсації реактивної потужності в мережі синхронними двигунами.

Наукова новизна отриманих результатів.

- отримало подальший розвиток застосування засобів компенсації для зниження перетоків реактивної потужності в мережі.

Практичне значення отриманих результатів. Запропонована комп’ютерна модель дає можливість аналізувати та визначати параметри налаштування системи керування синхронним двигуном.

Апробація.

Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на Міжнародній науково-технічній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (28-29 травня 2025 року), Тернопіль, Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (24 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 60 сторінок, 2 таблиці, 20 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз споживачів та джерел реактивної потужності на виробництвах

В переважній більшості реактивна потужність виникає через індуктивність та ємність електричних пристроїв: асинхронні двигуни, трансформатори, конденсаторні установки, де не відбувається виконання корисної роботи, але є необхідність додаткової енергії для підтримки магнітних полів в електричному обладнанні [1-3]. Частина реактивної потужності йде як втрати на елементах електричної мережі: трансформаторах і лініях електропередачі. На частині виробництв, споживачами реактивної потужності є перетворювальні установки та дугові печі [1].

Зростання реактивної потужності призводить до зниження коефіцієнта потужності, що призводить до непродуктивного використання енергії та зростання навантаження на мережу (рис.1.1) [2].

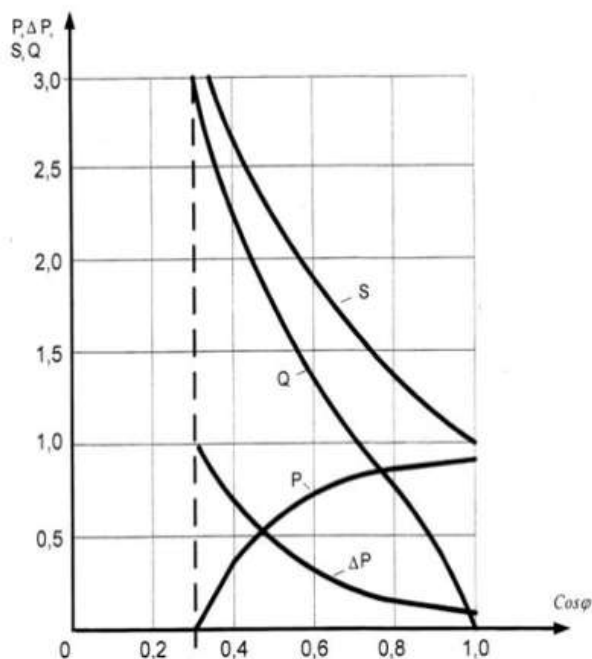


Рисунок 1.1 – Оцінка впливу значення коефіцієнта потужності на складові потужності мережі промислового підприємства.

Тобто, відповідне зниження коефіцієнта потужності має негативні наслідки: втрати енергії в мережах, які виникають через непотрібну реактивну потужність, що спричиняє додаткові витрати для підприємств; зростання навантаження на мережу, що викликає перевантаження та зниження надійності роботи системи електропостачання [2].

Нормативні значення коефіцієнта потужності в мережі залежать від енергетичних норм і стандартів. Зазвичай оптимальне значення коефіцієнта потужності становить 0.92 та вище [1, 9] .

Для зниження описаних факторів, що пов'язані з передачею реактивної потужності у системі електропостачання застосовуються різні методи та технології безпосередньо на місці споживання.

Одним із них є використання компенсаційних пристроїв, таких як статичні конденсатори, які компенсують реактивну потужність, збільшуючи активну потужність, і тим самим підвищуючи коефіцієнт потужності [1]. Батареї конденсаторів (БК) працюють виключно як генератори реактивної потужності, мають малі втрати за активною складовою ($0.0025 - 0.005 \text{ кВт/кВАр}$) [5], більш прості в експлуатації.

Але, попри переваги, статичні конденсатори мають суттєві недоліки [5]:

- значення реактивної потужності пропорційно квадрату напруги, що знижує стійкість системи електропостачання, а як аварійний режим – лавиноподібне зростання напруги;

- дискретне регулювання реактивної потужності ввімкненням або вимкненням секцій конденсаторів, що при, як правило, нерівномірному добовому графіку, спричиняє надлишкову або недостатню компенсацію. В цьому випадку необхідно за рахунок зменшення потужності ступенів збільшувати їх число, що призводить до зростання капітальних витрат на захисне та регулювальне обладнання (рис.1.2).

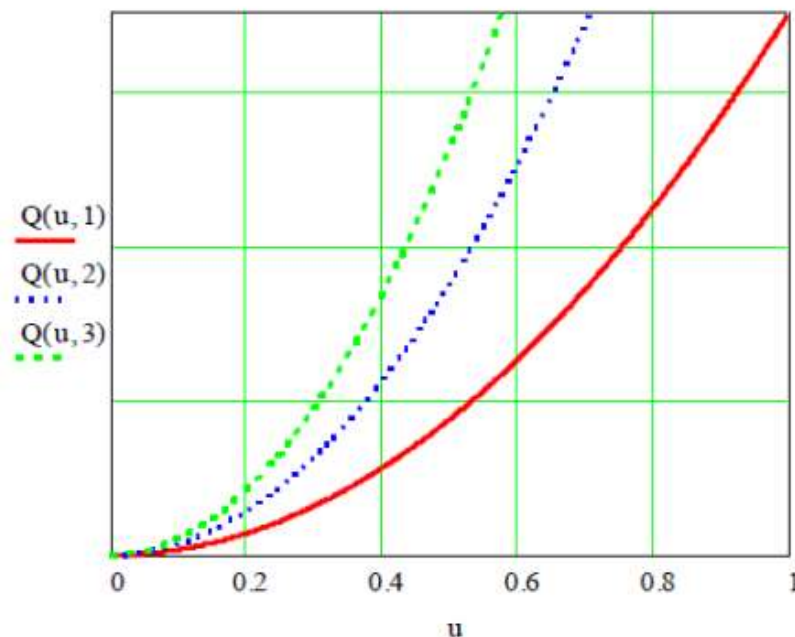


Рисунок 1.2 – Статичні характеристики трьох секційної КУ [6].

Також, як недолік, слід відмітити перегрівання КУ при підвищенні напруги та/або наявності гармонік вищих порядків в мережі, що призводить до пошкодження конденсаторів. Використання фільтрокомпенсуючих також призводить до підвищення вартості установки [6-8].

Окрім цього, в робочому режимі БК чутливі до кидків струму та перенапруги, що обмежує використання вимикачів (контакторів).

Також, важливим методом щодо підвищення коефіцієнта потужності, є оптимізація роботи обладнання та застосування енергозберігаючих технологій. Це може включати використання ефективних двигунів з високим коефіцієнтом потужності, регулювання навантаження, встановлення інтелектуальних систем управління і моніторингу енергоспоживання [7].

Підвищення коефіцієнта потужності у системі електропостачання має безліч переваг: дозволяє більш ефективно використовувати електричну енергію, що призводить до зниження витрат і покращення економічної ефективності (рис.1.1) та покращує надійність роботи системи електропостачання, запобігаючи перевантаженню мережі та покращенню якості електричної енергії [1, 7].

Державне регулювання коефіцієнта потужності в електричній мережі є одним із важливих завдань енергетичної політики кожної держави. Коефіцієнт потужності відображає співвідношення між реактивною та активною потужністю в електричній системі.

Державне регулювання коефіцієнта потужності спрямоване на зниження втрат енергії в електричній мережі та підвищення її ефективності та здійснюється шляхом запровадження нормативів для коефіцієнта потужності, значення яких споживачі електроенергії зобов'язані дотримуватися [7, 9].

Державне регулювання також включає обов'язкове встановлення обладнання, такого як компенсаційні пристрої, для поліпшення коефіцієнта потужності в електричній мережі [10].

Отже, регулювання коефіцієнта потужності в електричній мережі є невід'ємною частиною енергетичної політики держави та спрямоване на підвищення ефективності енергоспоживання та покращення якості електропостачання, що є важливим фактором для сталого розвитку енергетики та економіки загалом [7].

Для підвищення або забезпечення оптимального значення коефіцієнта потужності та, відповідно, зменшення навантаження електромереж реактивною потужністю на підприємствах використовують поперечну компенсацію реактивної потужності (*ПКРП*). Натомість, відсутність такої компенсації призводить до ряду негативних наслідків [10]:

- зростання реактивного навантаження зменшує пропускну здатність трансформаторів і ліній електропередачі (*ЛЕП*);
- підвищення потужності збільшує струм у мережі, що спричиняє додаткові втрати потужності, які зростають пропорційно квадрату струму;
- збільшення струму вимагає застосування проводів (кабелів) з більшим перерізом, що, у свою чергу, призводить до підвищує капітальних витрат на модернізацію електричних мереж;
- підвищений струм викликає зростання втрат напруги на всіх ділянках енергосистеми, що призводить до зниження напруги на споживачах;

– зниження напруги на підприємствах негативно впливає на роботу електрообладнання: зменшується його ефективність, знижується світловий потік ламп, скорочується термін служби обладнання, погіршується робота внутрішніх мереж підприємства та, як наслідок — зниження якості продукції та збільшення витрат на електроенергію.

– впровадження компенсаційних пристроїв зменшує струм у *ЛЕП*, завдяки чому знижується навантаження на трансформатори. Крім того, зменшення переданої реактивної потужності сприяє зниженню втрат напруги, як активної, так і реактивної потужності, що пов'язані з її передачею. Застосування *ПКРП* дозволяє підвищити рівень напруги в точці ввімкнення та, як результат, покращує якість електричної енергії.

Схема заміщення ланки з активно-індуктивним навантаженням лінії мережі з паралельно ввімкненою ємністю (рис. 1.3) та, відповідно, побудована векторна діаграма для ланки з поперечною компенсацією (рис.1.4) показала, що при ввімкненні ємності, кут навантаження (φ_L) знижується, відповідно знижується струм і розвантажується *ЛЕП* [8].

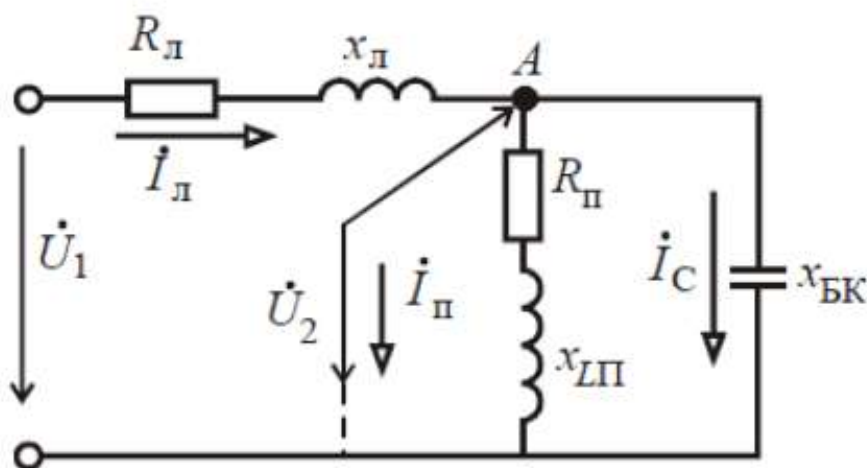


Рисунок 1.3 – Схема заміщення ланки мережі при паралельно ввімкненій ємності.

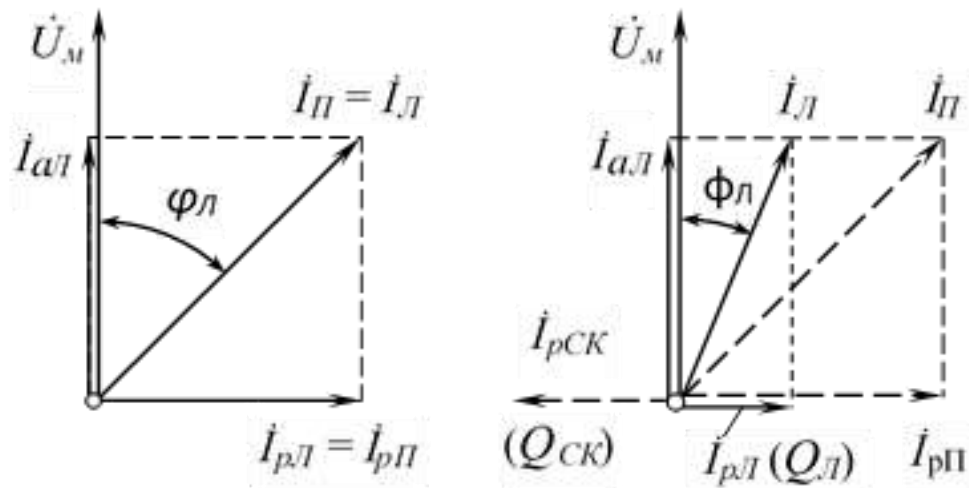


Рисунок 1.4 – Щодо встановлення *СК* в електричній мережі [2].

Окрім цього, будуть знижуватися й втрати напруги в мережі:

$$\Delta U = \frac{P_{нав.} \cdot R + (Q_{нав.} - Q_{КУ}) \cdot X}{U},$$

а втрати напруги до компенсації: $\Delta P_1 = \frac{P_{нав.}^2 + Q_{нав.}^2}{U^2} \cdot R$, та після компенсації:

$$\Delta P_2 = \frac{P_{нав.}^2 + (Q_{нав.} - Q_{КУ})^2}{U^2} \cdot R.$$

1.2 Застосування синхронних двигунів для компенсації реактивної потужності

Синхронні двигуни (*СД*) використовуються для компенсації реактивної потужності (*КРП*) в електричних системах.

СД мають ряд переваг та недоліків, які слід враховувати при їх застосуванні. Одна з головних переваг – високий коефіцієнт потужності, що робить їх ідеальним вибором для *КРП* в електричних системах. Також, *СД* мають стабільну швидкість обертання, що дозволяє встановлювати їх в системах, які вимагають постійної швидкості обертання, наприклад, в генераторах або водозабірних насосах [1,2]. Крім того, *СД* відрізняються високою ефективністю

та можуть мати компактні розміри, що дозволяє їх розміщення в обмеженому просторі.

Серед недоліків *СД* можна виділити їхню високу вартість і складність управління [10]. Під час роботи *СД* вимагають використання зовнішнього джерела постійного струму для ланки збудження, що збільшує собівартість і рівень складності системи. Також, недоліком є те, що *СД* володіють низьким пусковим моментом, що ускладнює їх застосування у випадках запуску великих інертних навантажень [2].

