

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) **О. КОЛЛАРОВ**
(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Визначення параметрів стійкості електричної системи

Виконав студент 3 курсу, групи ЕЛКЗ-20
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

Олександр ЛИФЕНКО

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник ст.викл. Е. НЕМЦЕВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Нормоконтроль:

Е. НЕМЦЕВ

(підпис)

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

(дата)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Олександр ЛІФЕНКУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Визначення параметрів стійкості електричної системи

керівник роботи Едуард НЕМЦЕВ, ст.викл.

(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Схема електричної системи.

Характеристики генераторів: номінальна потужність – 210 МВА, номінальна
напруга – 10,5 кВ, номінальний струм – 4,1 кА, коефіцієнт навантаження –

0,85, значення опорів – 1,58 в.о., 0,02 в.о., 0,22 в.о., 0,25 в.о.. Питомий опір

лінії електропередач – 0,35 Ом/км. Типи застосованих трансформаторів:

ТДЦ-250000/110, ТДЦ-200000/110. Характеристики навантаження: активна

потужність – 160 МВт, номінальна напруга – 210 кВ, коефіцієнт потужності –

0,85, довжини ліній живлення – 50 км. Потужність енергосистеми – 250 МВА.

Потужність трифазного КЗ системи – 10000 МВА. Базисна потужність – 230

МВА, базисна напруга – 230 кВ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд загальних відомостей про стійкість електричних систем.
 2. Огляд факторів, що впливають на стабільність роботи електричних систем.
 3. Розрахунок параметрів стабільності електричної системи.
 4. Моделювання процесів роботи генератора та параметрів стабілізації.
 5. Огляд питань охорони праці та експлуатації.
 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)
- Десять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 5	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 6 травня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	06.05.24 – 12.05.24	
2.	Розділ 2	13.05.24 – 19.05.24	
3.	Розділ 3	20.05.24 – 26.05.24	
4.	Розділ 4	27.05.24 – 09.06.24	
5.	Розділ 5	10.06.24 – 15.06.24	

Студент _____
(підпис)

Олександр ЛИФЕНКО
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Едуард НЄМЦЕВ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Олександр ЛИФЕНКО. Визначення параметрів стійкості електричної системи / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2024.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено огляд загальних відомостей про стійкість електричних систем.

У другому розділі були визначені фактори, що впливають на стабільність роботи електричних систем.

У третьому розділі здійснено розрахунок параметрів стабільності електричної системи.

У четвертому розділі було здійснено моделювання процесів роботи синхронного генератора та параметрів стабілізації.

Ключові слова: електрична система, параметри стійкості, параметри стабільності, критерії стабільності, фактор навантаження, фактор зміни генерації, зовнішні перешкоди, схема заміщення, статична стійкість, динамічна стійкість, синхронний генератор, моделювання

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ	9
1.1 Огляд існуючих електричних систем та їх значення	9
1.2 Способи визначення параметрів стійкості та стабільності електричних систем	12
1.3 Способи визначення ключових параметрів стабільності енергетичних систем	15
1.4 Критерії стабільності електричних систем	20
2 ОГЛЯД ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СТАБІЛЬНІСТЬ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ	23
2.1 Фактор навантаження	23
2.2 Фактор зміни генерації	25
2.3 Фактор зовнішніх перешкод	26
2.4 Огляд літературних джерел	28
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СТАБІЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ	34
3.1 Завдання початкових параметрів	34
3.2 Визначення параметрів схеми заміщення та розрахунок режиму, що встановився	35
3.3 Розрахунок статичної стійкості	39
3.4 Розрахунок динамічної стійкості	42
4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ТА ПАРАМЕТРІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ	45
ВИСНОВКИ	58

	6
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	60
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	63
ДОДАТОК Б. ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК (ВИТЯГ)	69
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	85

ВСТУП

Стійкість електричних систем є одним з ключових аспектів забезпечення надійного та безперебійного електропостачання. З огляду на збільшення складності сучасних енергетичних систем та інтеграцію відновлюваних джерел енергії, дослідження стійкості електричних систем набуває особливої актуальності. Стабільність таких систем є надзвичайно важливою для економічної стабільності, безпеки та технологічного розвитку суспільства.

Стійкість електричних систем визначає їх здатність залишатися в стабільному робочому стані після виникнення внутрішніх або зовнішніх збурень. Стабільність можна розділити на декілька типів: статичну, перехідну та динамічну. Кожен з цих типів стійкості має свої особливості та вимагає ретельного дослідження для забезпечення надійної роботи енергосистеми.

Значення стабільності електричних систем важко переоцінити. Від її забезпечення залежить не тільки надійне постачання електроенергії, але й безпека роботи критичних об'єктів інфраструктури. Недостатня стабільність може призвести до серйозних аварій, економічних втрат та загрози життю людей. Тому дослідження в даній області мають вирішальне значення для забезпечення надійності та безпеки електропостачання.

Для дослідження необхідно застосувати комплексний підхід до вирішення проблеми стабілізації роботи синхронних генераторів. Зокрема, шляхом використання цифрових систем керування можна оперативно реагувати на зміни в системі та забезпечувати підтримку стабільного режиму роботи. При цьому теоретична частина повинна базуватися на аналізі існуючих підходів до моделювання та аналізу стійкості, розробці нових математичних моделей та алгоритмів.

Мета роботи – розробка та впровадження ефективних методів стабілізації роботи синхронних генераторів за допомогою цифрових систем керування.

Завдання роботи:

- здійснити аналіз існуючих методів стабілізації синхронних генераторів та визначення їх ефективності,
- розробити моделі синхронного генератора з урахуванням впливу різних збурень,
- розробка цифрової системи керування для стабілізації роботи синхронного генератора,
- визначення оптимальних параметрів регуляторів для забезпечення стабільної роботи,
- здійснення симуляцій та експериментів для перевірки ефективності запропонованої системи керування,
- аналіз результатів симуляцій та експериментів, порівняння з існуючими методами.
- розробка рекомендацій щодо впровадження цифрових систем керування в реальних умовах експлуатації електричних систем.

Об’єкт досліджень – електричні системи з синхронними генераторами.

Предмет досліджень – методи та засоби стабілізації роботи синхронних генераторів.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Огляд існуючих електричних систем та їх значення

Електричні системи являють собою складні мережі, яким притаманно вироблення, передача, розподіл та споживання електричної енергії. Ці системи мають широкий спектр компонентів: електричні станції, трансформатори, лінії електропередачі, підстанції, лінії розподілу та пристрої кінцевого споживача. Основне завдання функціонування електричної системи – надійно та безперервно постачати електричну енергію від джерел електроенергії до споживачів, забезпечуючи задоволення потреб споживачів енергії [1].

В основі будь-якої електричної системи маєтся блок генерації електричної енергії, що мають змогу працювати від різних джерел енергії (викопне паливо, ядерна енергія, відновлювані ресурси та інше). Генерована електрична енергія зазвичай передається у формі змінного струму і часто має відносно низьке значення напруги. Для того щоб мінімізувати втрати енергії під час передачі, цю напругу підвищують до високих потенціалів за допомогою трансформаторів, що забезпечує ефективну передачу електричної енергії на значні відстані по лініях електропередачі [1].

Лінії електропередач, які є основою електричних систем, транспортують електроенергію високої напруги на значні відстані. Ці лінії розроблені та спроектовані таким чином, щоб витримувати впливи навколишнього середовища та забезпечувати мінімальні втрати потужності на шляху транспортування. Досягнувши місць споживання, енергія високої напруги знижується на електричних підстанціях, обладнаних трансформаторами – електроенергія «готується» для розподілу кінцевим споживачам через розподільні мережі. Розподільні мережі є кінцевою системою постачання електричної енергії, що складається з ліній середньої

та низької напруги, які передають електроенергію до кінцевих споживачів. Ці мережі налаштовані на роботу зі змінним і часто непередбачуваним характером споживання електричної енергії [2].

Електричні системи містяться в основі практично кожного аспекту життя, виробництва та економічної діяльності. Надійне електропостачання має вирішальне значення для функціонування критичної інфраструктури, стимулювання технологічного прогресу та промислового зростання та іншого. Стійкість і стабільність роботи електричних систем мають першочергове значення для безпеки роботи підприємств та економічної стабільності, а випадки припинення електропостачання може мати далекосяжні наслідки, порушуючи основні технологічні процеси, викликати економічні збитки та потенційну загрозу життю працівників. Таким чином, підтримка стабільності та надійності електричних систем є головною турботою для електропостачальних компаній [2].

Стабільність в електричних системах є обов'язковою умовою, яка визначає здатність енергосистем повертатися до стану рівноваги після внутрішніх та/або зовнішніх збурень. Електрична стабільність визначається кількома типами, кожен з яких відповідає різним аспектам поведінки системи та реакції на збурення. Серед основних типів стійкості в електричних системах є стійкість у стаціонарному режимі, стійкість при перехідних процесах і динамічна стійкість [3].

Стабільність у стаціонарному режимі стосується здатності системи підтримувати синхронізм при невеликих поступових змінах навантаження або генерації. Це передбачає здатність системи обробляти повільні та передбачувані коливання, не «відчуваючи» відхилень, які можуть призвести до нестабільності. У стаціонарних умовах енергосистема працює в своїх нормальних робочих межах, і будь-які відхилення коригуються за допомогою механізмів автоматичного керування, таких як регулятори напруги та регулятори частоти. Перехідна стабільність визначає режими, коли система відповідає реакцією на значні раптові порушення, такі як

короткі замикання, збої в лініях електропередачі або раптове скидання генерації енергії. Ці перешкоди можуть спричинити значні відхилення напруги, частоти та потоків потужності, потенційно викликаючи втрати синхронізму між різними частинами системи. Аналіз перехідної стабільності дозволяє визначати здатність системи протистояти наведеним порушенням і повертатися до стабільного робочого стану протягом короткого періоду часу. При цьому вивчають поведінку генераторів, ліній електропередачі та інших компонентів під час і після порушення, щоб переконатися, що вони можуть відновити працездатність без втрати синхронізму. Динамічна стабільність пов'язана з поведінкою системи протягом тривалого часу після моменту виникнення збурення, враховуючи як негайну реакцію, так і довгострокові наслідки. Це передбачає вивчення взаємодії різних систем керування, автоматичні регуляторів напруги, стабілізаторів живлення та регуляторів, які працюють для гасіння коливань і підтримки стабільності протягом тривалого періоду. Аналіз динамічної стабільності може визначати режими, при яких система може залишатися стабільною за постійних або повторюваних збурень, таких як коливання навантажень або мінливість генерації енергії [4].

Стабільність електричних систем не обмежується лише здатністю підтримувати синхронізм. Вона також визначає стабільність напруги на усіх рівнях напруги, на всіх шинах як у нормальних так і в аварійних умовах роботи. Стабільність напруги має вирішальне значення для запобігання провалу напруги, який може статися, коли попит на реактивну потужність перевищує постачання, що призводить до швидкого зниження рівнів напруги та потенційно призводить до знеструмлення споживачів. Іншим важливим аспектом є стабільність частоти, що визначає здатність енергосистеми підтримувати постійну частоту в заданих межах, що можуть виникати через дисбаланс між виробництвом і споживанням електричної енергії.

Отже, стабільність в електричних системах – це багатогранна проблема, яка охоплює стаціонарну, перехідну, динамічну стабільність, стабільність напруги та частоти. Кожен вид стабільності стосується різних аспектів поведінки системи та реагування на порушення, забезпечуючи надійну та безпечну роботу енергосистеми за різних умов. Розуміння та підтримка стабільності має вирішальне значення для ефективного функціонування електричних систем, запобігання збоєм і забезпечення безперервного постачання електроенергії споживачам.

1.2 Способи визначення параметрів стійкості та стабільності електричних систем

Визначення параметрів стійкості в електричних системах має провідне значення для забезпечення надійної та ефективної роботи електричних мереж. Параметри стабільності дають вичерпне уявлення про поведінку системи за різних робочих умов і наявних збурень. Маючи в наявності ці параметри можна приймати обґрунтовані рішення для підтримки цілісної роботи системи, запобігання відключень електромереж та забезпеченні оптимальної продуктивності [5].

Однією з першочергових причин визначення параметрів стабільності є необхідність забезпечення безперервності електропостачання. Системи живлення піддаються широкому діапазону збоїв, від незначних змін навантаження до серйозних збоїв або припинення генерації. До параметрів стабільності відносять рівні напруги, відхилення частоти та зсув між фазами – вони допомагають оцінити здатність системи протистояти цим збуренням і відновлюватися після них. Точне визначення значень цих параметрів дозволить розробити захисні пристрої та заходи і відповідні стратегії контролю, які допоможуть зменшити вплив збурень, тим самим

підвищивши стійкість функціонування електромереж. Параметри стабільності є вирішальними для забезпечення безпеки у системі. У досить сильно взаємопов'язаних електромережах відмова одного компонента може мати каскадні наслідки, що потенційно може призвести до масових відключень. Оцінюючи параметри стабільності необхідно виявити слабкі місця в системі та впровадити коригувальні дії для впровадження відповідних заходів. Цей попереджувальний підхід допомагає запобігти поширенню несправностей і гарантує, що система залишається надійною проти потенційних загроз. Крім того, нестабільність електричних систем може призвести до значних економічних втрат через відключення електроенергії, пошкодження обладнання та неефективність роботи [5].

Законодавчі нормативи і стандарти підкреслюють важливість дотримання зазначених у них параметрів стабільності. Регуляторні органи повинні вимагати від операторів енергосистем дотримання певних критеріїв стабільності, щоб забезпечити безпечну та надійну роботу мережі. Визначаючи параметри стабільності, оператори можуть забезпечити дотримання цих правил, уникаючи штрафних санкцій та сприяючи загальній надійності функціонування енергосистем [6].