Однак, незважаючи на описані недоліки, *СД* є одними з найбільш ефективних та універсальних варіантів для електричних мереж промислових підприємств, завдяки високій точності управління, ефективності та здатності компенсувати реактивну потужність.

Режими роботи *СД* залежать від їх застосування та особливостей системи. Одним із основних режимів роботи *СД* є режим з постійним струмом збудження. У цьому режимі синхронний двигун працює як генератор під постійним навантаженням, забезпечуючи стабільну (постійну) вихідну потужність. Цей режим зазвичай використовується в генераторах, водозабірних насосах та інших енергетичних системах, які потребують постійної вихідної потужності [2].

Іншим поширеним режимом роботи *СД* є режим із регульованим збудженням. У цьому режимі синхронний двигун може контролювати величину реактивної потужності встановлювати значення відповідно до потреб системи. Цей режим застосовується для *КРП*, управління напругою та забезпечення стабільної роботи енергетичної системи в цілому [2, 6].

Також *СД* можуть працювати як двигун в системі електроприводу для механізмів, які вимагають постійну швидкість або як синхронний компенсатор (*СК*) потужності. Крім того, існують спеціальні режими роботи *СД*, наприклад, режими синхронного запуску та синхронного гальмування, які можуть використовуватися в специфічних системах, таких як електричні тягові системи [2, 7].

Таким чином, режими роботи *СД* визначаються різними умовами та потребами електричних систем.

Одним із способів *КРП* є використання *СД*, які мають здатність генерувати реактивну потужність у тому напрямку, що й реактивна потужність навантаження, що знижує рівень реактивної потужності в електричній системі. При цьому, *СД* можуть працювати в режимі з генерацією реактивної потужності або бути під'єднані до мережі та працювати в режимі компенсації [12].

Таким чином, застосування *СД* для компенсації реактивної потужності може сприяти підвищенню ефективності електричних систем та зменшенню втрат енергії, що є важливим аспектом у сучасній енергетиці.

1.3 Аналіз систем автоматичного регулювання збудження

1.3.1 Синхронні компенсатори

Синхронні компенсатори (*СК*) – це використання *СД* для компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Вони працюють шляхом генерації реактивної потужності, що компенсує реактивне споживання енергії в системі, покращуючи таким чином коефіцієнт потужності та ефективність використання електроенергії [6].

Основним компонентом *СК* є синхронний двигун, який працює в режимі генератора реактивної потужності на холостому ході. Переваги синхронних компенсаторів полягає в їх здатності працювати з випереджаючим і відстаючим по відношенні до напруги мережі струмом, більш широкі межі регулювання в порівнянні з *СД*, полегшена конструкція конструктивного виконання.

Встановлення *СК* – практичне рішення щодо покращення енергоефективності та запобігання негативним ефектам, що пов'язані з низьким коефіцієнтом потужності в електричних мережах, та допомагають уникнути штрафів за некоректне значення коефіцієнта потужності, покращують стабільність напруги та зменшують втрати енергії у системі.

Таким чином, *СК* потужності є важливим засобом для покращання коефіцієнта потужності, підвищення ефективності використання електроенергії та підтримки стабільності електричних мереж [6].

СК можуть працювати як у режимі генерації реактивної потужності, так і в режимі її споживання, що визначається величиною поданого на обмотку ротора струму збудження (рис. 1.5). У відповідності до схеми заміщення (1.4, а), побудовані відповідні векторні діаграми (рис. 1.5, б, в), де показано, що при перезбудженні *СК* працює як «джерело» реактивної потужності та видає її в мережу; при недозбудженні *СК* «споживає» реактивну потужність з мережі [6].

Аналіз літературних джерел [6, 12] дозволяє встановити, що основними перевагами *СК* є:

- позитивний ефект регулювання, тобто, при зниженні напруги мережі генерована потужність *СК* зростає;

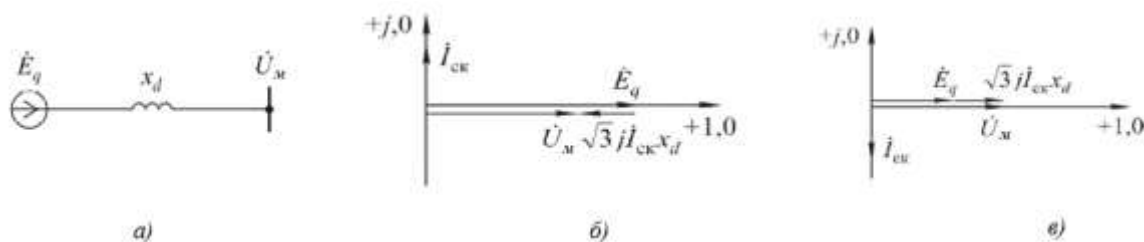


Рисунок 1.5 – Режими роботи *СК* :

а) – схема заміщення; б) режим перезбудження; в) режим недозбудження.

- широкий діапазон регулювання;
- висока як термічна так і електродинамічна стійкість обмоток *СК* при коротких замиканнях;
- можливість відновлення пошкоджених частин *СК* при ремонтних роботах.

Але, застосування *СК* в мережах промислового підприємства недоцільне, враховуючи високі втрати активної потужності ($10 - 30 \text{ Вт/кВАр}$) в порівнянні

з іншими пристроями *КРП* та більшою питомою вартістю на 1 *кВАр* реактивної потужності.

Крім цього, важливо відзначити, що встановлення та налаштування *СК* вимагає професійного підходу [6, 12] та має проводитися відповідно до вимог та характеристик конкретної електричної мережі. Крім того, необхідно забезпечити регулярне технічне обслуговування та моніторинг, щоб гарантувати їх надійну та ефективну роботу протягом усього терміну експлуатації.

1.3.2 Синхронні двигуни

Синхронні двигуни (*СД*), як правило, встановлюються на промислових підприємствах, для використання як «джерело» реактивної потужності, з можливістю забезпечувати номінальний випереджаючий $\cos \varphi = 0.9$ та є досить ефективним засобом *КРП* (рис. 1.6) [13].

Ліва частина характеристики (рис. 1.6) відповідає режиму недозбудження *СД*, при якому споживається з мережі реактивна потужність. Найменш можлива величина збудження *СД* визначається штриховою лінією *DKF* (рис.1.6) для різних значень потужності, як межа виходу машини з синхронізму [2].

Права частина характеристики (рис.1.6) відповідає режиму перезбудження *СД*, при якому видається реактивна потужність в мережу. Найбільш можлива величина збудження *СД* визначається допустимою температурою нагріву обмотки ротора з витримкою, а величина генерованої реактивної потужності залежить від завантаження *СД* активною потужністю [13].

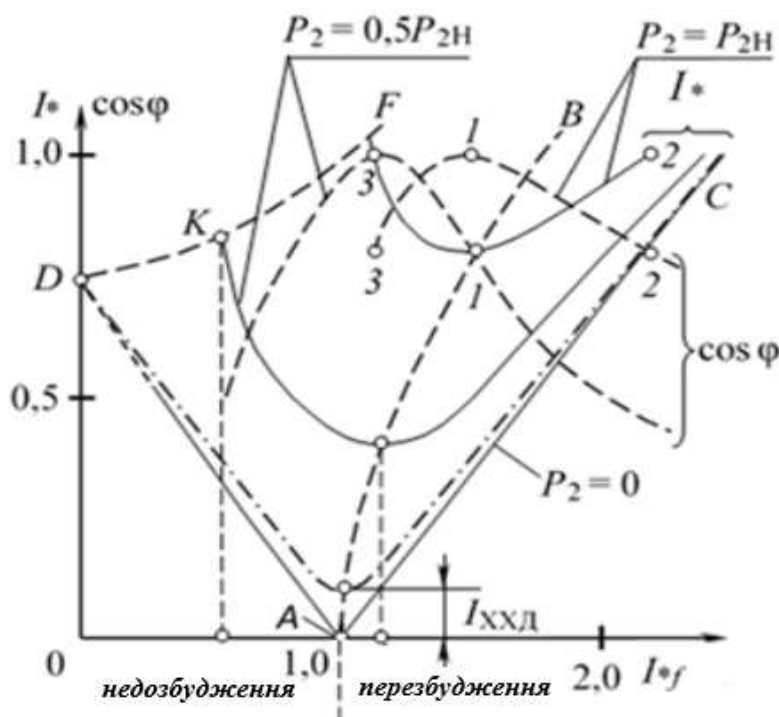


Рисунок 1.6 – Характеристики синхронного двигуна.

Питомі втрати активної потужності на генерацію реактивної потужності суттєво залежать від номінальної потужності та частоти обертання CD та можуть досягати $10 - 50 \text{ Вт/кВАр}$. При зниженні потужності та частоти обертання CD , питомі втрати значно зростають [8].

1.3.3 Автоматичний регулятор збудження

Автоматичне регулювання збудження у CD – важливий аспект їхньої роботи та широко використовуються в системах електропостачання підприємств, електростанціях та інших галузях завдяки високій ефективності та надійності [13].

Система збудження CD двигуна відповідає за створення основного магнітного поля та дозволяє двигуну генерувати обертальний рух на кінцевому етапі. Оптимальне збудження забезпечує стабільність роботи двигуна та його

ефективність. Однак фактори, такі як зміна навантаження, напруги живлення або інші зміни створюють необхідність регулювання збудження [13].

Регулювання збудження *СД* є важливим аспектом щодо *КРП* в електричних системах. Реактивна складова потужності – основний компонент, що споживається *СД*. Неефективне керування нею може призвести до небажаних наслідків у системі, таких як перевантаження обладнання, втрати енергії та додаткові витрати [13].

Ланка збудження *СД* контролює реактивну потужність. Якщо величина основного магнітного поля (збудження) недостатньо, двигун споживатиме більше реактивної потужності та порушить баланс активної та реактивної потужності в системі. Це призведе до негативного зростання навантаження в системі та підвищених витрат на електроенергію [12].

З іншого боку, якщо збудження *СД* задається великими значеннями, це може призвести до втрати енергії (потужності) та перевантаження системи. Надлишок реактивної потужності може визвати проблеми в системі (наприклад, підвищене теплоутворення), що знижує ефективність і надійність роботи.

КРП здійснюється шляхом регулювання збудження *СД*. Це може бути досягнуто за допомогою пристроїв автоматичного регулювання збудження або контролерів, які забезпечують оптимальне керування реактивною потужністю та підтримки балансу в системі.

Оптимальне керування реактивною потужністю в системі має низку переваг [12]:

- зменшуються витрати на електроенергію, оскільки *КРП* знижує споживання реактивної енергії;
- покращується ефективність системи за рахунок зниження втрат енергії та перевантаження обладнання;
- зростає надійність роботи системи за рахунок зменшення ймовірності перегріву та виходу з ладу обладнання.

Таким чином, регулювання збудження *СД* є критичним аспектом для забезпечення *КРП* та, відповідно, оптимальної роботи електричних систем. Це не тільки спосіб знизити втрати електроенергії, а й підвищити ефективність та надійність роботи системи.

Для автоматичного регулювання збудження використовують спеціальні пристрої, такі як автоматичні регулятори напруги (*АРН*) (automatic voltage regulator (*AVR*)), які здійснюють моніторинг напруги та струму збудження і, аналізуючи задані параметри, задають вихідні сигнали для регулювання системи збудження *СД*.

AVR визначає різницю між заданими та реальними значеннями за напругою збудження та, за необхідності, здійснює корекцію, тобто, якщо напруга збудження менша за задане значення, *AVR* збільшує його шляхом зміни струму (поля збудження) і навпаки, при зростанні напруги збудження за задане значення, *AVR* знижує струм збудження [12].

Автоматичне регулювання збудження дає можливість *СД* підтримувати постійне значення потужності та швидкість обертання за умов зміни навантаження або параметрів мережі. Це важливо для забезпечення надійної роботи та запобігання пошкодженню двигуна.

Як висновок, автоматичне регулювання збудження в *СД* – ключовий фактор, який забезпечує їх стабільність та ефективність роботи, а також захист від пошкоджень.

1.4 Висновки до першого розділу

Проведений аналіз характеристик споживачів і джерел реактивної потужності в електричній мережі підтвердив доцільність застосування синхронного двигуна як ефективного засобу регулювання реактивної складової. Аналіз показав, що саме синхронні машини здатні забезпечити гнучке керування режимами роботи мережі та сприяти підвищенню її енергоефективності.

Для реалізації поставлених завдань було визначено необхідність формування математичної моделі синхронного двигуна з урахуванням ключових електромагнітних процесів.

Як основу, прийнято рішення використати спрощена система рівнянь Парка–Горєва, що дозволить описати перехідні та усталені режими роботи машини з достатньою точністю та мінімальною складністю розрахунків.

На базі математичного опису пропонується виконати комп'ютерне моделювання оптимізації потоків реактивної потужності в середовищі *MatLab/Simulink*, що дасть змогу проаналізувати поведінку синхронних двигунів у різних режимах роботи для встановлення оптимальних значень реактивної потужності.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Математичний опис синхронної машини

Синхронна машина для загального випадку характеризується наявністю безпосередньої взаємодії магнітних полів як статора так і ротора, отже, математичний опис синхронної машини повинен містити рівняння, які описують її електричні, механічні та магнітні характеристики [13].

Реактивна потужність носить характер енергії взаємодії електричних та магнітних полів, тому ключовою частиною математичного опису синхронної машини є рівняння, що описують електромагнітні процеси. Зокрема, рівняння, що описують взаємодію означених вище магнітних полів, мають важливе значення при моделюванні та аналізі роботи синхронної машини. У цих рівняннях враховується залежність між струмом та напругою в обмотках статора та ротора, створювані магнітними полями.

Окрім цього, математичний опис синхронної машини включає в себе рівняння, що описують її електричні параметри: активний та реактивний опори опори та індуктивність, які впливають на електричні втрати та потоки потужності.

Ці математичні моделі дозволять аналізувати динамічну поведінку синхронної машини у різних режимах роботи, включаючи стаціонарні та перехідні процеси. Вони також дозволяють проводити комп'ютерне моделювання для аналізу синхронної машини в різних умовах експлуатації, що є основною частиною при виконанні проектування та керування електроенергетичними системами.

Для виведення рівнянь приймаємо допущення [16]:

- магнітна система є ненасиченою, тобто, індуктивність машини не залежить від струмів;
- розподіл магнітної індукції по колу зазору між статором і ротором є синусоїдальним;

- розміщення фазних обмоток статора та ротора за поперечною та поздовжньою осями симетричні;
- присутність двох демпферних обмоток: поздовжня та поперечна, які магнітно співпадають з відповідними осями на роторі.

Для опису, електрична частина синхронної частини повинна бути представлена шістьома рівняннями: три рівняння – для трифазної системи статора; одне – опис обмотки збудження; два – поздовжній та поперечний демпферні контури.

Електромагнітні процеси розглядаємо у відповідності до векторної діаграми синхронного двигуна (рис. 2.1) [16], що обертається в системі координат $d-q$, де вісь d орієнтована на потік ротора двигуна, який створює потокозчеплення, рівне добутку потоку ротора на число витків обвитки статора та відстає щодо напрямком від статора на кут φ .

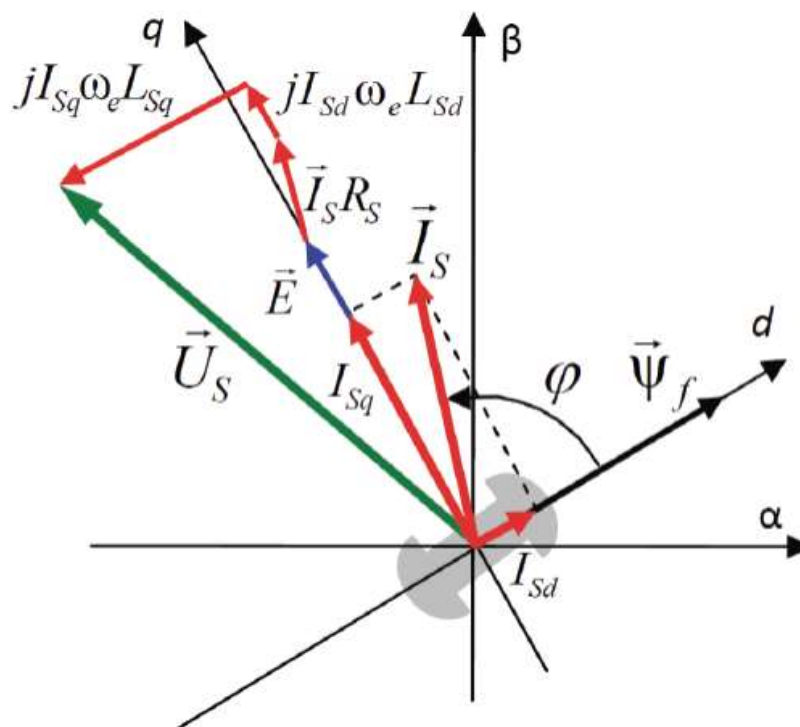


Рисунок 2.1 – Векторна діаграма CD .

Постійний обертовий магнітний потік ротора створює в обвитках статора EPC , яка за напрямком випереджає його на кут 90° .

Тоді, за II законом Кірхгофа в відповідності до векторної діаграми (рис. 2.1) для напруги на статорі отримуємо:

$$\vec{U}_s = \vec{E} + \vec{I}_s \cdot \vec{R}_s + j\omega_e (\vec{I}_{sd} \cdot \vec{L}_{sd} + \vec{I}_{sq} \cdot \vec{L}_{sq}), \quad (2.1)$$

де $\vec{E}$ – вектор ЕРС на статорі;

$\vec{I}_s \cdot \vec{R}_s$ – активний спад напруги на статорі;

$\vec{I}_{sd} \cdot \vec{L}_{sd}$, $\vec{I}_{sq} \cdot \vec{L}_{sq}$ – реактивні спади напруги за осями d та q , відповідно;

ω_e – кутова швидкість обертання магнітного поля.

Для моменту двигуна, який виникає в результаті силової взаємодії між векторами струму та потокозчеплення статора, враховуючи фазність та число пар полюсів двигуна отримуємо:

$$\vec{M}_{\partial\theta} = 3 \cdot Z_p \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \vec{I}_s \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{\psi}_s \right) = \frac{3}{2} Z_p |\vec{I}_s| \cdot |\vec{\psi}_s| \cdot \sin \varphi, \quad (2.2)$$

де $\vec{I}_s$ – вектор струму на статорі;

$\vec{\psi}_s$ – вектор потокозчеплення на статорі;

Z_p – число пар полюсів.

Зобразимо рівняння для моменту двигуна в системі $d-q$, врахувавши, що величина векторного добутку $\vec{I}_s$ та $\vec{\psi}_s$ рівна площі паралелограма, сторонами якого вони являються (рис.2.2). Звідси, подвоєна площа трикутника (abc) буде рівна:

$$\begin{aligned} |\vec{I}_s| \cdot |\vec{\psi}_s| \cdot \sin \varphi &= \\ &= 2 \cdot S_{abc} = 2 \left(I_{sd} \cdot \psi_{sd} - \frac{1}{2} \psi_{sd} \cdot \psi_{sq} - \frac{1}{2} I_{sd} - \frac{1}{2} (\psi_{sd} - I_{sd}) \cdot (I_{sq} - \psi_{sq}) \right) =, \quad (2.3) \\ &= I_{sq} \cdot \psi_{sd} - I_{sd} \cdot \psi_{sq}, \end{aligned}$$

де ψ_{sd} , ψ_{sq} – проекції потокозчеплення на осі в системі $d-q$;

I_{sq} , I_{sd} – проекції струму на осі в системі $d-q$.

Звідси, з врахуванням отриманих залежностей, формула для моменту двигуна в системі $d-q$ буде:

$$\vec{M}_{\text{об}} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \left(I_{Sq} \cdot \psi_{Sd} - I_{Sd} \cdot \psi_{Sq} \right). \quad (2.4)$$

Потокозчеплення статора формується струмом індуктивності статора та потоком ротора, тобто, вирази для $d-q$ складових буде:

$$\psi_{Sd} = L_{Sd} \cdot I_{Sd} + \psi_f; \quad \psi_{Sq} = L_{Sq} \cdot I_{Sq}. \quad (2.5)$$

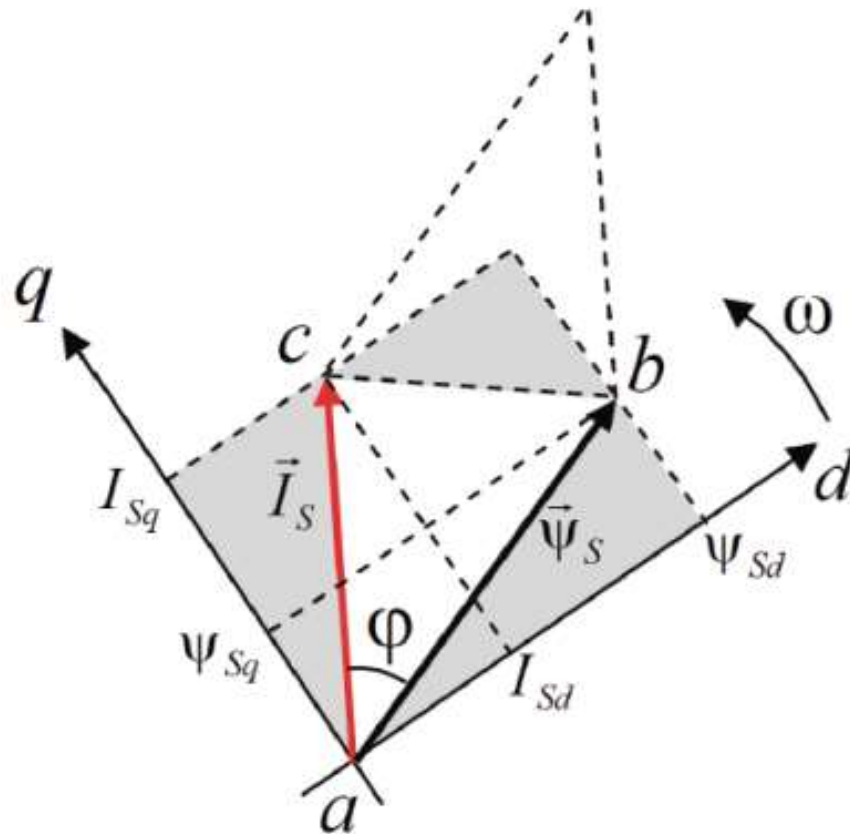


Рисунок 2.2 – Проекції потокозчеплення та струму статора на осі.

З врахуванням цих виразів рівняння моментів (2.4) отримує вигляд:

$$\vec{M}_{\text{об}} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \left(I_{Sq} \cdot \psi_f + I_{Sd} \cdot I_{Sq} (L_{Sd} - L_{Sq}) \right). \quad (2.6)$$

2.2 Опис системи рівнянь синхронного двигуна з використанням рівнянь Парка-Горєва

Рівняння Парка-Горєва пов'язують миттєві значення струмів, магнітних потоків, напруги в осях координат (d, q) , які жорстко поєднані з ротором [16].

Диференціальні рівняння синхронних машин дають можливість проводити аналіз перехідних процесів в електричних системах з урахуванням зміни великої кількості факторів (кутова швидкість ротора, аперіодичні складові струмів статора, періодичних складових струмів ротора, активного опору в ланці статора).

Не беручи до уваги деякі члени в рівняннях Парка-Горєва, можна отримати спрощені рівняння, які застосовуються [16]:

а) для розрахунків струмів коротких замикань (без урахування зміни швидкості);

б) для розрахунку електромеханічних перехідних процесів, зазвичай не враховуючи аперіодичну складову струму, статора та періодичний струм ротора.

Миттєві значення параметрів режиму, який досліджуємо, фазні значення та параметри в осях $d - q$. Ці значення отримують як проекції на часову вісь фаз (a, b, c) та обертового зі швидкістю ω_0 вектору струму, який, як і вектор напруги, EPC , потокозчеплення називають узагальненим (рис.2.2) [15, 16].

Рівняння напруг:

$$\begin{aligned} U_d &= R_a \cdot I_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_0 \cdot \psi_q; \\ U_q &= R_a \cdot I_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_0 \cdot \psi_d, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де U_d, U_q – проекції напруги статора CD в системі $d - q$;

I_d, I_q – проекції струму статора CD в системі $d - q$;

R_a – активний опір обмотки статора CD ;

ω_0 – номінальна кутова швидкість обертання;

ψ_d, ψ_q – проекції потокозчеплення статора CD на осі в системі $d - q$;

$$\begin{aligned}
\psi_d &= L_d \cdot I_d + L_{ad} \cdot I_{fd} + L_{ad} \cdot I_{1d}; \\
\psi_q &= L_q \cdot I_q + L_{aq} \cdot I_{1q} + L_{aq} \cdot I_{2q}; \\
\psi_{fd} &= L_{fd} \cdot I_{fd} + L_{ad} \cdot I_d; \\
\psi_{1d} &= L_{1d} \cdot I_{1d} + L_{ad} \cdot I_d; \\
\psi_{1q} &= L_{2q} \cdot I_{2q} + L_{aq} \cdot I_q,
\end{aligned} \tag{2.8}$$

де L_d, L_q – загальні індуктивності CD в системі $d-q$;

L_{ad}, L_{aq} – індуктивності взаємоіндукції CD в системі $d-q$;

U_d, U_q – проекції напруги статора CD в системі $d-q$;

$L_{fd}, L_{1d}, L_{1q}, L_{2q}$ – індуктивності обмоток збудження та демпферних обмоток;

$I_{fd}, I_{1d}, I_{1q}, I_{2q}$ – струми в обмотках ротора.

Зобразимо математичне представлення синхронного двигуна за рівняннями Парка-Горєва в операторній формі для означення процесу відхилення від номінального режиму в системі $d-q$. Для цього використовуючи оператор Лапласа (p) рівняння напруги на статорі [16]:

$$U_d(p) = R_a \cdot I_d(p) + \omega_0 \cdot \psi_q(p) + p \cdot \psi_d(p); \tag{2.9}$$

$$U_q(p) = R_a \cdot I_q(p) + \omega_0 \cdot \psi_d(p) + p \cdot \psi_q(p), \tag{2.10}$$

де $U_d(p), U_q(p)$ – операторна форма напруг на статорі CD ;

$I_d(p), I_q(p)$ – операторна форма струмів статора CD ;

$\psi_d(p), \psi_q(p)$ – операторна форма потокозчеплень на статорі CD в системі $d-q$, які при зображенні зв'язків зі струмами через індуктивні опори (X_{ad}, X_{aq}) та оператори індуктивностей отримують вигляд:

$$p\psi_d(p) = p \cdot (X_{ad} \cdot I_{ad}(p) + X_{d\sigma} \cdot I_d(p)); \tag{2.11}$$

$$p\psi_q(p) = p \cdot (X_{aq} \cdot I_{aq}(p) + X_{q\sigma} \cdot I_q(p)), \tag{2.12}$$

де X_{ad}, X_{aq} – індуктивні опори взаємоіндукції;

$I_{ad}(p), I_{aq}(p)$ – операторні форми струмів намагнічування в системі $d-q$;

$X_{d\sigma}, X_{q\sigma}$ – індуктивні опори розсіювання.

Рівняння напруги обмотки збудження U_f отримують вигляд:

$$U_f(p) = R_f \cdot I_f(p) + p \cdot \psi_f(p), \quad (2.13)$$

а для демпферних обмоток:

$$0 = R_D \cdot I_D(p) + p \cdot \psi_D(p); \quad (2.14)$$

$$0 = R_Q \cdot I_Q(p) + p \cdot \psi_Q(p), \quad (2.15)$$

де $U_f(p)$ – операторна форма напруги збудження *СД*;

$I_f(p)$ – операторна форма струму статора *СД*;

R_f – активний опір обмотки збудження *СД*;

$I_D(p), I_Q(p)$ – операторна форма струмів демпферних обмоток;

R_D, R_Q – активні опори демпферних обмоток.

Рівняння, яке описує динаміку ротора в операторній формі для визначення відхилення з врахуванням рівняння (2.6):

$$J \cdot p^2 \cdot \delta(p) + D \cdot p \cdot \delta(p) = T_{meh}(p) - T_{em}(p), \quad (2.16)$$

де J – момент інерції ротора *СД*;

$\delta(p)$ – операторна форма кута навантаження;

D – коефіцієнт демпферування;

$T_{meh}(p)$ – операторна форма механічного моменту *СД*;

$T_{em}(p)$ – операторна форма електромагнітного моменту *СД*:

$$T_{em}(p) = K_t \cdot (\psi_d(p) \cdot I_q(p) - \psi_q(p) \cdot I_d(p)), \quad (2.17)$$

де K_t – коефіцієнт пропорційності.