Швидкий розвиток технологій і зростаюча складність електричних систем вимагають глибокого розуміння параметрів стабільності. Сучасні енергетичні системи включають передові технології, такі як розумні мережі та розподілена генерація – ці технології взаємодіють складним чином, впливаючи на стабільність роботи електричних систем. З метою визначення параметрів стабільності гарною підмогою може бути розробка складних моделей та симуляцій, які реалізують ці взаємодії, забезпечуючи точніші прогнози та краще керування системою.

Стабільність електричних систем має суттєвий вплив як на продуктивність електричних систем, так і на їх безпеку. Нестабільна електрична система може призвести до численних несприятливих наслідків, починаючи від зниження ефективності та надійності до

серйозної загрози безпеці. Розуміння та підтримка параметрів стабільності має вирішальне значення для того, щоб електричні системи працювали в межах запланованих параметрів продуктивності та не створювали ризиків для безпеки обслуговуючого персоналу та електрообладнання.

Перехідна стабільність, яка визначає реакцію системи на раптові порушення, відіграє вирішальну роль у забезпеченні працездатності системи. Під час збоїв, таких як короткі замикання або раптове скидання генерації, здатність системи швидко повернутися до стабільного стану є першочерговою. Якщо системі не вдається швидко відновитися, це може призвести до тривалих відключень, що знизить надійність електропостачання. Нестабільні режими роботи систем можуть створювати небезпечні умови як для персоналу, так і для обладнання. У контексті електричних підстанцій і ліній електропередач підтримка стабільності є важливою для запобігання несправностям і забезпечення безпечної роботи – електричні несправності можуть спричинити небезпечні умови, такі як утворення дуги, що становить серйозну загрозу безпеці. Параметри стабільності допомагають розробити захисні системи, які можуть швидко виявляти та ізолювати несправності, мінімізуючи ризик нещасних випадків і пошкодження обладнання. Крім того, стабільна робота зменшує ймовірність каскадних збоїв, коли початкова несправність може поширюватися мережею, спричиняючи широкомасштабні збої та загрози безпеці [4].

Стабільні по суті електричні системи забезпечують ефективну та надійну роботу, захищають обладнання та мінімізують ризики безпеки. І навпаки, нестабільність може призвести до неефективності, пошкодження обладнання та небезпечних умов. Таким чином, підтримка та управління параметрами стабільності має вирішальне значення для оптимізації продуктивності системи та забезпечення безпеки як персоналу, так і інфраструктури.

1.3 Способи визначення ключових параметрів стабільності енергетичних систем

Визначення ключових параметрів стабільності в електричних системах є критично важливим завданням для забезпечення надійної та ефективної роботи електромереж.

Параметри стабільності – це конкретні змінні або показники, які характеризують здатність електричної системи підтримувати рівновагу за різних умов роботи. Ці параметри забезпечують повне уявлення про динаміку поведінки системи, дозволяючи здійснювати ефективний контроль та керування системами [7].

Одним із основних параметрів стабільності роботи систем, що розглядаються, є стабільність напруги, яка визначає здатність енергосистеми підтримувати прийнятні рівні напруги на всіх шинах за нормальних умов експлуатації та після виникнення «нестандартних» ситуацій. На стабільність напруги впливають такі фактори, як навантаження, потужність генерації і підтримка належного рівня реактивної потужності в системі. Ключовими показниками, що використовуються для оцінки стабільності напруги, є величина напруги, об'єм реактивної потужності та показники стабільності величини напруги.

Розмах коливань напруги визначається за виразом, В [8]:

$$\delta U_t = \sqrt{\frac{\int_{f_2}^{f_4} G_U(f) df + \int_{f_1}^{f_3} G_U(f) df}{\int_0^{\infty} G_U(f_0) df}} = \frac{\sqrt{\int_{f_2}^{f_4} G_U(f) df + \int_{f_1}^{f_3} G_U(f) df}}{U_{ном}} \quad (1.1)$$

де $G_U(f)$ – енергетичний спектр напруги, В,

f_i – відповідна частота напруги, Гц,

$U_{ном}$ – значення номінальної напруги, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг [8]:

$$K_{2U} = \frac{\sqrt{\int_0^{\infty} G_{2U}(f) df}}{U_{ном}} \quad (1.2)$$

Коефіцієнт викривлення синусоїдності [8]:

$$K_U = \frac{\sqrt{\int_{f_4}^{\infty} G_U(f) df}}{U_{ном}} \quad (1.3)$$

Коефіцієнт викривлення синусоїдності напруги [8]:

$$K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2} \cdot \frac{100\%}{U_{ном}} \quad (1.4)$$

де U_n – діюче значення напруги n-ої гармонійної складової, В.

Коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги [8]:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

Коефіцієнт несиметрії напруг зворотної послідовності [8]:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

де $U_{2(l)}$ – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти, В.

Коефіцієнтом несиметрії напруг нульової послідовності [8]:

$$K_{0U} = \frac{U_{0(l)}}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

де $U_{0(l)}$ – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти, В.

Іншим важливим параметром є стабільність частоти, який відображає здатність системи підтримувати постійну частоту після збурення. Цей тип стабільності має вирішальне значення, оскільки відхилення частоти може впливати на роботу електричних машин і загальний баланс між генерацією та навантаженням. Стабільність частоти оцінюється за допомогою таких параметрів, як відхилення частоти, швидкість зміни частоти і коефіцієнт частотної характеристики. Ці параметри допомагають зрозуміти здатність системи реагувати та відновлюватися після виникнення дисбалансу між постачанням електричної енергії та її споживанням [8].

Синхронна стабільність є ключовим параметром, який визначає здатність генераторів залишатися в режимі синхронізму після виникнення збурень. Зазначена стабільність має вирішальне значення для запобігання втраті синхронізму, що може призвести до від'єднання системи та непередбачених відключень. Параметри, що використовуються для оцінки синхронної стабільності, включають відхилення фази, коефіцієнт згладжування та результаті амплітудних вимірювань. Зазначений параметр допомагає те тільки визначити стійкість системи до збурень але і впливають на механічну міцність генераторів [9].

Перехідна стабільність визначає реакцію системи на потужні порушення і визначає критичний час відновлення, який є максимальним часом для спрацювання захисних пристроїв, робота яких направлена на усунення несправностей та режимів нестабільної роботи.

Динамічна стабільність визначає як незначні збурення, так і перехідну стабільність, та оцінюється за допомогою параметрів, які описують реакцію системи з часом на безперервні або повторювані збурення. До них належать частота коливань, коефіцієнт демпфування та коефіцієнти впливу, які визначають вплив різних компонентів на виникнення коливань у системі. Параметри динамічної стабільності мають важливе значення для проектування систем керування, таких як стабілізатори системи живлення, і визначають загальну стабільність системи [7].

Таким чином, визначення ключових параметрів стабільності в електричних системах передбачає визначення стабільності напруги, стабільності частоти, синхронності фаз, перехідної та динамічної стабільності. Кожен із цих параметрів дає важливе уявлення про різні аспекти поведінки системи та реакції на порушення. Точна ідентифікація та аналіз цих параметрів мають важливе значення для розробки надійних і стійких енергетичних систем, здатних підтримувати стабільність у широкому діапазоні робочих умов.

Впровадження методів оцінки параметрів стабільності роботи електричних систем є важливим для підтримки надійності та ефективності функціонування електромереж. Методи точної оцінки дозволяють зрозуміти поведінку системи за різних умов, передбачити можливі проблеми стабільності та впровадити відповідні стратегії зменшення їх впливу. Ці методи охоплюють як аналітичні, так і обчислювальні підходи, кожен з яких дозволяє оцінити конкретні параметри, що характеризують стабільність.

Аналітичні методи надають теоретичну основу та спрощені моделі, які відображають динаміку електричних систем. Для забезпечення

стабільності напруги зазвичай використовуються такі аналітичні методи, як аналіз потоку потужності та метод зміни потоку потужності. Ці методи передбачають вирішення рівнянь, що визначають зміну потужності в часі для визначення рівнів напруги та об'ємів генерації реактивної потужності на різних шинах за різних умов навантаження.

Оцінка стабільності частоти спирається на аналізі сигналу напруги. Аналіз диференціальних рівнянь сигналів напруги передбачає їх лінеаризацію в робочій області та аналіз отриманих значень складеної матриці рішень. Розташування цих рішень у комплексній площині дає інформацію про стабільність частотної характеристики системи. У разі виходу отриманих значень за визначені заздалегідь параметри вказують на наявність нестабільності. Швидкість зміни частоти і отримані частотні характеристики можуть бути використані для оцінки здатності системи підтримувати стабільність частоти за різних сценаріїв функціонування системи.

Стабільність синхронізації зазвичай оцінюється за допомогою моделювання у часовій області та аналізу стабільності в перехідних режимах. Моделювання в часовій області включає розв'язання диференціальних рівнянь, що описують динаміку синхронних машин і мережу енергопостачання в часі. Цей метод забезпечує детальне розуміння реакції системи на суттєві порушення в системі. Динамічна стабільність оцінюється за допомогою таких методів, як модальний аналіз і аналіз факторів участі. Модальний аналіз визначає природні коливання у системі та відповідні їм коефіцієнти демпфування. Аналіз різноманітних факторів участі визначає внесок різних компонентів системи в режими роботи компонентів системи, допомагаючи визначити критичні стани, які впливають на стабільність їх роботи [7].

Розробка методів оцінки параметрів стабільності передбачає поєднання аналітичних і обчислювальних підходів, призначених для оцінки стабільності різних параметрів. Ці методи забезпечать критичне

розуміння поведінки електричних систем за різних умов, дозволяючи здійснювати проектування надійних систем та впроваджувати ефективні заходи підвищення стабільності.

1.4 Критерії стабільності електричних систем

Стабільність електричних систем має вирішальне значення для забезпечення безперервної та надійної роботи. Критерії стабільності зазвичай поділяють на стабільність у стаціонарному стані та стабільність у динамічному стані, кожен з яких стосується різних аспектів продуктивності системи у відповідь на різні збурення.

Стабільність у стаціонарному стані стосується здатності енергосистеми підтримувати синхронізм під час невеликих збурень. Ці збурення зазвичай є незначними коливаннями навантаження або генерації, які виникають під час нормальної роботи. Аналіз стабільності в стаціонарному стані зосереджується на реакції системи на ці незначні збурення та визначає, чи може система повернутися до стабільної рівноваги, не відчувуючи коливань, які зростають з часом. Основною проблемою цього стану є поведінка синхронних генераторів та їх взаємодія з мережею. Коли виникають незначні збурення, частота обертання генератора може зазнавати коливань. Для стабільності системи ці коливання повинні згасати з часом, що призводить до нового стабільного режиму – «робочої точки». Цю стабільність можна оцінити за допомогою аналізу приватних значень лінеаризованих рівнянь системи, що описують робочі характеристики. Якщо всі приватні значення мають від’ємні дійсні корені, система вважається стабільною, що вказує на те, що будь-які коливання згасають природним чином [10].

Фактори, що впливають на стабільність у стаціонарному стані, враховують конфігурацію системи, налаштування систем керування, автоматичних регуляторів напруги, стабілізаторів та поточних умов роботи. Ефективна конструкція та налаштування цих елементів керування необхідні для підвищення стабільності в стаціонарному режимі.

Стабільність у динамічному стані (також відома як перехідна стабільність), пов'язана зі здатністю системи підтримувати синхронізм під час серйозних збурень. Ці перешкоди, як правило, значні та раптові, наприклад, короткі замикання, зупинка основного генератора чи від'єднання навантаження або раптові зміни в конфігурації мережі. Стабільність у динамічному стані спирається на негайну та динамічну реакцію системи після таких важливих подій. Аналіз стабільності в динамічному стані передбачає перевірку перехідної поведінки системи протягом короткого періоду, як правило, від секунд до кількох хвилин. При цьому визначається, чи може система перейти від стану, що був до збурення, до стану, що настав після збурення, зберігаючи при цьому синхронізм між генераторами. Критичним аспектом стабільності в динамічному стані є здатність генераторів залишатися синхронізованими під час і після збурення. Якщо порушення викликає значну розбіжність синхронізму, система може частково або повністю знеструмитися. Стабільність у динамічному стані може бути проаналізована за допомогою моделювання у часовій області, що дозволяє схарактеризувати та описати нелінійну поведінку енергосистеми під час збурень. Ці симуляції допомагають зрозуміти динамічну взаємодію між різними компонентами системи та визначити потенційні проблеми стабільності. Результати цих аналізів використовуються для розробки та впровадження коригувальних дій, таких як швидкодіючі системи захисту, контрольоване відключення та заходи посилення системи [10].

Отже, стабільність у стаціонарному та динамічному стані є критичними критеріями для оцінки надійності систем електроенергії.

Стабільність у стаціонарному стані гарантує, що система може впоратися з незначними флуктуаціями під час нормальної роботи без зростаючих коливань, тоді як стабільність великого сигналу гарантує, що система може витримувати значні перешкоди та відновлюватися після них. Обидва типи стабільності мають важливе значення для підтримки надійного та безпечного живлення, і вони вимагають ретельного розгляду та управління за допомогою розширених стратегій контролю, захисних заходів і практик проектування системи.