Отримані рівняння в операторному представленні дозволять здійснити дослідження поведінки *СД* при відхиленнях навантаження.

2.3 Дослідження здатності синхронних двигунів до компенсації реактивної потужності

Як правило для зниження перетоків реактивної потужності мережі застосовують поперечну компенсацію [5], де компенсуюча установка ($KУ$) встановлюються на ланках 6–10 кВ мережі підприємства, що призводить до зниження втрат за напругою та, відповідно, потужності.

Проводимо оцінку рівня напруги при використанні $KУ$ на прикладі схем заміщення до та після компенсації (рис. 2.3, а) та (рис. 2.3, б), відповідно.

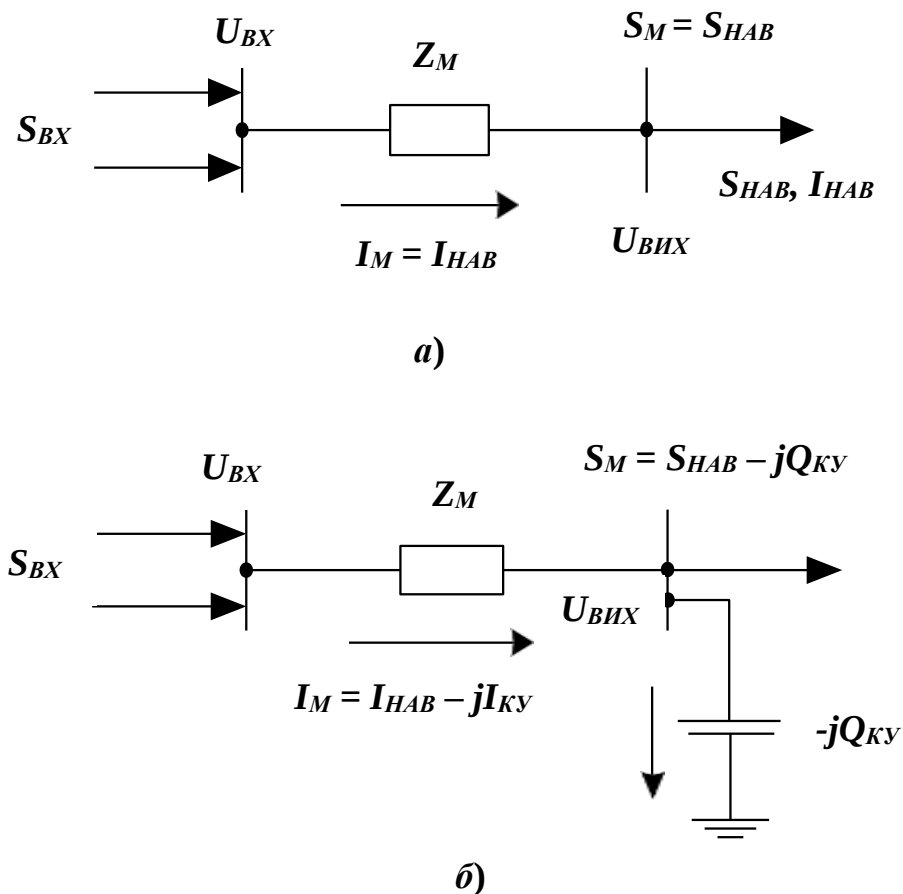


Рисунок 2.3 – Схеми заміщення ланки мережі 6–10 кВ:

а) – до встановлення $KУ$; б) – після встановлення $KУ$.

Згідно рис. 2.3, а, коефіцієнт реактивної потужності:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = Q_{HAB} / P_{HAB} , \quad (2.18)$$

Та згідно рис. 3.2, б:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = (Q_{HAB} - Q_{KY}) / P_{HAB} . \quad (2.19)$$

Так як $\operatorname{tg} \varphi_2 < \operatorname{tg} \varphi_1$, то, відповідно, $\cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$.

Втрати потужності до компенсації становлять:

$$\Delta P' = \frac{P_{HAB}^2 + Q_{HAB}^2}{U_{HAB}^2} \cdot R_M , \quad (2.20)$$

та після компенсації:

$$\Delta P'' = \frac{P_{HAB}^2 + (Q_{HAB} - Q_{KY})^2}{U_{HAB}^2} \cdot R_M . \quad (2.21)$$

Згідно (2.20) та (2.21) після компенсації величина зниження втрат потужності буде:

$$\Delta P' - \Delta P'' = \frac{(2 \cdot Q_{HAB} - Q_{KY})^2 \cdot Q_{KY}}{U_{HAB}^2} \cdot R_M . \quad (2.22)$$

Загальна потужність по лінії мережі згідно (рис.2.3, а):

$$S_M' = P_{HAB} / \cos \varphi_1 , \quad (2.23)$$

та згідно (рис. 2.3., б):

$$S_M'' = P_{HAB} / \cos \varphi_2 . \quad (2.24)$$

У відповідності до (2.23) та (2.24) отримуємо рівняння:

$$S_M'' / S_M' = \cos \varphi_1 / \cos \varphi_2 . \quad (2.25)$$

Як видно з рівнянь (24-25) загальна потужність на ланках мережі після компенсації знижується обернено-пропорційно величині коефіцієнту потужності. Отже, це дозволяє знизити втрати потужності не зменшуючи величину розподіленої потужності, забезпечуючи пропускну можливість мережі.

Щодо струму на ланках мережі згідно з (рис. 2.3, а) отримуємо:

$$I_M' = I_{HAB} = I_{HAB,q} - jI_{HAB,d} , \quad (2.26)$$

та згідно (рис. 2.3, б):

$$I_M'' = I_{HAB} = I_{HAB.q} - j(I_{HAB.d} - I_{KV}). \quad (2.27)$$

Якщо необхідно встановити значення втрати напруги трифазної ланки до компенсації, то отримуємо:

$$\Delta U' = \frac{P_{HAB} \cdot R_M + Q_{HAB} \cdot X_M}{U_{HAB}}, \quad (2.28)$$

та після компенсації:

$$\Delta U'' = \frac{P_{HAB} \cdot R_M + (Q_{HAB} - Q_{KV}) \cdot X_M}{U_{HAB}}. \quad (2.29)$$

Згідно (2.28) та (2.29) зниження втрат напруги становить:

$$\begin{aligned} \Delta U' - \Delta U'' &= \frac{P_{HAB} \cdot R_M + Q_{HAB} \cdot X_M}{U_{HAB}} - \\ &- \frac{P_{HAB} \cdot R_M + (Q_{HAB} - Q_{KV}) \cdot X_M}{U_{HAB}} = \frac{Q_{KV} \cdot X_M}{U_{HAB}}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

За умови, що *KPP* здійснюється при навантаженнях нижче номінальних, то втрати напруги до компенсації буде:

$$\Delta U'_{н.д.} = \frac{k_n \cdot (P_{HAB} \cdot R_M + Q_{HAB} \cdot X_M)}{U_{HAB}}, \quad (2.31)$$

де k_n – коефіцієнт, що характеризує зниження навантаження, тоді зменшення втрати напруги становить:

$$\begin{aligned} \Delta U' - \Delta U'_{н.д.} &= (1 - k_n) \cdot \frac{P_{HAB} \cdot R_M + (Q_{HAB} - Q_{KV}) \cdot X_M}{U_{HAB}} = \\ &= (1 - k_n) \cdot \Delta U'. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Втрати напруги при навантаженні нижче номінального після компенсації становить:

$$\Delta U''_{н.д.} = \frac{k_n \cdot P_{HAB} \cdot R_M + (k_n \cdot Q_{HAB} - Q_{KV}) \cdot X_M}{U_{HAB}}, \quad (2.33)$$

тоді зменшення втрати напруги становить:

$$\begin{aligned}
\Delta U'' - \Delta U''_{н.д.} &= \frac{P_{HAB} \cdot R_M + (Q_{HAB} - Q_{KV}) \cdot X_M}{U_{HAB}} - \\
&- \frac{k_n \cdot P_{HAB} \cdot R_M + (k_n \cdot Q_{HAB} - Q_{KV}) \cdot X_M}{U_{HAB}} = \\
&= \frac{P_{HAB} \cdot R_M + Q_{HAB} \cdot X_M - k_n (P_{HAB} \cdot R_M - Q_{HAB} \cdot X_M)}{U_{HAB}} = \\
&= (1 - k_n) \cdot \frac{P_{HAB} \cdot R_M - Q_{HAB} \cdot X_M}{U_{HAB}} = (1 - k_n) \cdot \Delta U.
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Отже при встановленні $KУ$ при зниженому навантаженні на ланках 6–10 кВ мережі підприємства, коливання напруги не відбувається, але значення напруги дещо буде зростати, оскільки зниження втрати напруги залежать від Q_{KV} та X_M , які за заданими умовами при компенсації є постійними [12].

Отже, при виконанні поперечної компенсації з використанням $KУ$ на ланках 6–10 кВ значення напруги мережі зростає на постійну величину в залежності від реактивного опору складових мережі (X_M) та потужності $KУ$.

Натомість, підприємства, які оперують великими індуктивними навантаженнями, як правило, використовують $СД$ для $КРП$ з метою підвищення ефективності та економії енергії, особливо при наявності високовольтних $СД$ для здійснення технологічних процесів. Це особливо важливо в періоди осінньо-зимового максимуму та/або після аварійних режимів [12].

При цьому слід встановлювати $СД$ з урахуванням специфіки навантаження та особливостей роботи системи для забезпечення оптимальної $КРП$.

Але присутня одна особливість при використанні $СД$, які встановлені на підприємстві для компенсації реактивної потужності. Для окремих типів $СД$ такий варіант менш вигідний ніж встановлення $БК$, що обумовлено значними втратами в двигуні. Тому важливо оцінити, які $СД$ можуть брати участь в $КРП$ і яка ступінь їх завантаження реактивним струмом.

Можливі варіанти: повне використання реактивної потужності двигуна, часткове, чи не використання двигуна для *КРП* в цілому.

Номінальне значення реактивної потужності при якій *СД* може працювати за умов: номінальне завантаження ($\beta_{CD} = P/P_{CD.ном}$), номінальний коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$), номінальний струм збудження (I_f), відносне значення напруги ($U^* = 0.95 \dots 1.05$), означається з формули [12]:

$$Q_{CD.ном} = \frac{P_{CD.ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ном}}{\eta_{ном}}. \quad (2.18)$$

За відхилення від номінальних параметрів для означення максимальної реактивної потужності, формула (2.18) отримає вигляд [12]:

$$Q_{CD.мах} = \alpha_{n.p.} \cdot Q_{CD.ном} = \alpha_{n.p.} \cdot \frac{P_{CD.ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ном}}{\eta_{ном}}, \quad (2.19)$$

де $\alpha_{n.p.}$ – коефіцієнт перевантаження за реактивної складовою потужності, який приймається в залежності від технічних параметрів *СД*, реактивної складової за потужністю, тобто $\alpha_{n.p.} = f(\beta_{CD}, U^*)$.

У відповідності до методики [12] реактивну потужність за допустимими значеннями можна представити умовою:

$$P_{\min} \leq P_{дон} \leq P_{np}, P_{\max}, \quad (2.20)$$

де $P_{\min}$ – реактивна потужність, що споживається *СД* за мінімальним значенням струму збудження;

P_{np} – порогова реактивна потужність, що генерується *СД* при постійному режимі роботи;

$P_{\max}$ – максимальна реактивна потужність *СД* без критичного нагріву ротора.

Одним із критеріїв вибору раціонального режиму збудження *СД* – питомі активні втрати при генерування реактивної потужності, які приймають з розрахунку за залежністю [13]:

$$\Delta P_Q = C_1 \cdot \gamma + C_2 \cdot \gamma^2 = C_1 \cdot \frac{Q_{CD}}{Q_{CD.ном}} + C_2 \cdot \frac{Q_{CD}^2}{Q_{CD.ном}^2}, \quad (2.21)$$

де $\gamma = Q_{CD} / Q_{CD.ном}$ – коефіцієнт завантаження за реактивною складовою потужності;

C_1, C_2 – постійні величини, значення яких залежать від паспортних даних CD , що встановлюється [13].

Залежності питомих втрат за активною складовою потужності від коефіцієнта навантаження (β) та відхиленні напруги (U_ϵ) представлені на рисунках 2.4. та 2.5.

Виходячи із отриманих графіків слід означити, що як режими роботи так і параметри двигунів впливають на означені відносні втрати потужності.

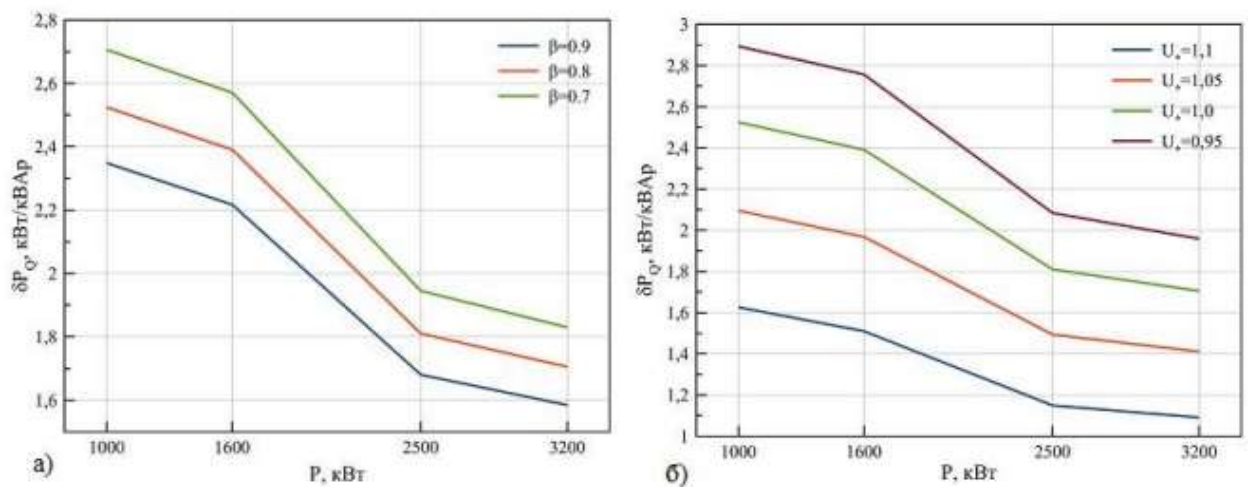


Рисунок 2.4 – Залежності питомих втрат активної потужності при генерування реактивної складової від потужності двигуна [13]:

а) при різних коефіцієнтах навантаження; б) – при різних відхиленнях напруги.

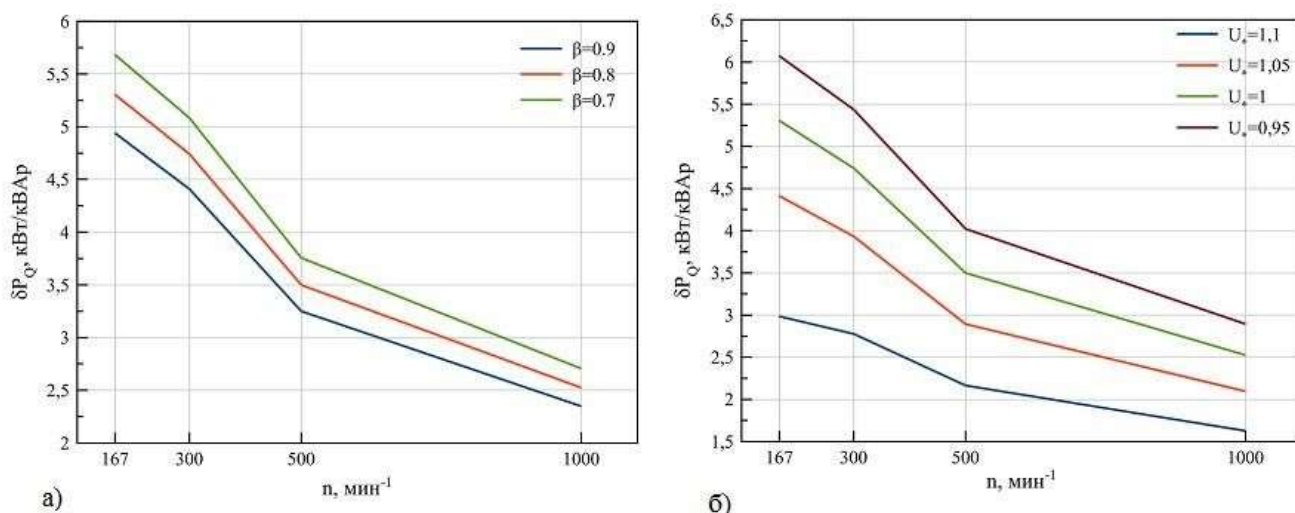


Рисунок 2.5 – Залежності питомих втрат активної потужності при генерування реактивної складової від частоти обертання [13]:
а) при різних коефіцієнтах навантаження; б) – при різних відхиленнях напруги.

При зниженні напруги на 5 % від номінального значення, відносні в середньому збільшуються в 1.2 рази, натомість при зростанні напруги на 10 % від номінального спостерігається зниження означених втрат в діапазоні 1.6 – 1.8 раз.

Що стосовно коефіцієнта потужності, то при його зміні в межах 0.9 – 0.7, значення втрат зростають в 1.1 раза при кроку зміни коефіцієнта завантаження на 0.1.

Також слід відмітити, що зростання здатності компенсації реактивної потужності синхронними двигунами відбувається як при зменшенні напруги живлення так і при зменшенні завантаження двигуна.

Як висновок: в цілях *КРП* найкраще використовувати швидкохідні *СД* великої потужності, із-за менших втрат активної потужності.

Окрім цього, не варто використовувати *СД* на підприємстві лише для *КРП*, так як питомі втрати за активною потужністю є більшими ніж при застосуванні високовольтного двигуна як приводу робочого механізму.

2.4 Висновки до другого розділу

Подана математична модель, побудована на основі рівнянь Парка–Горєва, дає змогу виконати узгоджений перехід від трифазної системи з часовими координатами до двовимірної системи $d-q$, що істотно спрощує подальший аналіз електромеханічних процесів у синхронному двигуні. Використання перетворення Парка не лише забезпечує зручність при описі динаміки машини, але й дозволяє зменшити кількість взаємозалежних змінних, що полегшує обчислення та підвищує точність чисельного моделювання. Додатковою перевагою є можливість застосування відносних одиниць щодо номінальних параметрів машини, що сприяє уніфікації моделей, коректному масштабуванню величин і кращій інтерпретації отриманих результатів.

Проведений аналіз критеріїв застосування синхронних двигунів як джерела реактивної потужності для підприємств показав, що найбільш ефективними є високовольтні швидкохідні агрегати великої встановленої потужності. Такі двигуни забезпечують стабільну генерацію необхідної реактивної складової при значно менших втратах активної потужності, що підвищує їхню енергетичну ефективність у складі промислових електромереж.

Крім того, використання потужних синхронних машин дозволяє поліпшити показники якості електроенергії, зменшити навантаження на компенсаційне обладнання та забезпечити більш надійну роботу технологічних процесів підприємства.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Оцінка MatLab Simulink як засобу моделювання енергетичних систем

Засобам моделювання *СД* відводять важливе місце при аналізі та проектуванні електроенергетичних систем, так як відносяться до складних об'єктів з різними параметрами та характеристиками, які необхідно враховувати при розробці. На основі засобів моделювання виникає можливість створення точних математичних моделей синхронних машин, що враховують їхню поведінку в різних режимах роботи та в різних умовах [15, 17].

За допомогою засобів моделювання *СД* можна проводити дослідження, наприклад, щодо аналізу динамічної поведінки *СД* при виникненні збурень або аварійних ситуацій, а також оцінювати їх вплив на роботу всієї електросистеми, що дозволить ефективно проектувати та керувати роботою електроенергетичних систем, покращувати їх надійність, ефективність та безпеку [16].

При моделюванні *СД* необхідно використовувати програмні комплекси для чисельного моделювання та симуляції, що дозволить здійснювати аналіз різних аспектів роботи *СД* включно із оцінкою електромеханічної поведінки, впливу на стабільність системи, електромагнітних процесів, втрат потужності та багато іншого. Крім того, на основі програмних комплексів є можливість дослідження управління та оптимізації роботи *СД* [17].

Як висновок, засоби моделювання *СД* дозволять більш глибоко та детально вивчати їх характеристики та поведінку як частини електроенергетичної системи, забезпечуючи тим самим більш точне та надійне проектування та керування електроенергетичним обладнанням.

У рамках кваліфікаційної роботи буде використано середовище моделювання *MatLab Simulink* – це інтегрована система щодо здійснення моделювання для чисельного аналізу, візуалізації та виконання завдань в різних

напрямках інженерії.

MatLab, як програмний засіб, пропонує потужну мову програмування на основі матриць і має широкий спектр вбудованих функцій для виконання широкого спектру задач, від чисельної алгебри та статистичного аналізу до оптимізації та обробки сигналів [17-19], забезпечуючи високу ефективність при виконанні складних обчислень.

Одна із основних особливостей *MatLab* – здатність до візуалізації даних, де, завдяки вбудованим графічним інструментам та функціям, користувачі отримують можливість створювати високоякісні графіки, діаграми та анімації для ілюстрації результатів моделювання, що допомагає кращому представленні даних і є необхідним інструментом для створення презентацій [17].

Також, *MatLab* на основі свого графічного інтерфейсу (*GUI*) має можливість підтримувати розробку користувацьких утиліт та програм з налаштуванням під потреби користувача, де появляється можливість керування параметрами моделі та отримання результатів в режимі реального часу [17].

Крім цього, *MatLab* підтримує паралельні та розподілені обчислення, що забезпечує масштабованість обчислень та дозволяє ефективно використовувати обчислювальні ресурси.

MatLab Simulink як додаток *MatLab* окрім візуалізації та аналізу дозволяє тестувати поведінку різних систем в динаміці [17].

Основна ж особливість *MatLab Simulink* – графічний інтерфейс, який дозволяє створювати моделі систем як блок-схеми, де блоки являють собою різні компоненти системи, а зв'язки між блоками позначають потоки даних або енергії [17].

За допомогою *MatLab Simulink* можна моделювати різні системи, від електричних ланцюгів і систем автоматичного управління до складних багатофункціональних систем. Це дозволяє інженерам проводити різні експерименти та аналізувати поведінку системи у різних умовах [17].

Можливість спрощення процесу моделювання забезпечується рядом

вбудованих бібліотек, що містять блоки для створення математичних моделей, аналогових і цифрових сигналів, регуляторів, тощо [17].

MatLab Simulink також забезпечує проведення симуляцій у режимі реального часу, що дозволяє перевіряти та налагоджувати моделі в реальних умовах і є важливо при оптимізації систем керування та створенні прототипів перед фізичною реалізацією.

Система інтегрується з іншими інструментами *MatLab*, що дозволяє використовувати потужні аналітичні та обчислювальні можливості для аналізу даних, оптимізації моделей, тощо [18, 19].

Як висновок, *MatLab Simulink* – потужний і гнучкий засіб для моделювання та симуляції різних систем на основі графічного інтерфейсу, вбудованих бібліотек та можливості симуляції в реальному часі.

3.2 Комп'ютерна модель синхронного двигуна в пакеті Matlab Simulink

3.2.1 Модель синхронного двигуна

Для формування віртуальних моделей будемо керувати отриманими рівняннями Парка-Горєва, де, електричну частину будемо моделювати рівняннями (2.11-2.15, а механічна частина рівнянням (2.16) в системі координат $d - q$ у відносних одиницях (в.о). Враховуючи це, серед представлених трьох віртуальних моделей пакету *SimPowerSystem* вибираємо для моделювання синхронного двигуна блок *Synchronous Machine pu Standard*, що дозволяє здійснити задання параметрів у в.о. [20].

Для формування параметрів СТД – 630 – 2 означимо вхідні характеристики: каталожні дані синхронного двигуна – табл. 3.1; довідкові дані значень відносних опорів та постійних часу – табл. 3.2 [21].

Таблиця 3.1 – Каталожні дані синхронного двигуна

Тип	$P_{ном}, кВт$	$U_{ном}, кВ$	$\eta, \%$	$I_{ном}, А$	$\frac{I_n}{I_{ном}}, в.о.$	$\frac{M_n}{M_{ном}}, в.о.$
СТД – 630 – 2	630	6.0	90.1	70.7	5.66	2.03

Таблиця 3.2 – Параметри та розрахункові значення

Індуктивні опори, в.о.						
x_d	x'_d	x''_d	x_q	x'_q	x''_q	x_1
1.81	0.23	0.15	1.81	0.22	0.14	0.057

Постійні часу перехідного процесу, с				$R_s, в.о.$	H_s	F_s	p
$T'_{d0} (T'_{q0})$	T'_d	T''_d	T''_{q0}				
2.51	0.314	0.04	0.07	0.008	1.07	0	1

Вікно занесення параметрів синхронного двигуна блоку моделі синхронного двигуна СТД – 630 – 2 подано на рис.3.1

В опції *Configuration* заносимо тип конструкції ротора синхронного двигуна – *Round* (неявнополюсний).

У верхньому ряду *Block Parameters* заносимо: *Nominal Power* (номінальна потужність); *Line – to – line voltage* – номінальна напруга; *Frequency* – частота.

Далі, у ряді нижче задаємо відносні значення індуктивних опорів: (x_d – поздовжній, x'_d – перехідний поздовжній; x''_d – надперехідний поздовжній; x_q – поперечний; x'_q – перехідний поперечний; x''_q – надперехідний поперечний; x_1 – опір розсіювання статора).

В області *Time Constant* (постійні часу) заносимо значення постійних часу перехідного процесу синхронного двигуна: T'_d/T'_{d0} – обмотки збудження при

замкненій/розімкненій обмотці статора; T_d''/T_{d0}'' – надперехідна по поздовжній осі при замкненій/розімкненій обмотці статора; T_q'/T_{q0}' – по поперечній осі при замкненій/розімкненій обмотці статора; T_q''/T_{q0}'' – надперехідна по поперечній осі при замкненій/розімкненій обмотці статора.

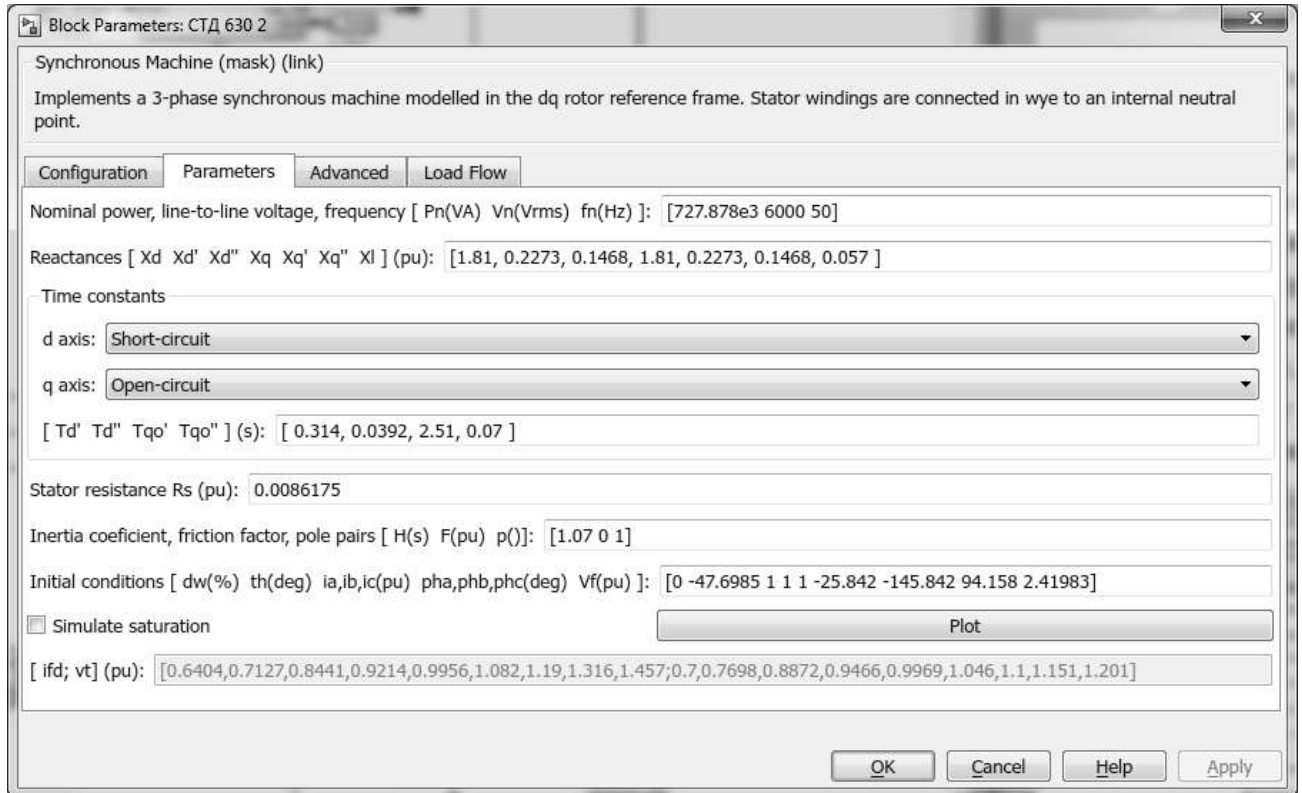


Рисунок 3.1 – Вікно внесення параметрів синхронної машини.