2 ОГЛЯД ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СТАБІЛЬНІСТЬ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Фактор навантаження

Електрична стабільність означає здатність енергосистеми підтримувати стан рівноваги за нормальних робочих умов і відновлювати попередній стан рівноваги після збурення. Ця здатність має вирішальне значення для забезпечення надійного та безперервного електропостачання споживачів. Електричну стабільність можна розділити на кілька категорій: стабільність напруги, стабільність частоти, синхронна стабільність, стабільність при перехідних процесах і динамічна стабільність. Кожна категорія стосується різних аспектів поведінки системи та реакцій на збурення [11].

Зміна навантаження відіграє вирішальну роль для стабільності електричних систем. Попит на електричну енергію є динамічним процесом – коливається залежно від добових циклів, сезонних змін і несподіваних подій. Різні варіації навантаження можуть суттєво вплинути на стабільність електричної системи, вимагаючи ретельного моніторингу та контролю для забезпечення стабільної та надійної роботи. В першу чергу зміни навантаження впливають на стабільність напруги, яка є показником здатності електричної системи підтримувати постійну напругу на всіх шинах системи після того, як вона зазнала збурення. Коли навантаження на електричну систему зростає, потреба в реактивній потужності також зростає. Якщо джерела реактивної потужності недостатньо для задоволення цього підвищеного попиту, рівень напруги може знизитись, що призведе до нестабільності значення напруги. Це може спричинити суттєвий провал або накидання напруги, що є серйозною формою нестабільності і може призвести до локального скидання навантаження або навіть відключення всієї системи [11].

Різка зміна навантаження може суттєво впливати на стабільність частоти та здатності системи підтримувати її на постійному рівні після збурень. У електричній системі генерація та навантаження повинні бути збалансовані, що дозволить підтримувати стабільну частоту. Раптові зміни навантаження, наприклад запуск або зупинка великих промислових двигунів, можуть спричинити значні відхилення частоти. Якщо частота системи надто сильно відхиляється від свого номінального значення, це може призвести до відключення генераторів і навантажень, що ще більше дестабілізує систему. Коливання навантаження можуть впливати на стабільність частоти обертання ротора синхронних машин. Якщо відхилення частоти обертання перевищує певні межі, це може призвести до втрати синхронізму між генераторами, що призводить до нестабільності системи або відключення постачання електричної енергії [11].

Суворість впливу змін навантаження на стійкість залежить від характеру та величини змін. Невеликими та поступовими змінами навантаження зазвичай легше керувати, оскільки механізми керування системою можуть ефективно реагувати на ці зміни. Однак великі та різкі зміни навантаження становлять суттєву проблему. Характеристики навантаження відіграють значну роль для підтримки стабільності. Отже, коливання навантаження є фундаментальним фактором, що впливає на стабільність електричних систем. Ефективне управління варіаціями навантаження повинно передбачати надійну стратегію контролю, моніторингу в реальному часі та прогнозу аналітику для передбачення та пом'якшення потенційних проблем стабільності. Розуміючи та враховуючи вплив зміни навантаження, електричні системи можуть досягти більшої надійності та стійкості, забезпечуючи постійне постачання електроенергії для задоволення динамічних потреб споживачів.

2.2 Фактор зміни генерації

Варіативність генерації є значним фактором, що впливає на стабільність електричних систем. Це стосується змін вихідної потужності генераторів, які можуть статися через низку причин, включаючи коливання в постачанні палива, механічні несправності та експлуатаційні чинники.

Один із основних ефектів зміни генерації – це стабільність частоти. У об'єднаній енергосистемі частота підтримується шляхом балансування загальної генерації із загальним навантаженням. Коли генератор раптово вимикається або знижує свою потужність, виникає негайний дисбаланс, що призводить до падіння частоти системи. І навпаки, якщо генератор несподівано збільшить свою потужність, частота підвищиться. Ці відхилення частоти повинні бути негайно виправлені, щоб уникнути спрацювання механізмів захисту від низької або підвищеної частоти, що може призвести до відключення споживачів і генераторів, посилюючи нестабільність. Зміна генерації також впливає на стабільність напруги. На величину напруги в різних точках електричної системи впливає баланс реактивної потужності. Генератори є основними джерелами як активної, так і реактивної потужності. Коли є зміни в генерації, особливо у вихідній реактивній потужності, це може призвести до коливань напруги. Ступінь впливу зміни генерації на стабільність залежить від величини та швидкості цих змін, а також від можливості системи реагувати на ці зміни. Системи зі швидким введенням резерву і вдосконалені системи керування можуть поратися зі зміною генерації. Крім того, у «розумних» мережах використовують різні стратегії, що базуються на автоматичному керування генерацією з можливістю регулювання частоти для динамічного керування балансом між попитом і пропозицією [11].

Отже, коливання генерації є досить критичним фактором, що впливає на стабільність електричних систем. Ефективне управління цими змінами

вимагає поєднання моніторингу в реальному часі, надійних механізмів контролю та стратегічного планування. Розуміючи природу та вплив зміни генерації, електричні системи можна проектувати та експлуатувати для досягнення більшої стійкості та надійності, забезпечуючи стабільне та безперервне електропостачання, незважаючи на властиві коливання генерації.

2.3 Фактор зовнішніх перешкод

Зовнішні перешкоди є досить суттєвим фактором, що впливає на стабільність електричних систем. Ці перешкоди виникають внаслідок подій або умов, що знаходяться поза контролем операторів енергосистеми, і включають природні явища, діяльність людини та навмисні впливи. Їх непередбачувана природа та можливість спричиняти раптові сильні «удари» визначають необхідність керування зовнішніми порушеннями доволі критичним чинником підтримки стабільності системи.

Такі природні явища, як удари блискавки, землетруси, урагани та суворі погодні умови, можуть спричинити різкі зміни в електричній системі. Блискавки можуть викликати перехідні процеси високої напруги, які можуть пошкодити обладнання та призвести до коротких замикань. Землетруси та урагани можуть порушити роботу ліній електропередач, підстанцій і генеруючих об'єктів, що призведе до значних перебоїв у подачі електроенергії. Ці події можуть призвести як до тимчасової, так і до тривалої нестабільності в системі, що вимагає швидкого та ефективного реагування для відновлення стабільності та мінімізації збитків [12].

Випадкові дії людей, такі як пошкодження підземних кабелів будівельним обладнанням або помилка людини під час технічного обслуговування, можуть призвести до збоїв і перебоїв у електропостачанні.

Крім того, зростання загрози кібератак створює значний ризик для стабільності електричних систем. Кібератаки можуть бути спрямовані на системи управління, порушувати комунікаційні мережі та маніпулювати оперативними даними, потенційно спричиняючи широку нестабільність і збої.

Навмисні «людські» впливи, такі як фізична диверсія чи тероризм, також становлять серйозну загрозу. Ці дії можуть безпосередньо пошкодити критично важливу інфраструктуру, порушити електропостачання та спричинити каскадні збої в мережі. Забезпечення фізичної безпеки електростанцій, підстанцій і ліній електропередач має важливе значення для зменшення ризику таких порушень.

Вплив зовнішніх збурень на стабільність системи може проявлятися різними способами. Стабільність напруги може бути порушена через раптові збої в мережі передачі, що призведе до провалів або перепадів напруги. На стабільність частоти може вплинути раптова втрата генерації або навантаження, викликаючи відхилення від номінальної частоти, які необхідно виправити, щоб уникнути спрацьовування схем захисту та подальшої дестабілізації системи.

Стабільність частоти обертання ротора особливо вразлива до зовнішніх збурень, які викликають значні раптові зміни генерації або навантаження. Якщо ці коливання не гасяться ефективно, це може призвести до втрати синхронізму між генераторами, що призведе до часткового або повного відключення електроенергії [11].

Пом'якшення впливу зовнішніх завад вимагає комплексної готовності та стратегій реагування. Моніторинг у режимі реального часу та розширені системи керування необхідні для швидкого виявлення збоїв і реагування на них. Автоматизовані схеми захисту, автоматичне повторне включення, можуть допомогти ізолювати несправності та підтримувати цілісність системи. Крім того, стійкість мережі можна підвищити за рахунок зміцнення інфраструктури і використання сучасних матеріалів для кабелів

і обладнання, щоб витримувати екстремальні умови. Системні оператори мають змогу використати системне планування на випадок надзвичайних ситуацій та використовувати моделювання, щоб передбачити потенційні порушення та розробити протоколи реагування. Спільні зусилля є вирішальними для вирішення багатогранної природи зовнішніх перешкод [11].

Отже, зовнішні перешкоди є основним фактором, що впливає на стабільність електричних систем. Їх непередбачувані та потенційно серйозні наслідки вимагають постійної готовності, моніторингу в режимі реального часу та заходів швидкого реагування. Розуміючи різні джерела та наслідки зовнішніх збурень, електричні системи можна спроектувати та експлуатувати для досягнення більшої стійкості та стабільності, забезпечуючи надійне електропостачання перед обличчям різноманітних та динамічних проблем.

2.4 Огляд літературних джерел

У [13] розглядаються питанням стабільності сучасних енергосистем, зокрема в контексті інтеграції України до європейської мережі (ENTSO-E). Дослідження акцентує увагу на теоретичних основах аналізу стабільності вимірювальних сигналів та їх практичному застосуванні для перевірки динамічних моделей енергосистеми. Значна частина досліджень передбачає використання як аналізу стабільності вимірювального сигналу, так і моделювання у часовій області для забезпечення надійності та точності динамічних моделей. Основною метою дослідження є вирішення технічних проблем, пов'язаних із синхронною роботою «Об'єднаної енергосистеми України» (ОЕУ) з ENTSO-E. Ця інтеграція вимагає надійних рішень для стабільності частоти та контролю експортних потоків

електроенергії. Одним із ключових завдань є посилення гнучкого керування роботою ОЕУ шляхом включення в інтерфейс Бурштинської ТЕС лінії постійного струму (DC). Очікується, що ця лінія постійного струму підвищить надійність графіків експорту до ENTSO-E та збільшить резервну потужність Бурштинської ТЕС. Дослідження детально вивчає стабільність частоти ОЕУ, враховуючи лінію постійного струму між Хмельницькою атомною електростанцією та підстанцією Жешув. Було розроблено детальну модель для моделювання довгострокової динаміки, що включає різні автоматичні контролери генерації та систему керування ланкою постійного струму. Моделювання було зосереджено на таких сценаріях, як відключення генеруючих блоків на Бурштинській ТЕС. Результати показують, що сучасні програми ланцюга постійного струму значно покращують регулювання експортних потоків електроенергії в гібридних системах живлення змінного та постійного струму. Така гнучкість дозволяє краще контролювати резервну потужність на Бурштинській ТЕС, використовуючи вторинні резерви, якими керує національний автоматичний контролер генерації. У дослідженні робиться висновок, що інтеграція ліній постійного струму є життєво необхідною для покращення стабільності частоти та забезпечення успішної синхронної роботи з ENTSO-E.

У [14] зроблено поглиблений аналіз напруги та параметрів стабільності (VSI) та їх значення в оцінці стабільності енергосистеми. Дослідження стосується критичної проблеми нестабільності напруги, яка може призвести до серйозних відключень електроенергії та системних збоїв. Нестабільність напруги часто спричиняється раптовими змінами навантаження, відключенням лінії або відключенням генератора, що призводить до надмірного попиту та потенційного збою системи. Цей огляд підкреслює важливість VSI для оцінки стабільності напруги та пом'якшення таких ризиків. Основна мета дослідження полягає в тому, щоб переглянути та оцінити різні VSI на основі математичних моделей,

припущень, критичних суджень і методологій. Автори прагнуть визначити ефективність цих показників у прогнозуванні стабільності напруги, виявленні «слабких місць» та оптимізації розміщення та потужностей розподілених генераторів. Комплексне дослідження охоплює 34 різні показники з 138 джерел та здійснена їх класифікація. Однією з ключових цілей огляду був аналіз точності VSI у визначенні стабільності енергосистеми. Дослідження оцінює різні параметри на основі їх здатності оцінювати максимальну завантаженість, що може призвести до падіння напруги, запаси стабільності та оцінювати вірогідність виникнення непередбачених ситуацій. Огляд містить детальне порівняння сильних сторін і обмежень різних параметрів, пропонуючи розуміння їх практичного застосування в реальних сценаріях. Результати дослідження свідчать про те, що показники стабільності напруги є найважливішими інструментами для інженерів енергосистем – вони допомагають прогнозувати стабільність напруги, оцінювати серйозність умов системи та приймати обґрунтовані рішення для підвищення надійності системи. Огляд підкреслює необхідність постійного моніторингу та оцінки VSI для забезпечення стабільності енергосистем.

У [15] представлено інноваційний підхід до вирішення проблем перехідної стабільності енергосистеми за допомогою інформаційних нейронних мереж (PINN). Це дослідження обумовлено зростаючою складністю та інтеграцією відновлюваних джерел енергії та розподілених енергетичних ресурсів (DER) у сучасні енергетичні системи, які створюють значні проблеми для традиційних обчислювальних методів через їх трудомісткий та обчислювальний характер. Основною метою дослідження є оцінка ефективності PINN для моделювання стабільності перехідних процесів енергосистеми, яка передбачає здатність системи підтримувати стабільність і відновлюватися після збоїв, таких як зміни навантаження, збої або зупинка генератора. На відміну від традиційних методів, які значною мірою покладаються на розв'язування

диференціальних рівнянь за допомогою чисельних методів, PINN інтегрують машинне навчання з фізичними законами, що керують енергетичними системами, пропонуючи швидші та гнучкіші рішення. У роботі була здійснена розробка та оцінка PINN для різних енергетичних систем. Представлено новий підхід для коригування вагових коефіцієнтів втрат у PINN, щоб підвищити їхню адаптованість до різних конфігурацій енергосистеми. Результати дослідження показують, що PINN пропонують суттєві покращення швидкості обчислень і масштабованості без шкоди для точності. Ця ефективність має вирішальне значення для додатків у реальному часі та сценаріїв з обмеженою доступністю даних. Новий метод коригування вагових коефіцієнтів втрати виявився ефективним у підтримці точності PINN для систем різної складності, забезпечуючи надійну роботу навіть із збільшенням розміру системи. Дослідження робить висновок, що PINN є багатообіцяючим інструментом для аналізу перехідної стабільності енергосистеми, ефективно усуваючи розрив між підходами на основі даних і фізичним моделюванням. Використовуючи гнучкість PINN для включення додаткових рівнянь і налаштування до різних масштабів, дослідження демонструє їхній потенціал у підвищенні стабільності та надійності енергосистем.