Нижче заводимо значення: R_s – значення відносного активного опору; H_s – коефіцієнту інерції; F_s – коефіцієнту тертя; p – число пар полюсів.

В області *Initial Conditions* заносимо параметри режиму роботи *СД* на початку моделювання. Згідно завдання використовуємо синхронний двигун встановлений на підприємстві, тому, в початковий момент часу працює в номінальному режимі з синхронною швидкістю, отже, відхилення $dw\% = 0$. Тому, використовуючи інструмент *MatLab Simulink Powergui Machine Initialization*) (рис. 3.2) розраховуємо початкові значення для синхронного

двигуна $СТД - 630 - 2$: t_h (deg) – кута навантаження; (i_a, i_b, i_c) – струмів статора за фазами; (p_{ha}, p_{hb}, p_{hc}) – початкові фази струмів статора; V_f – напруга обмотки збудження.

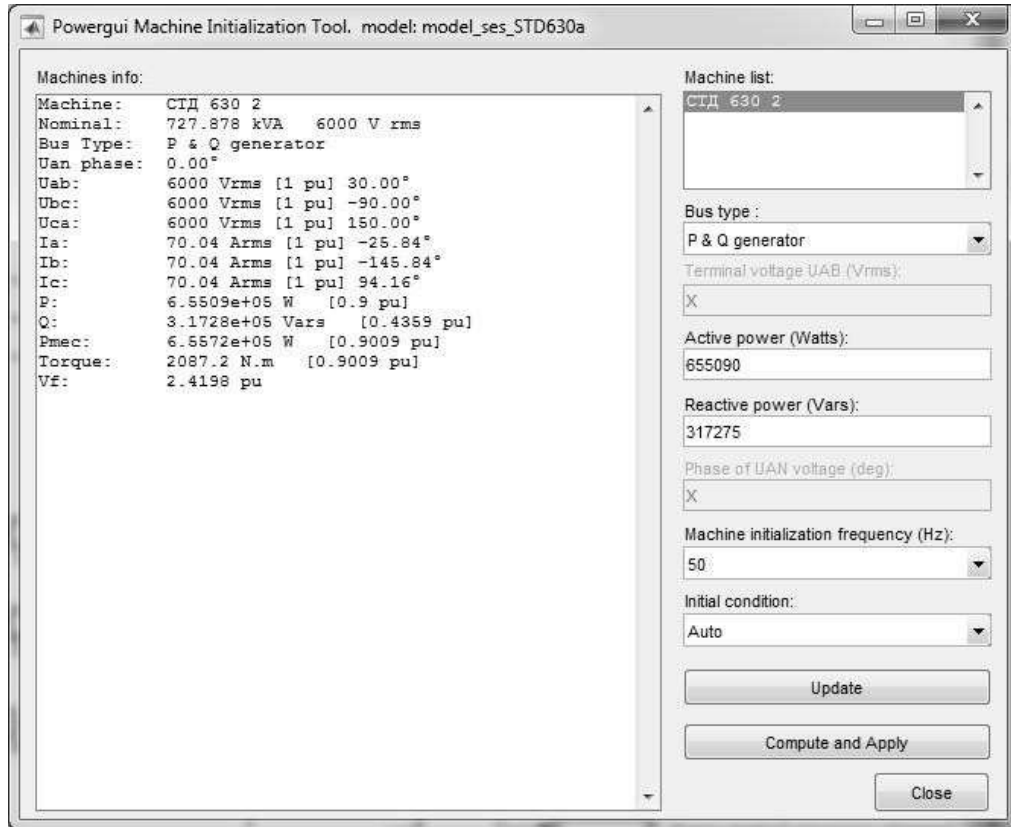


Рисунок 3.2 – Вікно інструменту *Powergui Machine Sitalization*.

3.2.2 Модель обмотки збудження та системи вимірювання

Для проведення моделювання напруга збудження (V_f) та струм збудження (I_f) рівні відношенню модуля вектора EPC $СД$ до вектора напруги лінії (U_L): $V_f = I_f = 1$ в.о. при рівності EPC та U_L .

Для $СТД - 630 - 2$ приймаємо значення V_f та I_f рівне 2.42 в.о., за умови, що U_L рівна номінальному значенні.

Схема моделі $СД$ в *MatLab Simulink* з блоком збудження та індикації параметрів на рисунку 3.3.

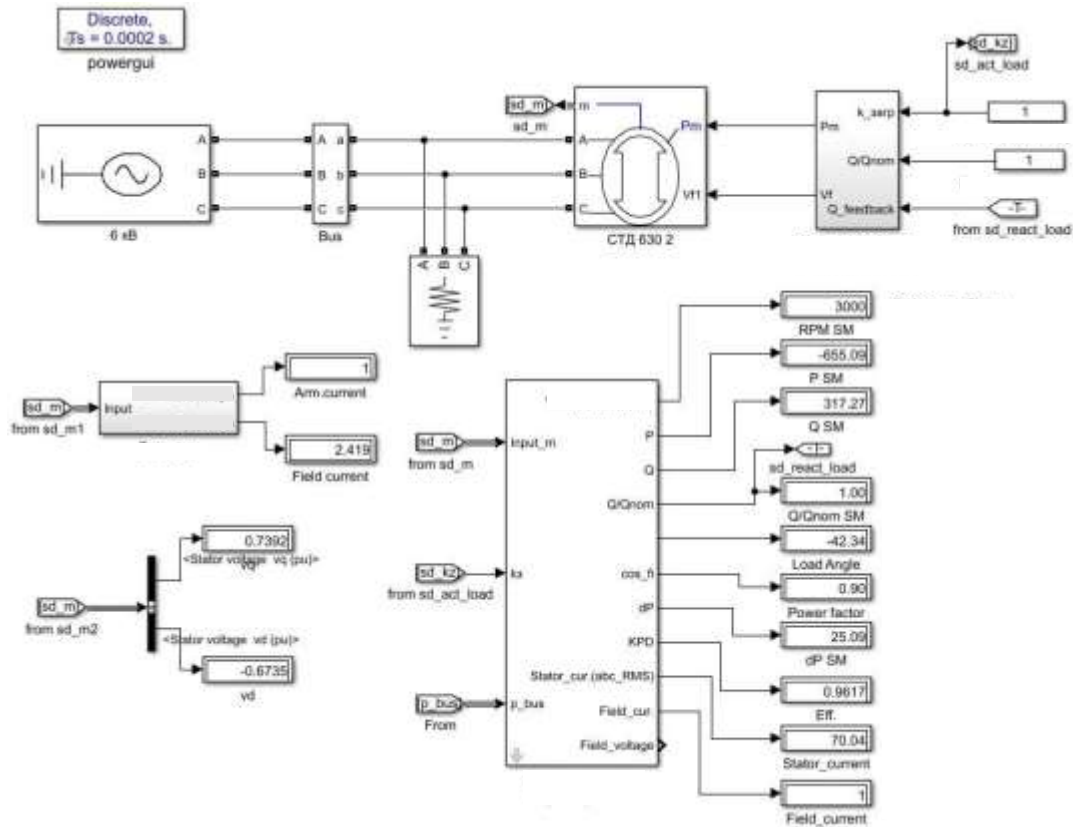


Рисунок 3.3 –Схема імітаційної моделі *СД* *СТД* – 630 – 2.

На схемі, модель блоку *СД* (*СТД* 630 2) створена з використанням блоку *Simscape Electrical* бібліотеки *Library Browser*, виконана на основі синхронного двигуна з демпферною обмоткою, де вхідні дані представлені в відносних одиницях (*pu*).

Модель блоку *СД* має чотири вхідні затискачі, з них з вимикачі (*A B C*) – виведення обмоток статора, а вхід (*m*) застосовується при під'єднанні блоку вимірювання.

Модель блоку *СД* з'єднано з мережею, модель якої виконана на основі трифазного джерела живлення (6 kV), фази якої модельовано в «зірку» з нульовим проводом. Лінія *ЛЕП* (*Bus*) з розподіленими параметрами (*Distributed Parameters Line*).

Два вихідні затискачі (P_m) та (V_f) призначені для задання потужності *СД*

(630 κBm) та регульованої обмотки збудження, яка реалізується блоком *Exsitation System*, відповідно.

Модель блоку керуванням системою збудження *СД* побудована з використанням пропорційно-інтегрального регулятора, що працює як автоматичний регулятор напруги з жорстким зворотнім зв'язком ($Q_feedback$), та, в залежності від заданої й поточної величини коефіцієнта завантаження ($k_завант$) двигуна відносною реактивною потужністю ($Q/Q_{ном}$), здійснюється розрахунок відносного значення напруги збудження (V_f) для забезпечення споживаного або заданого значення реактивної складової потужності.

На вхід $k_завант$ задається значення коефіцієнта завантаження двигуна за значенням відносної активної потужності ($P_2/P_{ном}$) (рис. 3.4).

У блоку моделі збудження наявний елемент, що характеризує насичення магнітної ротора (*Saturation*). В нашому випадку залежність напруги на шинах генератора V_f , (pu) від струму в обмотці збудження I_f , (pu) рівна одиниці

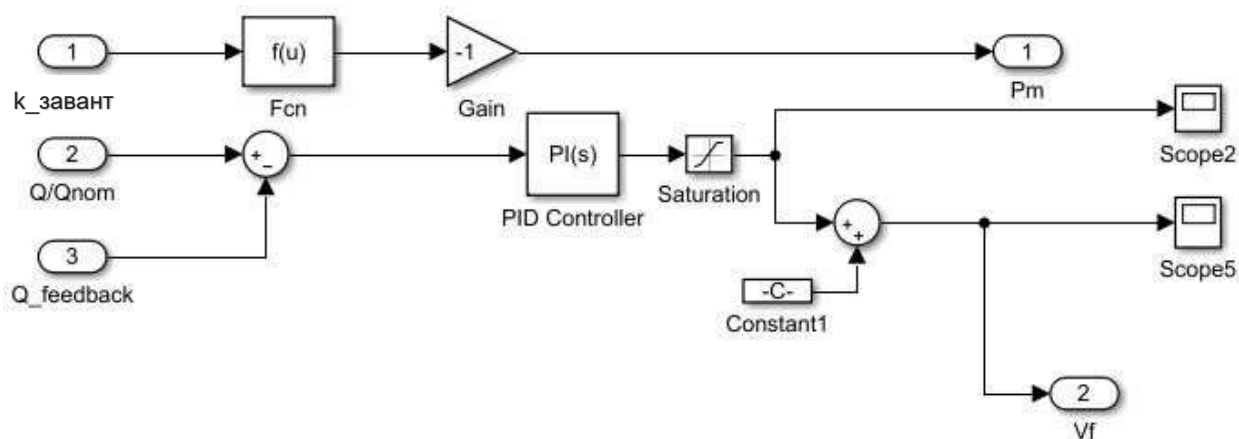


Рисунок 3.4 – Структура блоку регулювання збудження.

Блок вимірювання вихідних параметрів *СД* виконує перехід до іменованих одиниць від відносних із вимірювального виходу імітаційної моделі

СД (рис. 3.5). В блоці вимірювання здійснюється розрахунки: швидкості обертання ротора (RPM_{SM}); активної (P_{SM}) та реактивної потужності (Q_{SM}); коефіцієнта потужності ($Power\ factor$) та кута навантаження ($Load\ angle$); втрат активної потужності в двигуні (dP_{SM}) та коефіцієнт корисної дії (Eff); струму статора ($Stator\ current$) та ротора ($Field\ current$); коефіцієнта завантаження за реактивною потужністю ($Q/Q_{ном\ SM}$), де на виході $Q/Q_{ном}$ задається сигнал за зворотнім зв'язком.