У [16] досліджуються критичні проблеми та можливості дослідження, пов'язані зі стабільністю частоти в енергетичних системах, де міститься значна кількість силової електроніки та технологічні апарати на основі перетворювачів (ПЕС). Дослідження актуалізовано швидкою інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що створює значні проблеми для стабільності та надійності енергосистем через їх переривчасту роботу та непередбачуваний характер виробки енергії. Основна мета дослідження полягає в тому, щоб забезпечити всебічний аналіз проблем стабільності, які виникають через високе поширення технологій на основі ПЕС, і визначити потенційні шляхи вирішення цих проблем. Були здійснені дослідження причин і наслідків нестабільності частоти, історичний

контекст та значення стабільності частоти в енергосистемах, а також перегляд існуючих методів контролю та їх ефективності у вирішенні цих проблем. Дослідження підкреслює, що сучасні енергетичні системи стають дедалі складнішими через інтеграцію ВДЕ, що ускладнює можливості регулювання частоти. Дослідження визначає дві основні проблеми стабільності в сучасних енергетичних системах: стабільність, керовану перетворювачем, яка пов'язана з коливаннями, спричиненими взаємодією між динамічними електромеханічними пристроями та електромагнітними мережевими пристроями, і резонансну стабільність, яка передбачає коливальний обмін енергією через недостатнє розсіювання енергії. Щоб вирішити зазначені проблеми, у дослідженні розглядаються різні методи керування, включаючи автоматичне керування генерацією (AGC), прогнозне керування моделлю (MPC) і динамічне керування попитом (DDC). Результати дослідження вказують на те, що, хоча традиційні методи контролю є певною мірою ефективними, вони часто повільні та нестабільні при обробці швидких змін. Дослідження акцентує увагу на розробці нових інтелектуальних систем керування, які можуть реагувати в режимі реального часу та забезпечувати більш точне та ефективне регулювання частоти. Підкреслюється необхідність подальших досліджень передових стратегій управління, які використовують можливості сучасних обчислювальних інструментів і алгоритмів машинного навчання для підвищення стабільності та надійності енергосистем в умовах зростання проникнення ВДЕ.

У [17] досліджується використання інтелектуальних систем для підвищення стабільності енергетичних систем. Дослідження в основному зосереджено на перегляді різних інтелектуальних методів керування, таких як нейронні мережі, нечітка логіка та біоалгоритми оптимізації, для вирішення проблем стабільності в енергосистемах, які все частіше працюють поблизу своєї максимальної потужності через дерегуляцію та зростання споживання потужності. Основна мета дослідження полягає в

тому, щоб оцінити, як інтелектуальні системи можуть підвищити надійність і ефективність контролерів енергетичних систем, зокрема в управлінні нелінійними, динамічними та невизначеними системами. Традиційні методи управління часто борються зі складністю та непередбачуваністю сучасних енергосистем, що робить інтелектуальні системи багатообіцяючою альтернативою. Ці інтелектуальні системи можуть забезпечити кращий контроль за рахунок використання властивих властивостей спостережуваності та менших помилок моделювання, що призводить до більш ефективних контурів керування. Дослідження містять комплексний огляд впровадження інтелектуальних контролерів на стороні генерації. Результати дослідження свідчать про успішне застосування інтелектуальних контролерів для різних аспектів роботи та управління енергосистемою. Нейронні мережі та нечітка логіка продемонстрували значний потенціал у покращенні стабільності перехідних процесів, застосування алгоритмів оптимізації, заснованих на біотехнологіях, таких як генетичні алгоритми, для оптимізації параметрів стабілізаторів енергосистеми та систем збудження, що ще більше підвищує стабільність системи. Загалом у дослідженні зроблено висновок, що інтелектуальні системи пропонують життєздатне рішення для складних проблем управління в сучасних енергосистемах. Завдяки поєднанню різних принципів інтелектуального керування стабільність енергосистеми може бути значно покращена, забезпечуючи надійну та ефективну роботу навіть за екстремальних умов. Автори припускають, що майбутні дослідження мають бути зосереджені на інтеграції цих інтелектуальних систем у роботу енергосистеми в режимі реального часу, щоб повною мірою використовувати їхні потенційні переваги.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СТАБІЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Завдання початкових параметрів

Схема електричної системи, стабільність якої будемо визначати, наведено на рис. 3.1.

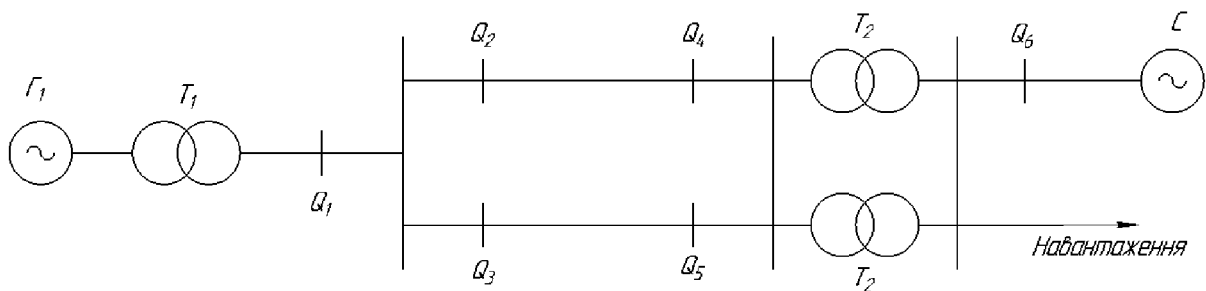


Рисунок 3.1 – Схема електричної системи

Характеристики елементів електричної схеми наведено у табл. 3.1–3.3.

Таблиця 3.1 – Характеристики генератора

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Потужність	S_H^r , МВА	210
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi_r$	0,85
Значення опорів, в.о.	x_d	1,58
	x_q	0,02
	x'_d	0,22
	x_2	0,25

Таблиця 3.2 – Характеристики трансформаторів [18]

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Т1		
Тип	—	ТДЦ-250000/110
Номинальна потужність	S_H^T , МВА	250
Напруги обмоток	U_{BH} , кВ	121
	U_{HH} , кВ	15,75
Напруга КЗ	$U_{KЗ}^{BH}$, %	10,5
Т2		
Тип	—	ТДЦ-200000/110
Номинальна потужність	S_H^T , МВА	200
Напруги обмоток	U_{BH} , кВ	121
	U_{HH} , кВ	15,75
Напруга КЗ	$U_{KЗ}^{BH}$, %	10,5

Таблиця 3.3 – Характеристики навантаження

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Активна потужність	P_n , МВт	160
Номинальна напруга	U_n , кВ	210
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi_n$	0,85
Довжина лінії живлення	L , км	50
Питомий опір лінії	x_l , Ом/км	0,35

3.2 Визначення параметрів схеми заміщення та розрахунків режиму, що встановився

Для дослідження параметрів стійкості складемо розрахункову схему заміщення електричної системи. Елементи електричної схеми містять

елементи, що характеризуються індуктивними опорами. Представимо напруги, навантаження та опори комплексній формі, а вимірювання значень – у відносних одиницях (в.о.). При цьому за базисні величини приймаємо номінальну потужність генератора та напругу на навантаженні.

Перетворюємо наведену на рис. 3.1 і отримаємо схему заміщення – рис. 3.2.

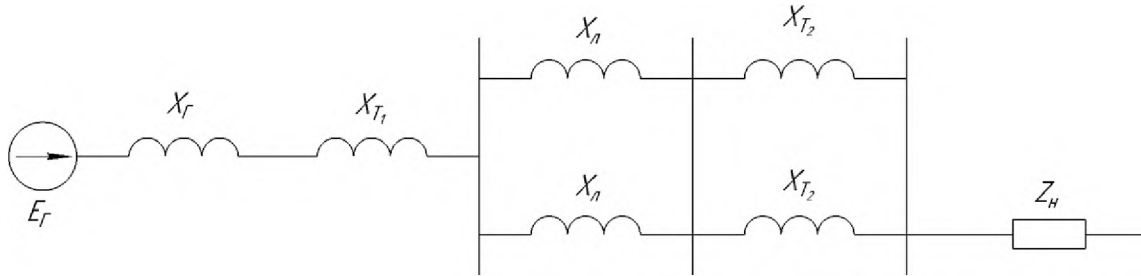


Рисунок 3.2 – Схема заміщення

Величину базисної потужності приймаємо на рівні: $S_{\text{б}} = 210$ МВА.

Номінальну напругу на навантаженні у відносних одиницях (в.о.) приймаємо на рівні: $U_{\text{н}} = 1$ в.о.

Послідовно виражаємо усі іменовані величини у в.о., для чого приводимо їх до базисних значень потужності і напруги.

Активна потужність на навантаженні [19]:

$$P_{\text{н}^*} = \frac{P_{\text{н}}}{S_{\text{б}}} = \frac{160}{210} = 0,762 \text{ в.о.} \quad (3.1)$$

Реактивна потужність на навантаженні [19]:

$$Q_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{н}}}}{\cos \varphi_{\text{н}}} = 160 \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,85^2}}{0,85} = 99,2 \text{ Мвар}, \quad (3.2)$$

$$Q_{\text{н}^*} = \frac{Q_{\text{н}}}{S_{\text{б}}} = \frac{99,2}{210} = 0,472 \text{ в.о.} \quad (3.3)$$

Опір трансформатора Т1 [19]:

$$X_{T1} = \frac{U_{K3}^{BH}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H^T} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{210}{250} = 0,0959 \text{ в.о.} \quad (3.4)$$

Опір трансформаторів Т2 [19]:

$$X_{T2} = 0,5 \cdot \frac{U_{K3}^{BH}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H^T} = 0,5 \cdot \frac{11}{100} \cdot \frac{210}{200} = 0,0709 \text{ в.о.} \quad (3.5)$$

$$X_{\text{л}} = x_{\text{л}} \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_H^2} = 0,35 \cdot 50 \cdot \frac{235}{210^2} = 0,0833 \text{ в.о.} \quad (3.6)$$

Загальний опір системи [19]:

$$X_C = X_{T1} + \frac{X_{\text{л}}}{2} + X_{T2} = 0,0 + \frac{X_{\text{л}}}{2} + X_{T2} = 0,25 \quad (3.7)$$

Величина опору та ЕРС генератора залежать від його характеристик, режиму роботи та способів регулювання. Розглянемо три основні режими:

– автоматичне резервне включення (АРВ) відсутнє, тоді: опір генератора $X_{\Gamma} = X_d = 1,58 \text{ в.о.}$, ЕРС генератора $E_{\Gamma} = E_q$.

ЕРС визначимо за формулою [19]:

$$\begin{aligned} E_q &= \sqrt{\left(U_H + \frac{Q_H \cdot (X_C + X_d)}{U_H} \right)^2 + \left(P_H \cdot \frac{X_C + X_d}{U_H} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,472 \cdot (0,208 + 1,58)}{1} \right)^2 + \left(0,762 \cdot \frac{0,208 + 1,58}{1} \right)^2} = 3,7 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Кут, що характеризує зсув вектора даної ЕРС до вектора напруги [19]:

$$\begin{aligned}\delta_z = \delta_0 &= \arctg \frac{P_n \cdot (X_C + X_z)}{U_n^2 + Q_n \cdot (X_C + X_z)} = \\ &= \arctg \frac{0,762 \cdot (0,208 + 1,58)}{1^2 + 0,472 \cdot (0,208 + 1,58)} = 36,46^\circ.\end{aligned}\quad (3.9)$$

– автоматичне резервне включення (АРВ) наявне, тоді: опір генератора $X_\Gamma = X'_d = 0,22$ в.о., ЕРС генератора $E_\Gamma = E'$.

ЕРС визначимо за формулою [19]:

$$\begin{aligned}E' &= \sqrt{\left(U_n + \frac{Q_n \cdot (X_C + X'_d)}{U_n}\right)^2 + \left(\frac{P_n \cdot (X_C + X'_d)}{U_n}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,472 \cdot (0,208 + 0,22)}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,762 \cdot (0,208 + 0,22)}{1}\right)^2} = 1,107 \text{ в.о.}\end{aligned}\quad (3.10)$$

Кут, що характеризує зсув вектора даної ЕРС до вектора напруги [19]:

$$\begin{aligned}\delta'_0 &= \arctg \frac{P_n \cdot (X_C + X'_d)}{U_n^2 + Q_n \cdot (X_C + X'_d)} = \\ &= \arctg \frac{0,762 \cdot (0,208 + 0,22)}{1^2 + 0,472 \cdot (0,208 + 0,22)} = 15,18^\circ.\end{aligned}\quad (3.11)$$

– автоматичне резервне включення (АРВ) наявне за умови використання СД, тоді: опір генератора $X_\Gamma = 0$, ЕРС генератора $E_\Gamma = U_\Gamma$.

ЕРС визначимо за формулою [19]:

$$\begin{aligned}
 E_{\Gamma} = U_{\Gamma} &= \sqrt{\left(U_{\text{н}} + \frac{Q_{\text{н}} \cdot X_{\text{с}}}{U_{\text{н}}}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{н}} \cdot X_{\text{с}}}{U_{\text{н}}}\right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,472 \cdot 0,208}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,762 \cdot 0,208}{1}\right)^2} = 1,11 \text{ в.о.}
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

Кут, що характеризує зсув вектора даної ЕРС до вектора напруги [19]:

$$\begin{aligned}
 \delta_{0U} &= \arctg \frac{P_{\text{н}} \cdot X_{\text{с}}}{U_{\text{н}}^2 + Q_{\text{н}} \cdot X_{\text{с}}} = \\
 &= \arctg \frac{0,762 \cdot 0,208}{1^2 + 0,472 \cdot 0,208} = 7,57^{\circ}.
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Поздовжня складова перехідної ЕРС [19]:

$$E'_q = E' \cdot \cos(\delta_0 - \delta'_0) = 1,107 \cdot \cos(36,46 - 15,18) = 1,03 \text{ в.о.} \tag{3.14}$$

3.3 Розрахунок статичної стійкості

Пристрої автоматичного резервного включення при розрахунку вважаються безінерційними та забезпечують самостабілізацію. Максимум потужності визначається максимумом статичної характеристики потужності.

Коефіцієнт запасу статичної стійкості за потужністю [19]:

$$k_{\text{зс}} = \frac{P_{\text{max}} - P_0}{P_0} \cdot 100\%, \tag{3.15}$$

де P_{max} – максимум статичної характеристики потужності ($P_{\text{max}} = P_{\text{mEq}}$).

При відсутності автоматичного резервного включення турбогенератор при розрахунку вважається як індуктивний опір по поздовжній осі (d) і прикладеної до нього ЕРС E_q .

Кутова характеристика потужності визначається залежністю [19]:

$$P_{Eq} = \frac{E_q \cdot U_n}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta = P_{mEq} \cdot \sin \delta, \quad (3.16)$$

де P_{mEq} – ідеальна межа потужності нерегульованої передачі [19]:

$$P_{mEq} = \frac{E_q \cdot U_n}{X_{d\Sigma}}, \quad (3.17)$$

де $X_{d\Sigma}$ – сумарне значення опорів:

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_C = 1,58 + 0,208 = 1,788 \text{ в.о.}, \quad (3.18)$$

$$P_{mEq} = \frac{E_q \cdot U_n}{X_{d\Sigma}} = \frac{3,7 \cdot 1}{1,788} = 2,069 \text{ в.о.},$$

$$k_{sc} = \frac{2,069 - 0,762}{0,762} \cdot 100\% = 171,6\%.$$

За наявності автоматичного резервного включення ідеальна межа потужності, що передається може бути визначена наближено при значеннях $E'_q = \text{const}$ і $X_r = X'_d = 0,22$.

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_C = 0,22 + 0,208 = 0,428 \text{ в.о.} \quad (3.19)$$

$$P_{mE'q} = \frac{E'_q \cdot U_n}{X'_{d\Sigma}} = \frac{1,03 \cdot 1}{0,428} = 2,407 \text{ в.о.} \quad (3.20)$$

$$k_{zc} = \frac{P_{mE/q} - P_n}{P_n} \cdot 100\% = \frac{2,407 - 0,762}{0,762} \cdot 100\% = 215,82\%. \quad (3.21)$$

При наявності автоматичного резервного включення за умови використання СД при цьому $U_\Gamma = \text{const}$ та $X_\Gamma = 0$ [19]:

$$P_{mU_2} = \frac{U_\Gamma \cdot U_n}{X_C} = \frac{1,11 \cdot 1}{0,208} = 5,337 \text{ в.о.} \quad (3.22)$$

$$k_{zc} = \frac{P_{mU_2} - P_n}{P_n} \cdot 100\% = \frac{5,337 - 0,762}{0,762} \cdot 100\% = 600,33\%. \quad (3.23)$$

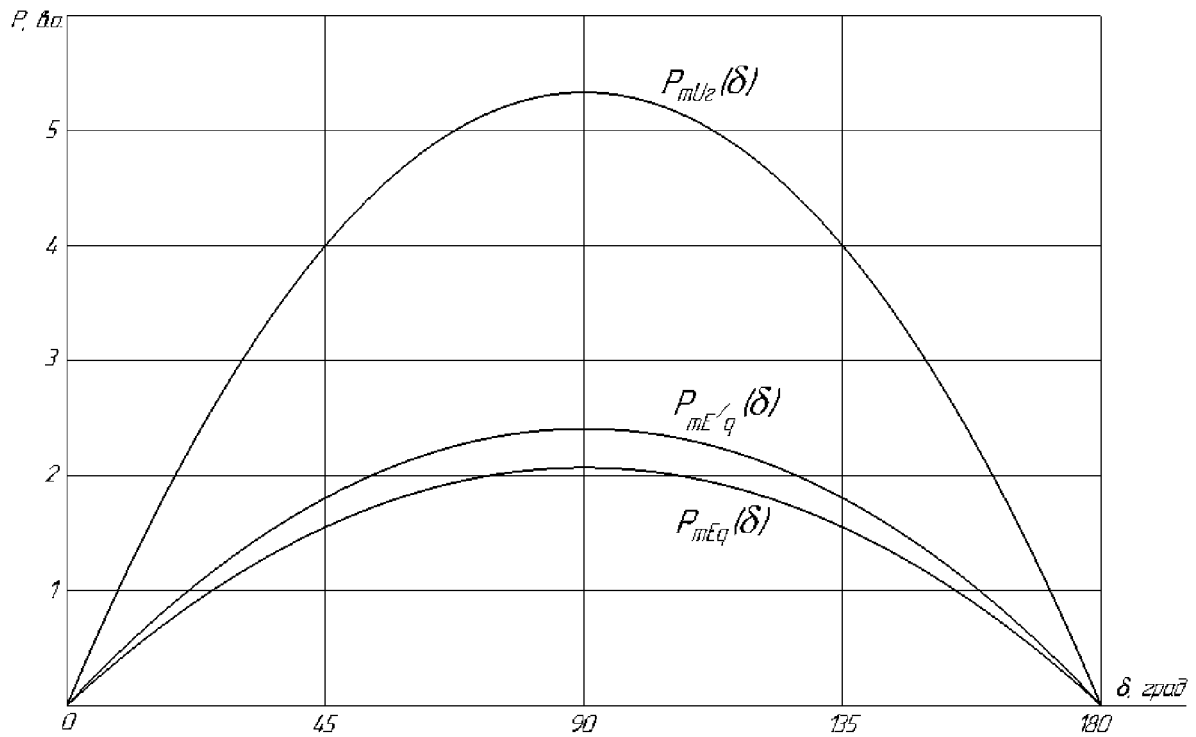


Рисунок 3.3 – Графічна інтерпретація характеристики потужності

При наявності автоматичного резервного включення запас статичної стійкості електропередачі збільшується і має найбільшого значення при автоматичному резервному включенні за умови використання СД.

3.4 Розрахунок динамічної стійкості

Динамічну стійкість електропередачі розрахуємо без урахування реакції якоря генератора і дії автоматичного резервного включення. Для здійснення наближених розрахунків будемо схему заміщення – рис. 3.4.

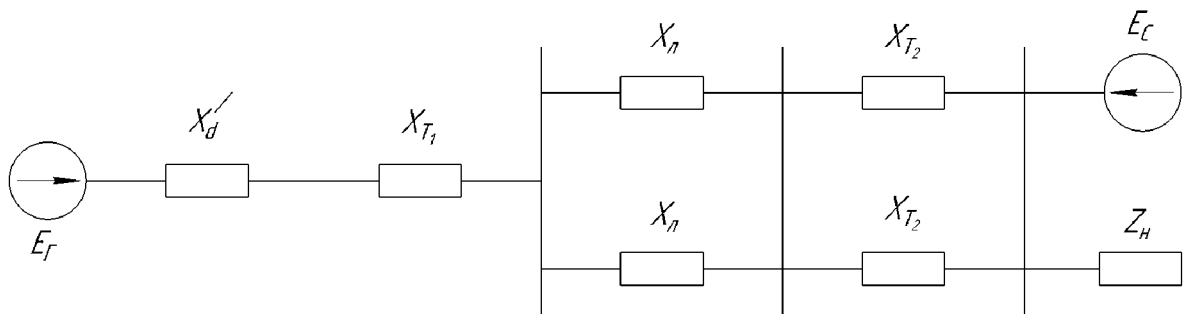


Рисунок 3.4 – Схема заміщення при нормальному режимі

Розраховуємо параметри нормального режиму.

Опір при нормальному режимі:

$$\begin{aligned} X_{н.р} &= X_d' + X_{T1} + 0,5 \cdot X_l + X_{T2} = \\ &= 0,22 + 0,959 + 0,5 \cdot 0,0833 + 0,0709 = 0,428 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Потужність при нормальному режимі [19]:

$$P_{ml} = \frac{E' \cdot U_H}{X_{н.р}} = \frac{1,107 \cdot 1}{0,428} = 2,586 \text{ в.о.} \quad (3.25)$$

Визначаємо параметри аварійного режиму – коротке замикання (рис. 3.5).

Опір при аварійному режимі: $X_{ав1} = \infty$.

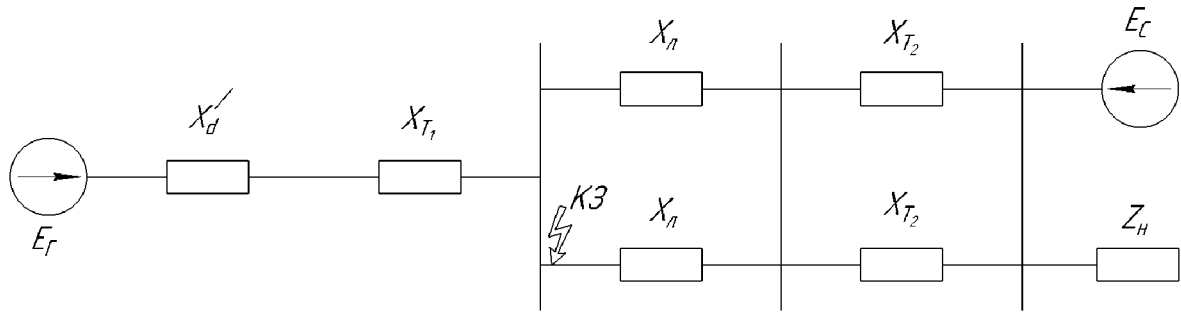


Рисунок 3.5 – Схема заміщення при аварійному режимі – коротке замикання

Розраховуємо параметри аварійного режиму – відмова одного з вимикачів (рис. 3.6).

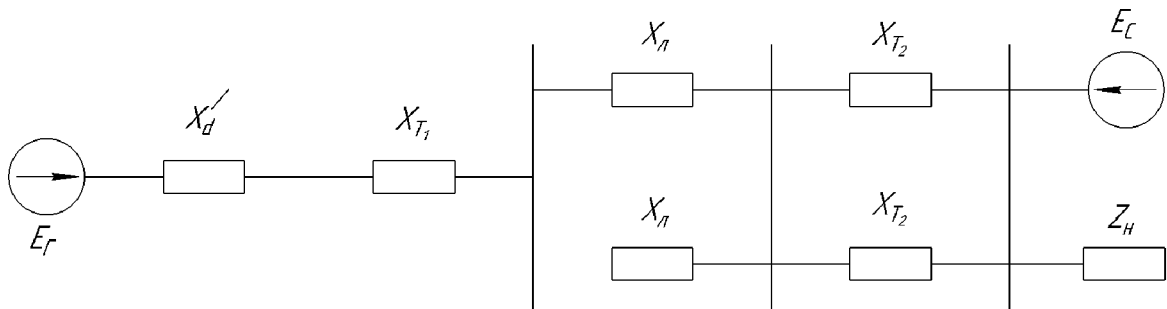


Рисунок 3.6 – Схема заміщення при аварійному режимі – відмова одного з вимикачів

Значення сумарного опору при аварійному режимі – відмова одного з вимикачів:

$$\begin{aligned}
 X_{a62} &= X_d' + X_{T1} + X_{\pi} + X_{T2} + \frac{(X_d' + X_{T1} + X_{\pi}) \cdot X_{T2}}{X_{\pi}} = \\
 &= 0,22 + 0,959 + 0,0833 + 0,0709 + \\
 &+ \frac{(0,22 + 0,959 + 0,0833) \cdot 0,0709}{0,0833} = 0,81 \text{ в.о.}
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

$$P_{mII}^{//} = \frac{E_q' \cdot U_n}{X_{a62}} = \frac{1,03 \cdot 1}{0,81} = 1,272 \text{ в.о.} \tag{3.27}$$

Визначаємо параметри післяаварійного режиму – рис. 3.7.