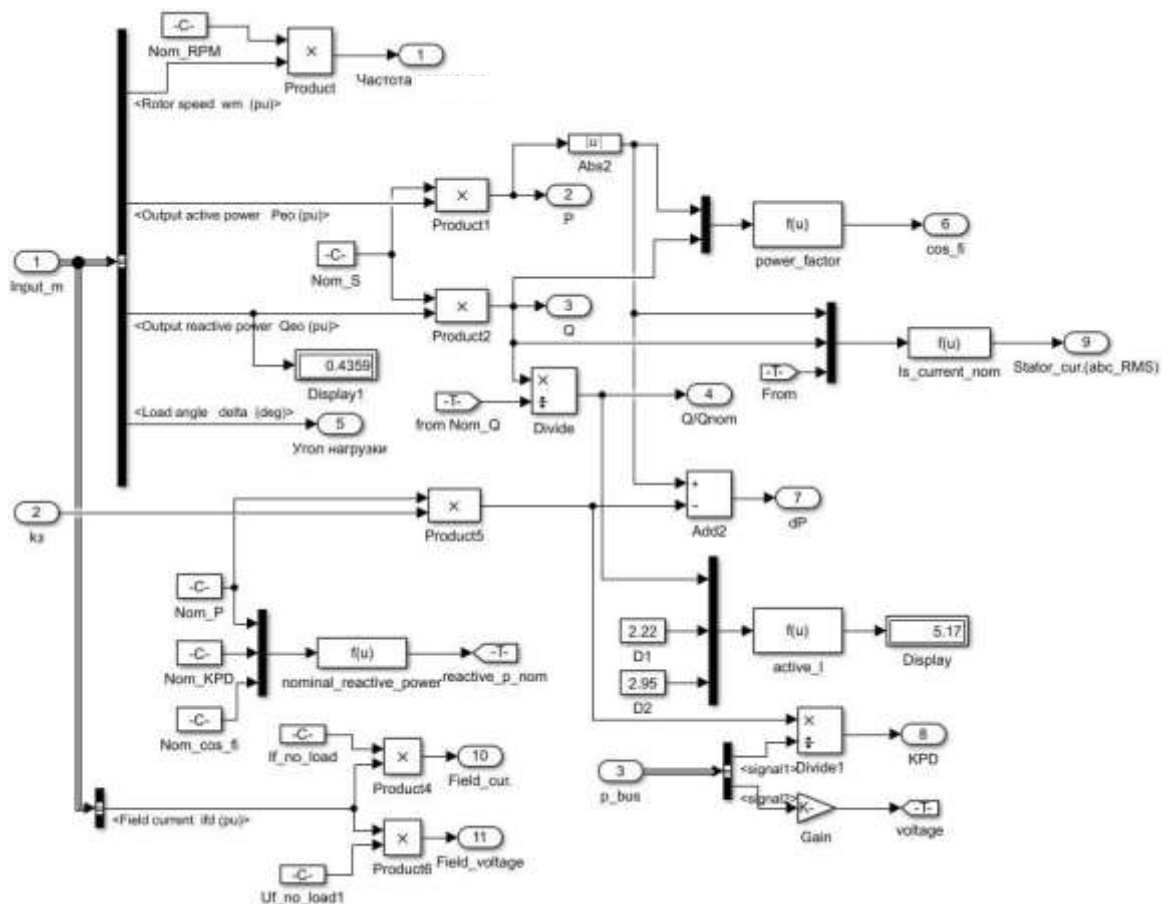


Рисунок 3.5 – Структура блоку вимірювання параметрів СД.

Імітаційне моделювання синхронного двигуна $СТД - 630 - 2$ розпочинається з запуску за номінальною напругою та номінальними коефіцієнтами навантаження за активною та реактивною складовими потужності. При часі моделювання 5 секунд проведені дослідження зміни

швидкості ротора; кута навантаження; значень активної та реактивної потужності до встановлення сталих значень параметрів. Результати симуляційних досліджень представлені на рис. 3.6-3.9.

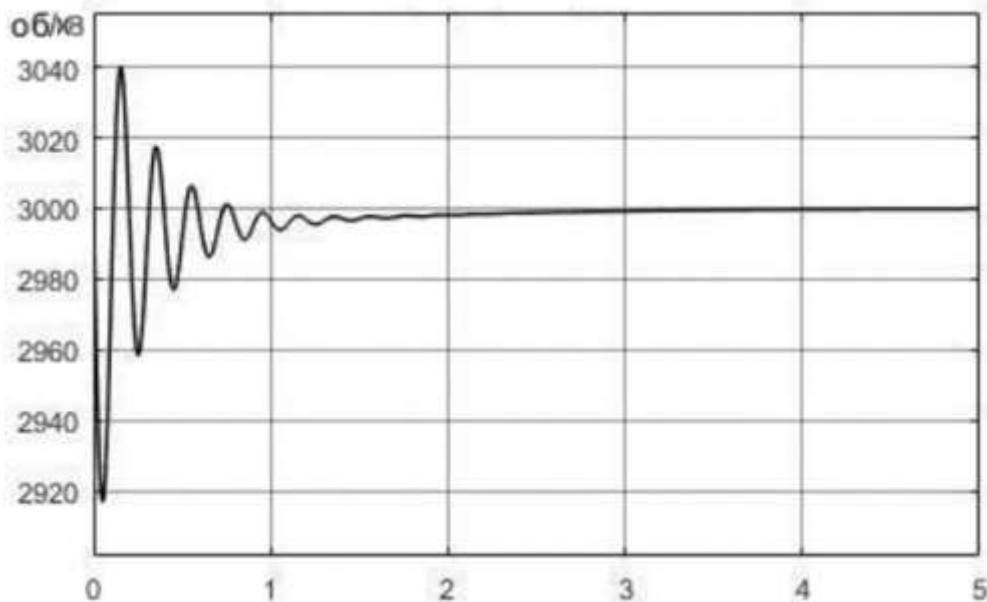


Рисунок 3.6 – Графік зміни швидкості ротора *СД СТД – 630 – 2* при номінальному навантаженні.

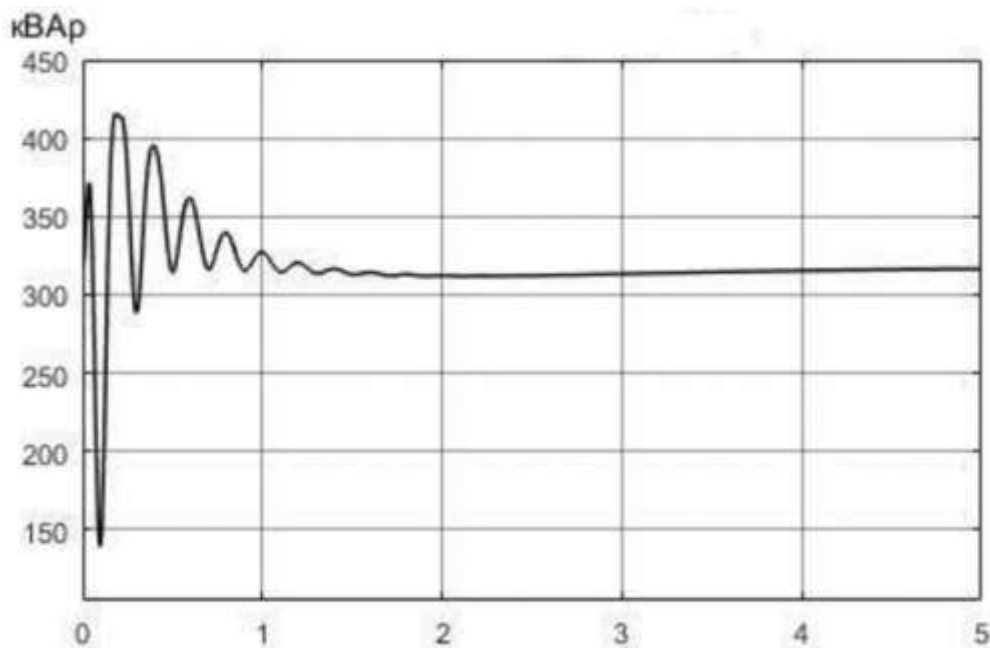


Рисунок 3.7 – Графік зміни реактивної потужності *СД СТД – 630 – 2* при номінальному навантаженні.

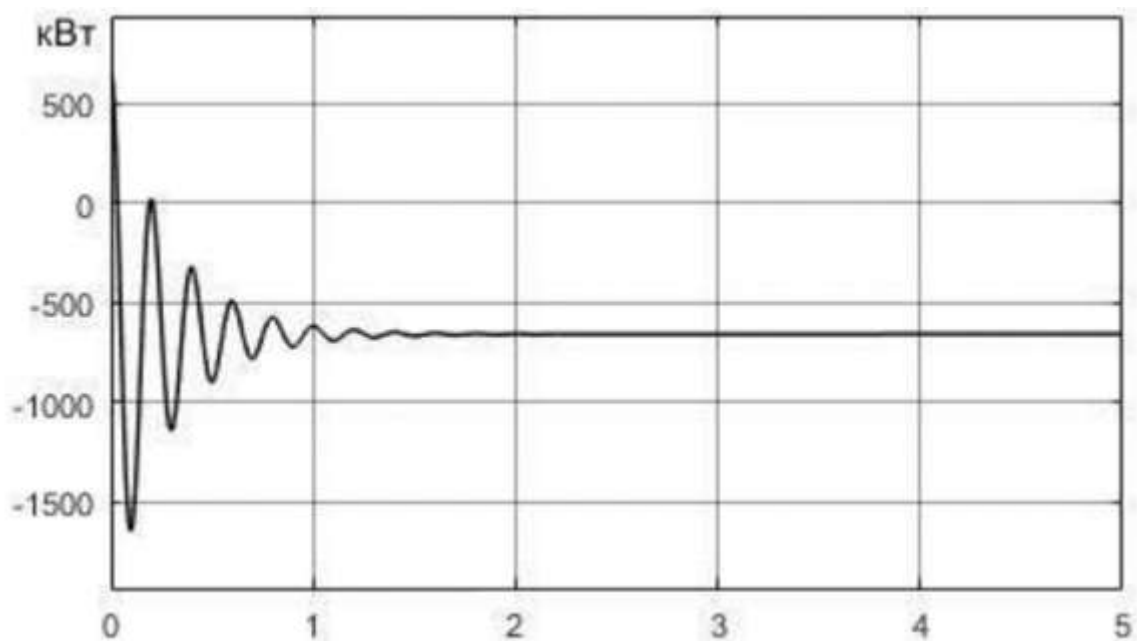


Рисунок 3.8 – Графік зміни активної потужності *СД СТД – 630 – 2* при номінальному навантаженні.

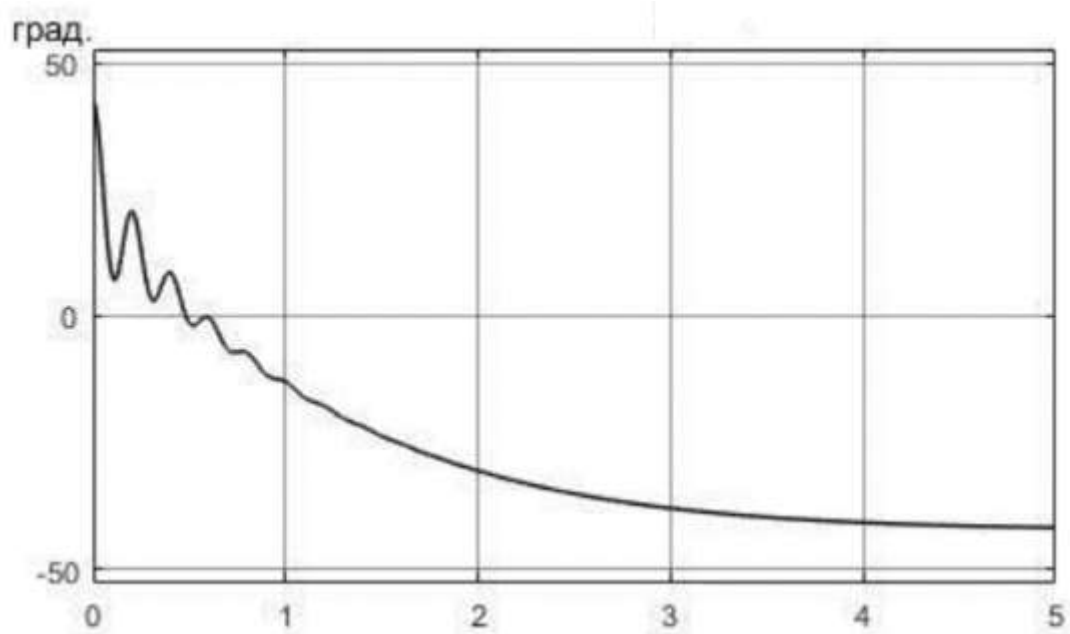


Рисунок 3.9 – Графік зміни кута завантаження *СД СТД – 630 – 2* при номінальному навантаженні.

3.3 Висновки до третього розділу

Створена комп'ютерна модель забезпечує можливість детального аналізу процесів керування синхронним електродвигуном і дає змогу визначити оптимальні параметри його регулювання. Проведені дослідження показали, що система керування ефективно реагує на зміни навантаження: навіть за різких його коливань вона здатна утримувати задану швидкість зміни частоти обертання, мінімізуючи вплив зовнішніх факторів.

Таке функціонування системи дозволяє зберігати стабільні механічні характеристики двигуна, що є важливим для забезпечення надійності робочих процесів. Під час зміни режимів роботи керуючі алгоритми автоматично коригують напругу та струм, підтримуючи необхідні параметри для сталого та ефективного функціонування електроприводу. Таким чином, модель підтверджує здатність системи до адаптивного керування та створює підґрунтя для подальшої оптимізації та практичного застосування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електродвигунів

Під час виконання робіт, пов'язаних із контактом зі струмопровідними або обертовими частинами електродвигуна, необхідно повністю зупинити його роботу та вивісити на пусковому пристрої або ключі керування попереджувальний плакат «Не вмикати! Працюють люди» [21].

Під час обслуговування електродвигуна заземлення встановлюється на кабелі або в місці під'єднання до розподільчого пристрою.

Перед початком робіт на електродвигунах насосів і вентиляторів, якщо існує можливість їх обертання від приєднаних механізмів, необхідно зачинити та замкнути на замок засувки або шибери цих механізмів, а також забезпечити гальмування роторів електродвигунів.

Під час роботи електродвигуна забороняється знімати огороження його обертових частин.

Обслуговування щіткового апарата ввімкненого електродвигуна дозволяється лише одному оперативному працівнику або спеціально навченому працівнику з *III* групою допуску . При цьому слід дотримуватись таких вимог безпеки [21]:

- працювати у головному уборі та застібнутому спецодязі, уникаючи захоплення його обертовими частинами;
- користуватися діелектричним взуттям або гумовими килимками;
- не торкатися одночасно струмопровідних частин різних полюсів або заземлених елементів.

Для високошвидкісних електродвигунів обмотку, яка не використовується та кабель живлення слід розглядати як такі, що перебувають під напругою.

У процесі експлуатації електродвигуна заземлення може бути встановлене на будь-якій ділянці кабельної лінії між двигуном і розподільчим пристроєм.

Якщо робота не пов'язана з доторканням до обертових частин і муфту з'єднання роз'єднано, заземлення кабельної лінії не є обов'язковим [21].

Якщо роботи на відключеному електродвигуні не проводяться або перервані на тривалий час, кабель, від'єднаний від двигуна, повинен бути заземлений з його боку. У випадку, коли перетин жил кабелю не дозволяє використати переносні заземлення, для електродвигунів напругою до 1000 В допускається заземлення кабельної лінії мідним провідником з перетином не меншим за перетин жили кабелю або з'єднання всіх жил між собою з подальшою ізоляцією. Такі дії мають бути зафіксовані в оперативному журналі нарівні з переносним заземленням [24].