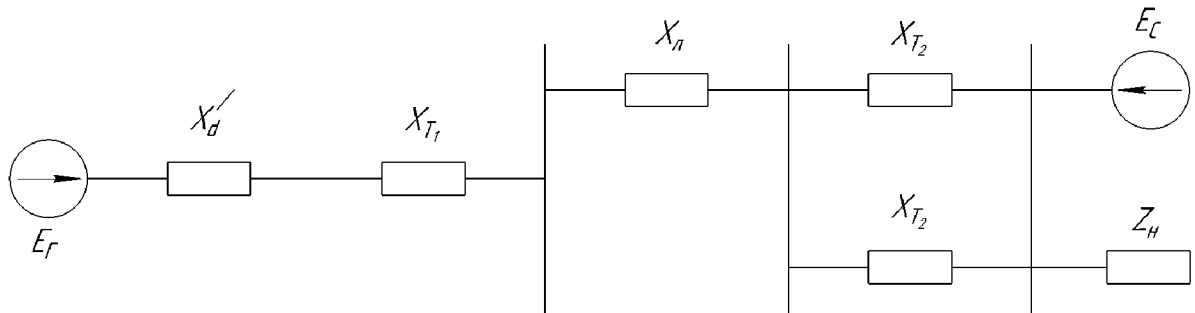


Рисунок 3.7 – Схема заміщення при післяаварійному режимі

$$\begin{aligned} X_{na} &= X_d' + X_{T1} + X_l + X_{T2} = \\ &= 0,22 + 0,0959 + 0,0833 + 0,0709 = 0,470 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$P_{mIII} = \frac{E_q' \cdot U_n}{X_{na}} = \frac{1,03 \cdot 1}{0,470} = 2,191 \text{ в.о.} \quad (3.29)$$

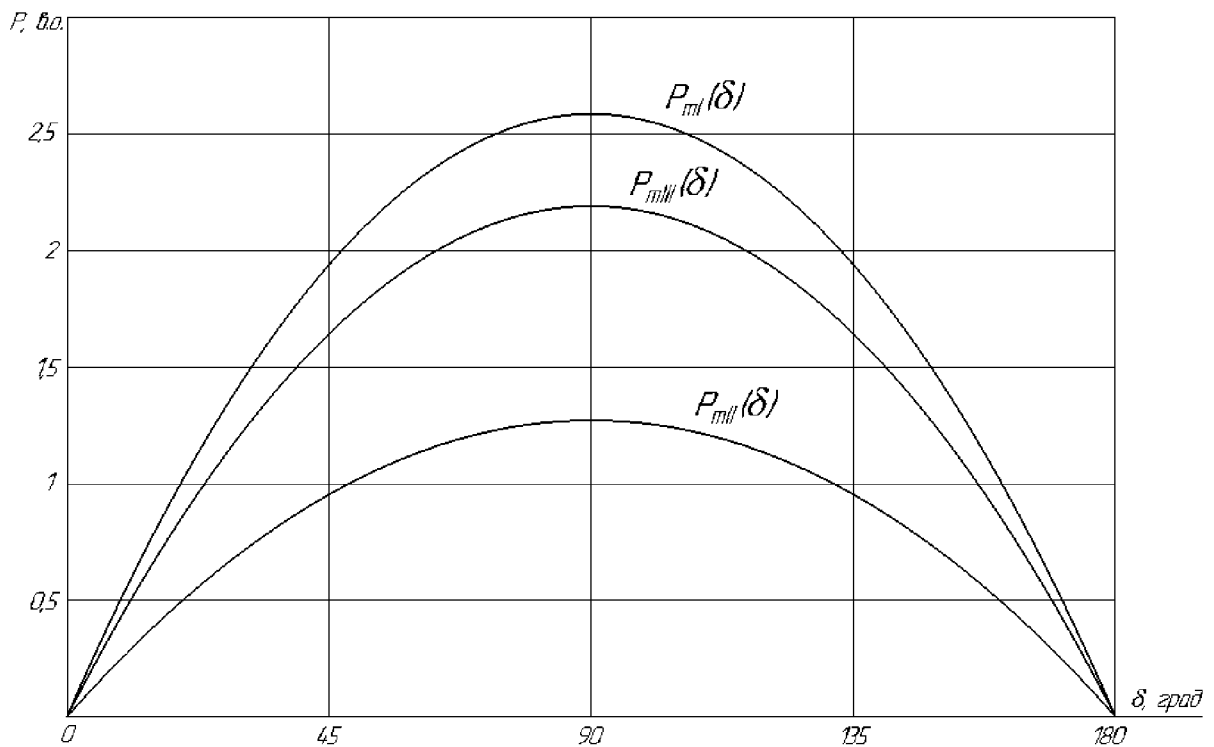


Рисунок 3.6 – Схема заміщення при аварійному режимі – відмова одного з вимикачів

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ТА ПАРАМЕТРІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ

Для дослідження динамічної поведінки енергетичних систем через різні фактори і задля зниження інерції системи, що впливає на стабільність їх роботи необхідно застосувати методологію, яка дозволить оцінити та зменшити вплив різних збурень.

Загальнопромислові генератори з їх значною масою, що обертається, забезпечують природний акумулятор, який згладжує зміну частоти після впливу збурень. Підключена до мережі через силові електронні пристрої розподілена генерація позбавлена даної інерційної акумулюючої ємності, що може призвести до вищої швидкості зміни частоти і може поставити під загрозу стабільність енергетичної системи.

Різні методи оцінки працездатності системи включають використання засобів вимірювання векторів, що характеризують різні параметри – напруги, струми та інше.

У якості ефективних інструментів динамічного моделювання та симуляції можуть бути використані різноманітні програмні комплекси. Моделювання може продемонструвати, що зі зменшенням інерції системи знижується здатність гасити частотні коливання, що призводить до більш виражених і тривалих відхилень частоти. Це має значні наслідки для стабільності та надійності енергосистем, особливо під час широкомасштабних збоїв у мережі.

У даній роботі для моделювання було використано програмне забезпечення Python, на якому було складено код, що реалізує зміну показників, що характеризують роботу генератора на систему [20]:

```

import math as mt
import numpy as np
import cmath as cm
import matplotlib.pyplot as plt
import intersect as intc
import pandas as pd
# Вхідні параметри генератора
Vterminal = 480 # Кінцева напруга, вольт (лінійна напруга)
freq = 50 # Електрична частота, герц
Srated = 210e3 # Номінальна уявна потужність, вольт-ампер
poles = 4 # Кількість полюсів
PowerFactor = 0.85 # Косинус ф, відстаючий (індуктивний)
Xsync = 0.22 # Синхронний опір, в омах на фазу
# Параметри максимального навантаження
Pload = 160e3 # Номінальне максимальне навантаження генератора, ват
#### Співвідношення РТ/СТ ####
ctr = 500
ptr = 2.31
#### PQ max та Q min ####
Rmax = 150e3 # Максимальне значення Р або Q
Qmin = -0.4 * Srated # Мінімальне значення Q
IfI = Srated / (Vterminal * np.sqrt(3))
# Показати часи спрацювання захисту при зворотній потужності та зони
show_Qlim = [1, 1, 1, 1] # Вкажіть, які криві спрацювання показати
Qlim = [Qmin, Qmin * 1.25, Qmin * 1.5, Qmin * 2]
trip_labels = ['5с Вимикання ' + str(int(Qlim[0] / 1e3)) + ' кВАр (' + str(int(Qlim[0] / (ctr * ptr))) + ' ВАр сек)',
'1с Вимикання ' + str(int(Qlim[1] / 1e3)) + ' кВАр (' + str(int(Qlim[1] / (ctr * ptr))) + ' ВАр сек)',
'0.2с Вимикання ' + str(int(Qlim[2] / 1e3)) + ' кВАр (' + str(int(Qlim[2] / (ctr * ptr))) + ' ВАр сек)',
'0.1с Вимикання ' + str(int(Qlim[3] / 1e3)) + ' кВАр (' + str(int(Qlim[3] / (ctr * ptr))) + ' ВАр сек)']
# Втрати генератора
Pmech_loss = 1.5e3 # Механічні втрати (тертя та повітряний опір), ват
Pcore_loss = 1e3 # Втрати у сердечнику, ват
# Розрахунки
# Кінцеві точки Р та Q
Qend = (Qmin ** 2 - Rmax ** 2) / (2 * (Qmin + (0.31 * Rmax)))
Rend = Qend - Qmin
# Фазна напруга, вольт
Vphase = Vterminal / mt.sqrt(3)
# Максимальний струм якоря, ампер - абсолютне значення та фазор
Iarm_max = Srated / (3 * Vphase)
Iarm_max_phasor = Iarm_max * cm.exp(-1j * mt.acos(PowerFactor))
# Походження кривої струму ротора
Qrotor = -(3 * Vphase ** 2) / Xsync
# Внутрішня генерована напруга генератора, вольт
Ea = Vphase + 1j * Xsync * Iarm_max_phasor
# Уявна потужність, яка є радіусом кривої ротора, вольт-ампер
D_E = (3 * abs(Ea) * Vphase) / Xsync
# Максимальна вихідна потужність первинного двигуна, ват
Pmax_out = Pload - Pmech_loss - Pcore_loss
# Крива обмеження струму статора
# Коло з центром в (0,0) з радіусом Srated
x_stator_o = 0

```

```

y_stator_o = 0
r_stator = Srated
# Крива обмеження струму ротора
# Коло з центром в (0,Q) з радіусом D_E
x_stator_o = 0
y_stator_o = Qrotor
r_stator = D_E
# Обмеження потужності первинного двигуна
x_prime = Pmax_out
# Створити окремі криві
for i in range(-90, 91):
    if i == -90:
        stator_curveA = np.array([Srated * np.cos(i * (np.pi / 180)), Srated * np.sin(i * (np.pi / 180))])
        rotor_curveA = np.array([D_E * np.cos(i * (np.pi / 180)), Qrotor + D_E * np.sin(i * (np.pi / 180))])
        end_curveA = np.array([Rend * np.cos(i * (np.pi / 180)), Qend + Rend * np.sin(i * (np.pi / 180))])
    else:
        stator_curveA = np.vstack((stator_curveA, np.array([Srated * np.cos(i * (np.pi / 180)), Srated *
        np.sin(i * (np.pi / 180))])))
        rotor_curveA = np.vstack((rotor_curveA, np.array([D_E * np.cos(i * (np.pi / 180)), Qrotor + D_E *
        np.sin(i * (np.pi / 180))])))
        end_curveA = np.vstack((end_curveA, np.array([Rend * np.cos(i * (np.pi / 180)), Qend + Rend *
        np.sin(i * (np.pi / 180))])))
    # Обчислити точку перетину та повернути найближчу дійсну точку для статора
    intx, inty = intc.intersection(stator_curveA[:, 0], stator_curveA[:, 1], end_curveA[:, 0], end_curveA[:,
    1])
    df = pd.DataFrame(stator_curveA, columns=['X', 'Y'])
    df2 = (df['X'] - intx[0]).abs() + (df['Y'] - inty[0]).abs()
    # Повернути початкову точку статора
    stator_start = df.loc[df2.idxmin()].name
    df = pd.DataFrame(end_curveA, columns=['X', 'Y'])
    df2 = (df['X'] - intx[0]).abs() + (df['Y'] - inty[0]).abs()
    # Повернути кінцеву точку зупинки
    end_stop = df.loc[df2.idxmin()].name
    # Обчислити точку перетину та повернути найближчу дійсну точку для статора та ротора
    intx, inty = intc.intersection(stator_curveA[:, 0], stator_curveA[:, 1], rotor_curveA[:, 0],
    rotor_curveA[:, 1])
    df = pd.DataFrame(stator_curveA, columns=['X', 'Y'])
    df2 = (df['X'] - intx[0]).abs() + (df['Y'] - inty[0]).abs()
    # Повернути точку зупинки статора
    stator_stop = df.loc[df2.idxmin()].name
    df = pd.DataFrame(rotor_curveA, columns=['X', 'Y'])
    df2 = (df['X'] - intx[0]).abs() + (df['Y'] - inty[0]).abs()
    # Повернути початкову точку ротора
    rotor_start = df.loc[df2.idxmin()].name
    # Створити композитну криву, використовуючи наведені вище початкові/кінцеві точки
    comp_curveA = end_curveA[0:end_stop, :]
    comp_curveA = np.vstack((comp_curveA, stator_curveA[stator_start:stator_stop, :]))
    comp_curveA = np.vstack((comp_curveA, rotor_curveA[rotor_start:, :]))
    stator_curve = plt.Line2D(stator_curveA[:, 1], stator_curveA[:, 0], color='m')
    rotor_curve = plt.Line2D(rotor_curveA[:, 1], rotor_curveA[:, 0], color='g')
    end_curve = plt.Line2D(end_curveA[:, 1], end_curveA[:, 0], color='c')
    comp_curve = plt.Line2D(comp_curveA[:, 1], comp_curveA[:, 0], color='r')
    fig = plt.figure(figsize=(8, 5), dpi=80, facecolor='w', edgecolor='k')

```

```

ax = fig.add_subplot(111)
# Побудова кривої обмеження потужності первинного двигуна
maxpower_curve = plt.axhline(y=Pmax_out, color='b')
ylim_pos = 1.6 * Srated
xlim_neg = -1.2 * Srated
xlim_pos = 1.2 * Srated
ax.set_ylim((0, ylim_pos))
ax.set_xlim((xlim_neg, xlim_pos))
ax.set_aspect('equal')
plt.legend((comp_curve, maxpower_curve), ('Спроможність', 'Макс. потужність'), numpoints=1,
loc=1)
plt.ylabel("P, кВт/кВА")
plt.xlabel("Q, кВАр/кВА")
for pf in [0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2]:
    ax.add_line(plt.Line2D([0, np.sqrt(Srated ** 2 - (Srated * pf) ** 2) * 2], [0, (Srated * pf) * 2],
linestyle='dotted', color='y'))
    ax.add_line(plt.Line2D([0, -1 * np.sqrt(Srated ** 2 - (Srated * pf) ** 2) * 2], [0, (Srated * pf) * 2],
linestyle='dotted', color='y'))
for pf in [0.8, 0.6, 0.4, 0.2]:
    ax.annotate(str(pf), xy=(np.sqrt(Srated ** 2 - (Srated * pf) ** 2), (Srated * pf)),
horizontalalignment='left')
    ax.annotate(str(pf), xy=(-1 * np.sqrt(Srated ** 2 - (Srated * pf) ** 2), (Srated * pf)),
horizontalalignment='right')
for mvapu in [0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1]:
    ax.add_line(plt.Line2D(stator_curveA[:, 1] * mvapu, stator_curveA[:, 0] * mvapu,
linestyle='dotted', color='k'))
for qlvals in range(0, 4):
    if show_Qlim[qlvals]:
        ax.add_line(plt.Line2D([Qlim[qlvals], Qlim[qlvals]], [0, Srated + (Srated * 0.1 * (qlvals + 1))],
linestyle='dashed', color='orange'))
        ax.annotate(trip_labels[qlvals], xy=(Qlim[qlvals], Srated + (Srated * 0.1 * (qlvals + 1))),
horizontalalignment='left')
ax.add_line(comp_curve)
ax.set_yticks([0, 0.2 * Srated, 0.4 * Srated, 0.6 * Srated, 0.8 * Srated, 1.0 * Srated, 1.2 * Srated], ['0',
'0.2', '0.4', '0.6', '0.8', '1.0', '1.2'])
ax.set_xticks([-1.2 * Srated, -1.0 * Srated, -0.8 * Srated, -0.6 * Srated, -0.4 * Srated, -0.2 * Srated, 0,
0.2 * Srated, 0.4 * Srated, 0.6 * Srated, 0.8 * Srated, 1.0 * Srated, 1.2 * Srated], ['-1.2', '-1.0', '-0.8', '-0.6',
'-0.4', '-0.2', '0', '0.2', '0.4', '0.6', '0.8', '1.0', '1.2'])
fig.text(0.1, 0.985, 'Дані генератора', fontsize=8)
fig.text(0.1, 0.965, 'Потужність: ' + str(np.round(Srated / 1e3, 1)) + ' кВА', fontsize=8)
fig.text(0.1, 0.945, 'Напруга: ' + str(np.round(Vterminal, 1)) + ' В', fontsize=8)
fig.text(0.1, 0.925, 'Полюси: ' + str(int(poles)), fontsize=8)
fig.text(0.1, 0.905, 'Коефіцієнт потужності: ' + str(PowerFactor), fontsize=8)
fig.text(0.25, 0.965, 'Синхронний опір: ' + str(Xsync), fontsize=8)
fig.text(0.25, 0.945, 'Макс. потужність: ' + str(np.round(Rmax / 1e3, 1)) + ' кВт', fontsize=8)
fig.text(0.25, 0.925, 'Струм повного навантаження: ' + str(np.round(Ifl, 1)) + ' А', fontsize=8)
fig.text(0.6, 0.965, 'Відношення РТ: ' + str(ptr), fontsize=8)
fig.text(0.6, 0.945, 'Відношення СТ: ' + str(ctr), fontsize=8)
fig.text(0.6, 0.925, 'Струм вторинного повного навантаження: ' + str(np.round(Ifl / ctr, 1)) + ' А',
fontsize=8)
plt.savefig('CapabilityCurve.jpg', dpi=600, facecolor='w', edgecolor='w', orientation='portrait',
format='jpg', transparent=False, bbox_inches=None, pad_inches=0.1)

```

У результаті роботи коду отримаємо кругову діаграму, що ілюструє робочі спроможності генератора при його експлуатації на навантаження, враховуючи його технічні характеристики та обмеження (рис. 4.1).

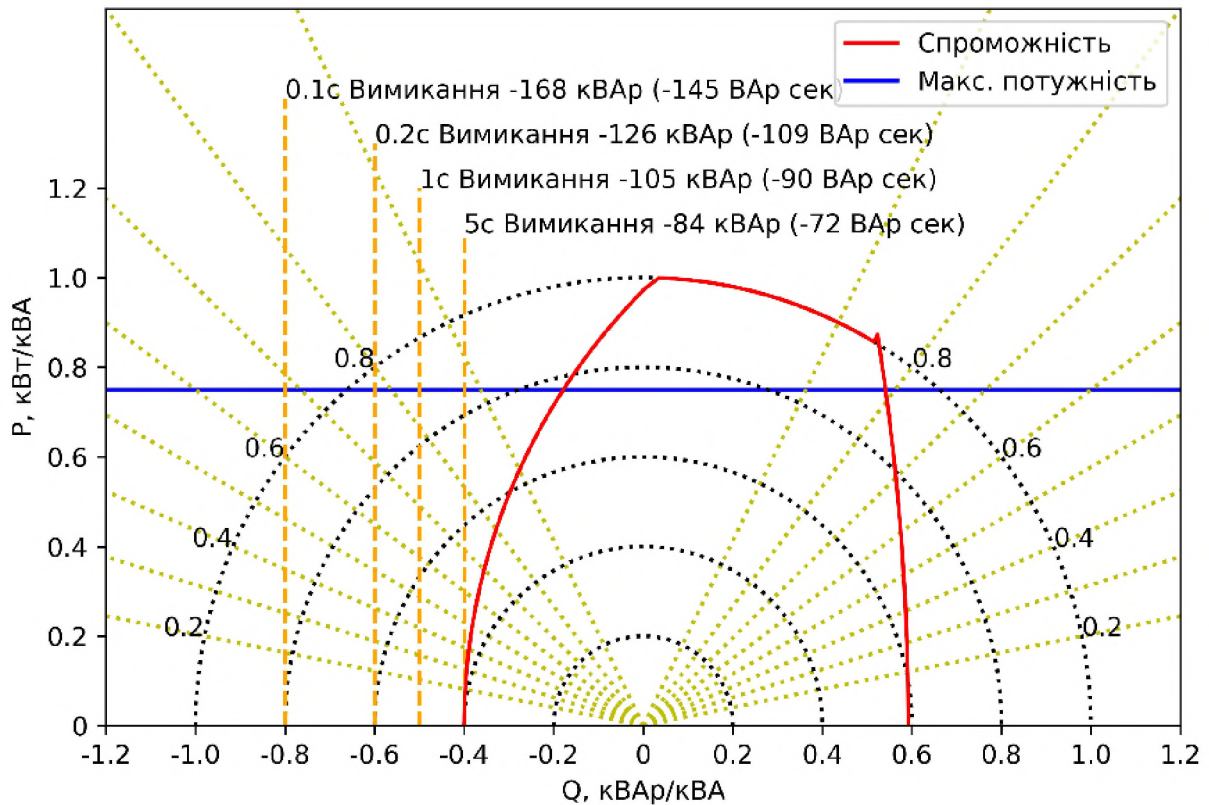


Рисунок 4.1 – Діаграма можливостей генератора у просторі потужностей

На діаграмі зображені межі можливостей генератора у просторі потужностей, що дозволяє оцінити його здатність забезпечувати як активну, так і реактивну потужність. Горизонтальна вісь діаграми відображає реактивну потужність Q , виражену у відносних одиницях. Вертикальна вісь представляє активну потужність P , також у відносних одиницях. Цей простір потужностей дозволяє оцінити різні режими роботи генератора, включаючи як нормальні, так і граничні умови. Основною частиною діаграми є крива спроможності генератора, позначена червоною лінією. Ця крива показує максимальні значення активної та реактивної потужності, які генератор може забезпечити при заданих умовах.

На діаграмі також відображені межі обмежень по зворотній реактивній потужності, які позначені оранжевими пунктирними лініями. Ці лінії відповідають часу спрацювання захисту генератора при перевищенні певних значень реактивної потужності і супроводжуються текстовими позначками, що вказують час вимкнення і відповідні значення потужності.

Жовті лінії – $\cos \varphi$ – показують різні коефіцієнти потужності, які дозволяють оцінити ефективність роботи генератора при різних режимах навантаження, вказуючи на співвідношення активної та реактивної потужності. Ці лінії є важливими для розуміння, як змінюється ефективність генератора при різних значеннях $\cos \varphi$.

Крім того, на діаграмі зображені чорні пунктирні дуги, що позначають криві обмеження струму статора для різних значень уявної потужності генератора. Ці дуги допомагають оцінити межі допустимого струму при різних режимах роботи генератора.

Дана діаграма забезпечує всебічне уявлення про робочі можливості генератора, враховуючи його технічні характеристики та обмеження. Вона є важливим інструментом для інженерів та операторів, що дозволяє ефективно управляти роботою генератора, забезпечуючи його оптимальну продуктивність та надійність при експлуатації на навантаження.

Для будови векторів, що відповідають параметрам роботи генератора скористаємось іншим програмним продуктом Matlab [21]:

```
%% Параметри генератора
clc, clear, close all
V_rated = 0.480e3;          % номінальна лінійна напруга в вольтах (В)
S_rated = 210e6;           % номінальна уявна потужність в вольт-амперах (ВА)
PF_rated = 0.85;           % номінальний коефіцієнт потужності
PA_rated = -acos(PF_rated); % номінальний кут потужності в радіанах
freq_rated = 50;           % номінальна частота в герцах (Гц) (не використовується)
X_S = 1.58;                % синхронний опір в омах
R_A = 0.2;                 % опір якоря в омах
windage_losses = 1e6;      % втрати на тертя в повітрі в ватах (Вт) (не використовується)
core_losses = 1.5e6;       % втрати в сердечнику в ватах (Вт) (не використовується)
I_F_max = 10;              % максимальний струм збудження в амперах (А)
```

```

%% 1 та 2) Імітація функції phasor_diagram та побудова  $|I_A|_{\max}$  та  $|E_A|_{\max}$  при ном. умовах
I_A_mag_rated = S_rated / (sqrt(3) * V_rated); % величина струму якоря I_A
fig_handle = figure('Position', get(0, 'Screensize'));
E_A_rated = plot_phasor_diagram(I_A_mag_rated, V_rated, X_S, R_A, PA_rated);
% Фактор, який обмежує внутрішню генеровану напругу E_A, це струм збудження,
% оскільки максимальний струм збудження I_F_max становить 10 A.
E_A_mag_max = calculate_Vt_OC(I_F_max) / sqrt(3);
plot_circle(0, 0, I_A_mag_rated, 'r', '|I_A|_{\max}', '--')
plot_circle(0, 0, E_A_mag_max, 'r', '|E_A|_{\max}', '--') % |E_A_rated| та |E_A_max| збігаються
для I_F = I_F_max
title('Діаграма фазорів для номінальних умов', 'Color', 'r')
legend
axis equal
grid on
saveas(fig_handle, 'Plots/1.png', 'png');
%% 3) Побудова кіл обмеження E_A для 0.9–PF–відстаючого та випереджуючого режимів, що
відповідають I_F = 2 та 6 A
PA_leading = -PA_rated; % випереджальний (+) кут потужності в радіанах
PA_lagging = PA_rated; % відстаючий (-) кут потужності в радіанах
I_F1 = 2; % струм збудження для випадку 1
I_F2 = 6; % струм збудження для випадку 2
V_phi = V_rated / sqrt(3); % співвідношення через Y-з'єднання
fig_handle = figure('Position', get(0, 'Screensize'));
% для I_F2 = 6 A, PF = -0.9 відстаючий
subplot(1, 2, 1)
I_A_mag1 = calculate_Ia_mag(V_phi, I_F2, X_S, R_A, PA_lagging);
E_A1 = plot_phasor_diagram(I_A_mag1, V_rated, X_S, R_A, PA_lagging);
plot_circle(0, 0, I_A_mag_rated, 'b', '|I_A|_{\text{номінал}}', '--') % побудова старого кола обмеження
|I_A|_{\max}
plot_circle(0, 0, E_A_mag_max, 'r', '|E_A|_{\text{номінал}}', '--') % побудова старого кола обмеження
|E_A|_{\max}
plot_circle(0, 0, abs(I_A_mag1), 'b', '|I_A|_{\max}', '--') % побудова нового кола обмеження
|I_A|_{\max}
plot_circle(0, 0, abs(E_A1), 'r', '|E_A|_{\max}', '--') % побудова нового кола обмеження
|E_A|_{\max}
title('I_{F2} = 6 A, PF = -0.9 Відстаючий', 'Color', 'r')
legend('Location', 'Northwest')
grid on
% для I_F2 = 6 A, PF = 0.9 випереджуючий
subplot(1, 2, 2)
I_A_mag2 = calculate_Ia_mag(V_phi, I_F2, X_S, R_A, PA_leading);
E_A2 = plot_phasor_diagram(I_A_mag2, V_rated, X_S, R_A, PA_leading);
plot_circle(0, 0, I_A_mag_rated, 'b', '|I_A|_{\text{номінал}}', '--') % побудова старого кола обмеження
|I_A|_{\max}
plot_circle(0, 0, E_A_mag_max, 'r', '|E_A|_{\text{номінал}}', '--') % побудова старого кола обмеження
|E_A|_{\max}
plot_circle(0, 0, abs(I_A_mag2), 'b', '|I_A|_{\max}', '--') % побудова нового кола обмеження
|I_A|_{\max}
plot_circle(0, 0, abs(E_A2), 'r', '|E_A|_{\max}', '--') % побудова нового кола обмеження
|E_A|_{\max}
title('I_{F2} = 6 A, PF = -0.9 Випереджуючий', 'Color', 'r')
legend('Location', 'Northwest')
grid on