Випробування електродвигуна разом із виконавчим механізмом проводиться лише з дозволу начальника зміни відповідного цеху.

Ремонт і налагодження схемотехнічної частини електроприводів, які не з'єднані із виконавчими механізмами, допускається виконувати за розпорядженням, дозвіл на випробування яких надає працівник, який видав розпорядження на їх ремонт чи налагодження [21].

Вмикання електродвигуна для випробувань до повного завершення робіт дозволяється лише після виведення бригади з робочої зони. Після випробування виконується повторний допуск із відповідною відміткою в наряді.

4.2 Надання першої допомоги при враженні електричним струмом

Під час використання асинхронних двигунів існує ризик ураження електричним струмом [21].

Послідовність дій при наданні першої допомоги:

- усунути дію небезпечних чинників, що становлять загрозу життю та здоров'ю потерпілого та оцінити його стан;
- визначити характер і ступінь важкості травми, встановити головну загрозу для життя та послідовність дій;

- виконати першочергові заходи з порятунку потерпілого (забезпечити прохідність дихальних шляхів, провести штучне дихання, зробити непрямий масаж серця);
- підтримувати життєві функції організму до прибуття медичного працівника;
- організувати транспортування потерпілого до найближчого медичного закладу.

Ефективність рятування постраждалого від дії електричного струму залежить від часу його звільнення від джерела струму та своєчасного та правильного надання допомоги.

Якщо неможливо швидко знеструмити установку, потрібно вжити заходів для безпечного звільнення потерпілого від струмоведучих частин. Необхідно стежити, щоб самому не опинитися під напругою або в зоні крокової напруги [21].

У випадку напруги понад 1000 В звільнення потерпілого проводять у діелектричних рукавицях і ботах за допомогою ізолюючої штанги або кліщів, розрахованих на відповідну напругу.

Якщо лінії електропередачі неможливо швидко знеструмити, необхідно замкнути проводи накоротко, використавши гнучкий провід достатнього перерізу, щоб уникнути його перегорання. Перед накиданням одного кінця проводу слід заземлити його (приєднати до металевої опори або заземлювального спуску). Для зручності накидання на другий кінець можна прикріпити невеликий вантаж.

Дії після звільнення потерпілого від струму.

Заходи залежать від його стану потерпілого. За будь-якого випадку необхідно викликати лікаря. Для оцінки стану необхідно покласти потерпілого на спину, перевірити наявність дихання та серцебиття.

Огляд і оцінка стану потерпілого (дихання, пульс, зіниці) повинні тривати не більше 15–20 секунд. Протягом перших 4–5 хвилин після зупинки серця можливе відновлення життєвих функцій, тому допомогу потрібно надавати

негайно та кваліфіковано. Основними методами є штучне дихання («рот у рот», «рот у ніс») і непрямий масаж серця [21].

Штучне дихання та непрямий масаж серця виконують до повного відновлення самостійного дихання і серцевої діяльності або до прибуття медичних працівників [21].

4.3 Оцінка стійкості роботи електричних мереж до дії проникаючої радіації та радіоактивного забруднення

Основою забезпечення стійкості електричних мереж і систем до впливу проникаючої радіації та радіоактивного забруднення місцевості, спричинених ядерним вибухом, є врахування дії електромагнітного імпульсу ядерного вибуху на роботу вимірювальних трансформаторів, а також застосування відповідних захисних заходів від гамма-випромінювання, гамма-квантів, альфа- та бета-частинок.

У цьому розділі магістерської роботи розглянуто питання оцінювання стійкості функціонування електричних мереж і систем під впливом проникаючої радіації та радіоактивного забруднення місцевості [22].

Проникаюча радіація впливає на виробничу діяльність підприємств насамперед через її дію на людей, матеріали та прилади, чутливі до іонізуючого випромінювання. Ступінь ураження людей визначається отриманою дозою випромінювання, яка складається із сумарної дози гамма-випромінювання та нейтронів. Водночас основну небезпеку становлять саме гамма-кванти, оскільки їхня доза зазвичай у кілька разів перевищує дозу нейтронів на однакових відстанях від центру вибуху.

Захист від проникаючої радіації забезпечується застосуванням перепон і укриття із матеріалів, що зменшують потік гамма-квантів і нейтронів. Важливо враховувати, що різні матеріали неоднаково ослаблюють різні види випромінювання: гамма-промені найкраще поглинаються важкими матеріалами з високою електронною щільністю (свинець, сталь, бетон), тоді як нейтрони

ефективніше послаблюються легкими матеріалами, які містять ядра легких елементів, наприклад водню (вода, поліетилен).

Вплив проникаючої радіації на матеріали й обладнання залежить від типу випромінювання, дози опромінення, властивостей матеріалу та умов середовища. Найбільш уразливим є електронне обладнання. Під дією короткочасного опромінення в елементах електронної техніки можуть виникати тимчасові або залишкові зміни електричних параметрів: гамма-кванти зазвичай спричиняють короткочасні відхилення, тоді як нейтрони — триваліші, залишкові ефекти [22].

Під час проходження через радіоелектронні елементи гамма-кванти утворюють вільні носії заряду — електрони та іони, що підвищує електропровідність матеріалів, збільшує струмові витоки та зменшує опір. У газорозрядних приладах це призводить до зниження напруги запалювання. Такі зміни можуть спричиняти короткочасні перерви в роботі або навіть тривалі пошкодження обладнання (пробої, короткі замикання).

Радіоактивне зараження становить небезпеку передусім через опромінення людей, які перебувають на забрудненій місцевості. Радіоактивні речовини випромінюють гамма-кванти, альфа- та бета-частинки. Альфа-частинки легко затримуються, а бета-випромінювання ефективно послаблюється одягом і засобами захисту шкіри, тому найбільшу небезпеку становить гамма-випромінювання, яке має високу проникаючу здатність [22].

На відміну від короткочасної дії проникаючої радіації ядерного вибуху, гамма-випромінювання на зараженій території діє тривало — доти, доки люди не покинуть небезпечну зону або не будуть розміщені в захисних спорудах. Отримана доза залежить від рівня радіації та тривалості перебування у зоні забруднення. Варто зазначити, що опромінення мало інтенсивними дозами протягом тривалого часу менш шкідливе, ніж отримання тієї ж дози за короткий період.

Для захисту від радіоактивного зараження використовують укриття, будівлі та споруди, що зменшують потужність гамма-випромінювання і

перешкоджають проникненню зараженого повітря. Додатковий захист органів дихання забезпечують засоби індивідуального захисту.

Радіоактивне забруднення та проникаюча радіація впливають на виробничу діяльність підприємств переважно через загрозу ураження персоналу. Можливість розвитку променевої хвороби може зумовити необхідність тимчасового припинення або обмеження роботи об'єкта до зниження рівня радіації до безпечних значень. Таким чином, головним завданням оцінки стійкості є визначення ступеня небезпеки радіаційного ураження персоналу за конкретних умов роботи на зараженій території.

Рівень стійкості оцінюється за прогнозованою радіаційною обстановкою на території об'єкта – моментом початку зараження після вибуху, рівнем радіації та місцем розташування робочих зон. Оцінка починається з визначення максимальних очікуваних значень дози проникаючої радіації та рівня радіоактивного зараження.

До вихідних даних для розрахунків належать: відстань від точки прицілювання до об'єкта, потужність ядерного заряду, можливе відхилення боєзапасу від цілі, швидкість і напрям середнього вітру. Критерієм стійкості роботи підприємства в умовах радіаційного впливу є допустима доза опромінення, яку може отримати персонал за зміну без шкоди для здоров'я.

Оскільки умови праці в різних цехах можуть різнитися, розрахунки проводять окремо для кожної групи працівників, що перебувають у схожих умовах. За отриманими дозами визначають можливість продовження роботи або необхідність тимчасового припинення виробничого процесу, а також оцінюють ефективність захисту. На основі результатів робляться висновки щодо заходів підвищення стійкості до дії проникаючої радіації та радіоактивного зараження.

У розрахунках приймається, що під час ядерного вибуху персонал перебуває в укриттях, а за умов радіоактивного зараження — на робочих місцях протягом максимальної тривалості зміни.

Основними вихідними параметрами для оцінювання стійкості є максимальна доза проникаючої радіації, рівень радіації через одну годину після вибуху, конструктивні характеристики будівель, параметри сховищ (матеріали, товщина захисних шарів), а також характеристики обладнання та матеріалів, що використовуються у виробництві.

Критерієм стійкості роботи електронних і електронно-оптичних систем у таких умовах є гранично допустимі значення потоку нейтронів або експозиційної дози гамма-випромінювання, при яких спостерігаються зміни параметрів елементів, але функціонування систем ще не порушується.

Отже, стійкість електричних мереж і систем до дії проникаючої радіації та радіоактивного забруднення місцевості визначається дозою опромінення, масштабом зараження та вразливістю об'єкта. Для підвищення захисту необхідно застосовувати різні типи перепон і укриття, що послаблюють потік гамма-квантів і нейтронів, а також захисні споруди, які зменшують вплив гамма-випромінювання та захищають від зараженого повітря [22].

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційні роботі проведені дослідження щодо ефективності використання синхронних двигунів в якості стабілізації реактивної потужності електричної мережі підприємства.

1. Проведений аналіз споживачів і джерел реактивної потужності на підприємствах показав необхідність використання засобів компенсації електричної мережі.

2. Дослідження базових критеріїв використання синхронного двигуна для генерації реактивної потужності в мережах підприємств показав, що найкраще застосовувати високовольтні швидкохідні двигуни великої потужності за менших втрат активної складової потужності.

3. Представлена математична модель синхронного двигуна на основі рівнянь Парка-Горєва дозволяє здійснювати чисельні дослідження з використанням системи у відносних одиницях у відношенні до номінальних значень.

4. Розроблена комп'ютерна модель дає можливість аналізувати та визначати параметри налаштування системи керування синхронним двигуном. Завдяки цьому синхронний двигун зберігає стабільні механічні характеристики руху незалежно від коливань навантаження та швидкості обертання. При цьому напруга та струм у системі керування динамічно коригуються для забезпечення необхідних вихідних параметрів.

5. Дослідження показали, що використання синхронного двигуна дозволяє підвищити ефективність використання електроенергії та знижує навантаження на мережу, покращує надійність роботи обладнання та зменшує втрати енергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Денисюк С.П. Системи гарантованого електропостачання та питання економії електроенергії / С.П. Денисюк. – К.: Семінар «Синапс / НБУ - 2004». – 2004. – 21 с.
2. Попов В. А., Ткаченко В. В., Ярмолук О. С. Ефективне керування режимами систем забезпечення споживачів електричною енергією: навчальний посібник / В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 163 с.
3. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 32 с.
4. Денисюк С.П. Загальні властивості енергетичних характеристик систем з перетворювачами електричної енергії / С.П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електроенергетика. – Київ: ІЕД НАНУ, – 1999. – С. 46 – 59.
5. Демов О. Д. Оптимізація процесу впровадження компенсувальних установок в розподільних електричних мережах енергопостачальних компаній: монографія / О. Д. Демов. – Вінниця: ВНТУ. – 2016. – 98 с.
6. Вербицький, Є. В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / Є. В. Вербицький, Р. М. Прибудько, Д. О. Зінченко, М. О. Мацюк // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018.
7. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
8. Zhuikov, V. Y. Особливості компенсації миттєвої реактивної потужності в лінійних ланцюгах у перехідному режимі при вмиканні навантаження / V. Y. Zhuikov, I. V. Verbytskyi, O. F. Bondarenko / Електроніка та зв'язок. – 2017. - № 22 (4). – С. 30-37. – doi: 10.20535/2312- 1807.2017.22.4.105271.
9. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем

електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіонбуд України, 2015. 45 с.

10. Вітт, І.В. Про стан автоматизації компенсувальних установок і перспективи їх оснащення пристроями нового технічного рівня [Текст] / І. В. Вітт, Л. Н. Добровольська, І. П. Сосенко // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2008. – №4. – С. 26–30.(15).

11. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : [затв. . Наказ М-ва палива та енергетики України 25.07.2006 № 258] // М-во палива та енергетики України. – Х.: Індустрія : Енергетичні рішення. – 2012. – 318 с.

12. Соломчак О. В. Методика вибору та порівняння варіантів компенсації реактивної потужності. Енергетика та електрифікація. 2004. №9. С. 23-27.

13. Шкрабець Ф.П. Електропостачання: навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.

14. M. Brezovac, I. Kuzle, M. Krpan, Detailed mathematical and simulation model of a synchronous generator, Journal of Energy, vol. 64 (2015) Special Issue, p. 102-129.

15. Горященко С. Л., Горященко К.Л., Вжещ Е.Ю. Моделирование синхронного двигателя в среде MatLab // С. Л. Горященко, К. Л. Горященко Е.Ю. Вжещ / Вісник Хмельницького національного університету, Том 1, №6, 2018 (267). – С. 243-247.

16. Аввакумов, В. Г. Перехідні процеси в системах електропостачання. Елементи теорії, програми, ілюстрації : навчальний посібник / В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 245 с.

17. MATLAB, Simulink, Simpowersystem. Основи програмування: лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з дисципліни «Пакети прикладних програм», ч. I, спеціалізація "Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії" / О. І. Толочко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8241 кБ). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 226 с.

18. Романчук А.О., Теребійчук С., д.т.н., проф. Толочко О.І., «Особливості віртуального фізичного моделювання механічних об'єктів з використанням

блоків бібліотеки SimMechanics». Міжнародний науково- 2 технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"- НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – 2016.

19. H.A. Madsen "A Detailed investigation of the BEM model based on analytical and numerical results and proposal for modification of the BEM model", Journal of Physics: Conference Series 75. 2016 – PP 69.

20. Гурко О.Г., Єрмоєнко І.Ф. Г 95 Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрмоєнко. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 286 с.

21. Електричні системи та мережі: конспект лекцій / укладачі: І. Л. Лебединський, В. І. Романовський, Т. М. Загородня. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 214 с.

22. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник [Електронний ресурс] / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022.–150 с. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>

23. Коваль В.П., Тарасенко М.Г., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/45300>.

24. Тишко В.І, Буняк О.А. Оцінка реактивної потужності ділянки електричної мережі. // В. Тишко, О. Буняк / Міжнародній науково-технічній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (28-29 травня 2025 року), Тернопіль: ТНТУ імені І. Пулюя. – 2025. – 67 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48896>.