```

```

saveas(fig_handle, 'Plots/2.png','png');
%% 4) Аналіз поведінки генератора у термінах активної та реактивної потужності
% Ми використовуємо негативні фази, оскільки комплексна уявна потужність  $S = V * I'$  де  $I'$ 
означає спряження  $I$ .
S_mag_lagging = abs(I_A_mag1 * 3 * V_phi);
S_mag_leading = abs(I_A_mag2 * 3 * V_phi);
P_lagging = round(S_mag_lagging * cos(-PA_lagging), 5);
Q_lagging = round(S_mag_lagging * sin(-PA_lagging), 5);
P_leading = round(S_mag_leading * cos(-PA_leading), 5);
Q_leading = round(S_mag_leading * sin(-PA_leading), 5);
%% Визначення функцій
function [Vt_OC] = calculate_Vt_OC(I_F)
%[Vt_OC] = calculate_Vt_OC(I_F):
% I_F: струм збудження в амперах (A)
% Повертає напругу на виході без навантаження для заданого струму збудження I_F.
Vt_OC = 20 * (1.05 - exp(-0.3 * I_F)) * 1e3;
end
function plot_circle(xc, yc, r, marker, name, style)
%plot_circle(xc, yc, r, marker, name, style):
% xc: x координата центру кола
% yc: y координата центру кола
% r: радіус кола
% marker: маркер, що використовується на графіку
% name: назва графіку
% style: стиль лінії графіку
%
% Будує коло з заданим центром (xc, yc) та радіусом r.
hold on
angle = linspace(0, 2*pi, 200); % масив кутів у діапазоні [0, 2*pi]
xp = r * cos(angle) + xc; % x координати межі кола
yp = r * sin(angle) + yc; % y координати межі кола
plot(xp, yp, marker, 'DisplayName', name, 'LineStyle', style);
hold off
end
function [E_A] = plot_phasor_diagram(I_A, V_T, X_S, R_A, P_angle)
%[E_A] = plot_phasor_diagram(I_A, V_T, X_S, R_A, P_angle):
% I_A: струм якоря в амперах (A)
% V_T: напруга на виході в вольтях (V)
% X_S: синхронний опір в омах
% R_A: опір якоря в омах
% P_angle: кут потужності в радіанах
%
% Будує діаграму фазорів генератора для заданих параметрів.
V_phi = V_T / sqrt(3); % розподіл на sqrt(3) через Y-з'єднання
I_A = I_A * exp(1i * P_angle); % знаходимо струм якоря у фазорному вигляді
Ia_Ra = I_A * R_A;
j_Ia_Xs = 1i * I_A * X_S;
E_A = V_phi + Ia_Ra + j_Ia_Xs;
Ia_x = real(Ia_Ra); Ia_y = imag(Ia_Ra); % отримуємо дійсні та уявні частини I_A * R_A
Ia_Ra_x = real(Ia_Ra); Ia_Ra_y = imag(Ia_Ra); % отримуємо дійсні та уявні частини I_A * R_A
j_Ia_Xs_x = real(j_Ia_Xs); j_Ia_Xs_y = imag(j_Ia_Xs); % отримуємо дійсні та уявні частини j * I_A * X_S
Ea_x = real(E_A); Ea_y = imag(E_A); % отримуємо дійсні та уявні частини E_A

```

```

hold on
quiver(0, 0, Ia_x, Ia_y, 0, 'DisplayName', 'I_A')    % будуємо I_A
quiver(0, 0, V_phi, 0, 0, 'DisplayName', 'V_\phi')  % будуємо V_phi
quiver(0, 0, Ea_x, Ea_y, 0, 'DisplayName', 'E_A')   % будуємо E_A
quiver(V_phi, 0, Ia_Ra_x, Ia_Ra_y, 0, 'DisplayName', 'I_A\cdot R_A') % будуємо I_A * R_A
quiver(V_phi + Ia_Ra_x, Ia_Ra_y, j_Ia_Xs_x, j_Ia_Xs_y, 0, 'DisplayName', 'j\cdot I_A\cdot X_S') %
будуємо j * I_A * X_S
xlabel('Дійсна')
ylabel('Уявна')
hold off
end
function [I_A_mag] = calculate_Ia_mag(V_phi, I_F, X_S, R_A, P_angle)
%[I_A_mag] = calculate_Ia_mag(V_phi, I_F, X_S, R_A, P_angle):
% V_phi: вихідна напруга в вольтах (В)
% I_F: струм збудження в амперах (А)
% X_S: синхронний опір в омах
% R_A: опір якоря в омах
% P_angle: кут потужності в радіанах
%
% Повертає величину струму якоря |I_A| для заданих параметрів.
syms Ia;
E_A_mag = calculate_Vt_OC(I_F) / sqrt(3); % розподіл на sqrt(3) через Y-з'єднання
I_A_mag = solve(((V_phi + Ia * R_A * cos(P_angle) + Ia * X_S * -sin(P_angle)) ^ 2 ...
+ (Ia * R_A * sin(P_angle) + Ia * X_S * cos(P_angle)) ^ 2) ...
== (E_A_mag ^ 2), Ia); % вирішення теореми Піфагора
I_A_mag = I_A_mag(2);
end

```

Результатом роботи програми є розташування векторів на площині – рис. 4.2. Дана діаграма представляє діаграму для синхронного генератора при номінальних умовах роботи, зображуючи вектори, що відображають різні електричні величини генератора, та межі його роботи. Вектори показують величину та напрямок струму якоря (I_A), фазну напругу (V_ϕ), внутрішню генеровану напругу (E_A), а також падіння напруги на опорі якоря ($I_A \cdot R_A$) та синхронному опорі ($j \cdot I_A \cdot X_S$). Червоне пунктирне коло відображає максимальний струм якоря, який може протікати через обмотку без перевантаження, а червоне суцільне коло показує максимальну внутрішню генеровану напругу при заданих умовах. Діаграма забезпечує візуалізацію взаємодії електричних величин у генераторі, що є ключовим для аналізу його роботи та забезпечення надійності.

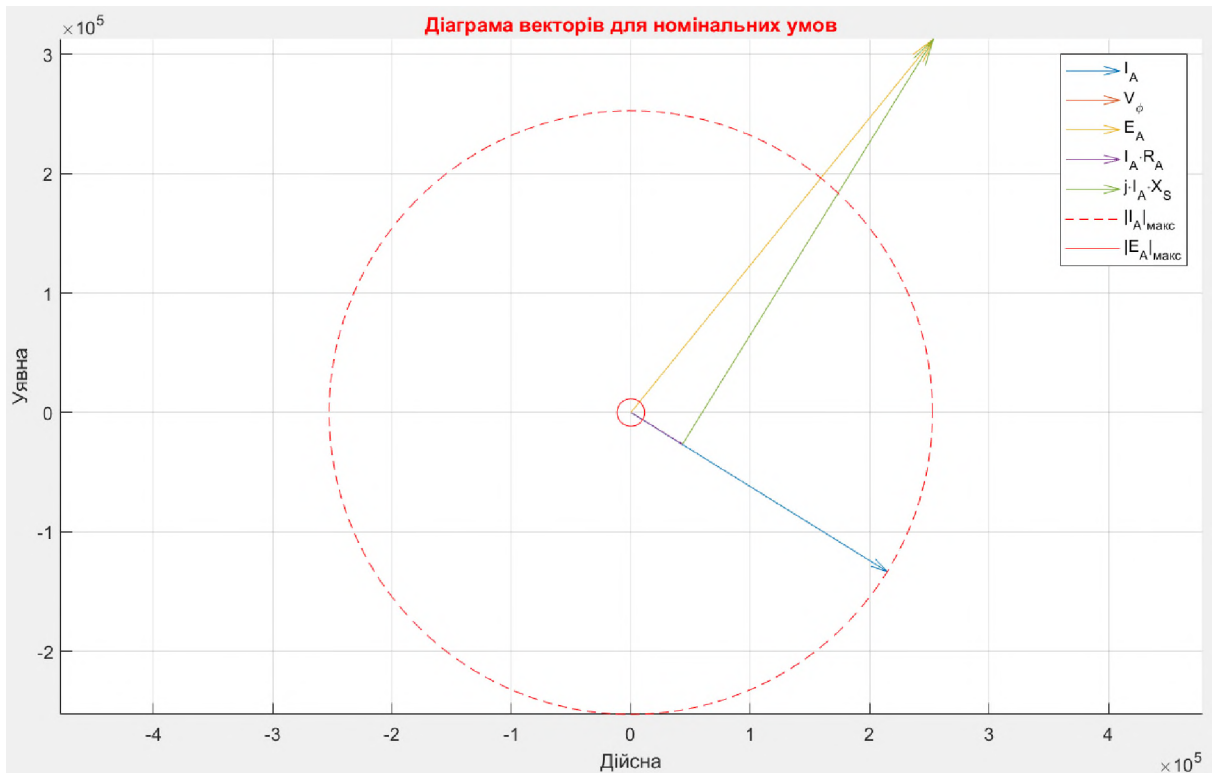


Рисунок 4.2 – Коливання напруги на клеммах трансформатора при перемиканнях вимикача (при низькій індуктивності електричного ланцюга)

Регулювання кута навантаження в системах збудження підвищує стабільність роботи синхронного генератора в ємнісному режимі роботи. Це можна реалізувати шляхом запровадження цифрової системи керування генератором (рис. 4.3) [22].

Система включає кілька ключових контролерів, які працюють разом для забезпечення стабільності генератора. Контролер реактивної потужності приймає задане значення реактивної потужності ($Q_{зад}$) і формує вихідний сигнал, який визначає задане значення струму збудження ($i_{зад}$). Контролер напруги отримує задане значення напруги ($u_{зад}$) і генерує вихідний сигнал, що також визначає струм збудження. Цей контролер взаємодіє з контролером кута навантаження, який коригує керування на основі поточного кута навантаження ($\delta_{крит}$). Контролер струму збудження використовує задане значення струму збудження ($i_{зад}$) для формування

фактичного струму збудження (i_f), який подається на генератор. Контролер кута навантаження аналізує поточний кут навантаження ($\delta_{\text{крит}}$) і відповідним чином коригує керування струмом збудження для підтримання стабільної роботи генератора. Вся система використовує сигнали зворотного зв'язку, що включають вимірювані параметри генератора для точного керування. Цифрова система керування обробляє всі сигнали і керує контролерами, забезпечуючи автоматичне регулювання реактивної потужності, напруги і струму збудження з урахуванням кута навантаження, що в результаті дозволяє підтримувати стабільну роботу синхронного генератора.

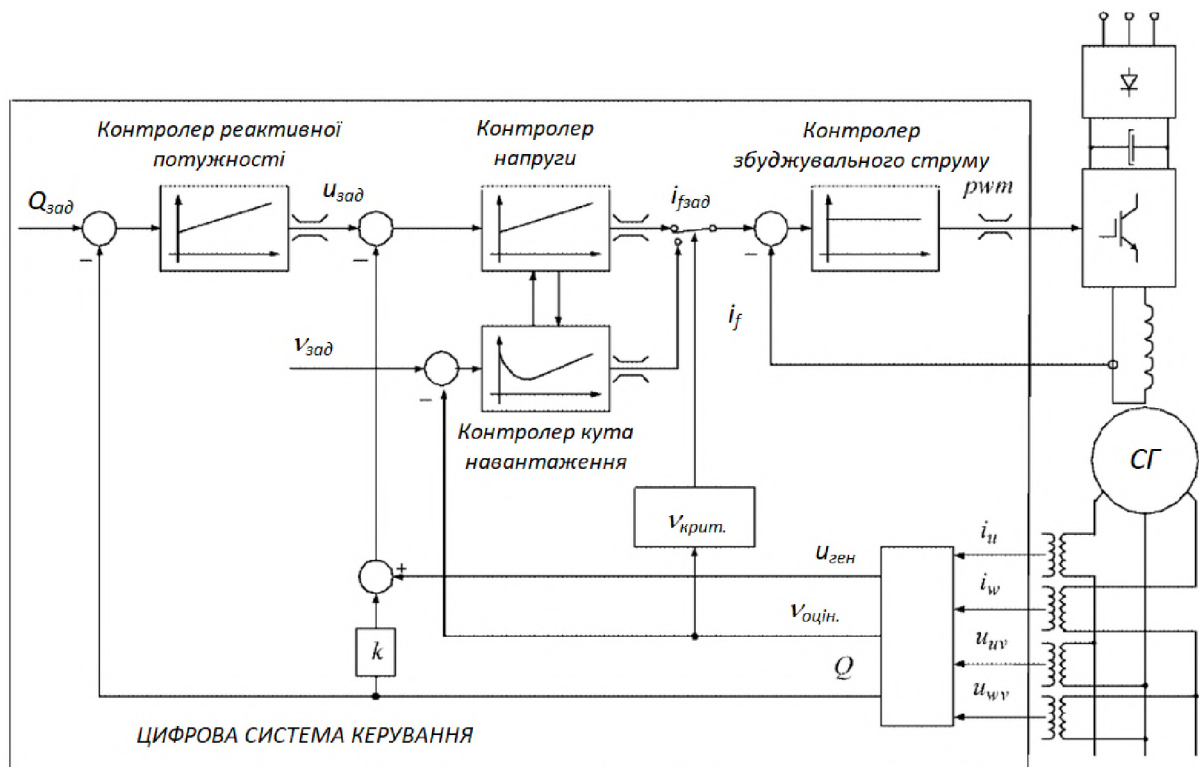


Рисунок 4.3 – Запровадження цифрової системи керування генератором для підвищення його стабільної роботи

Результати моделювання даної схеми дають можливість отримати зміну різних параметрів роботи даної схеми – рис. 4.4–4.8.

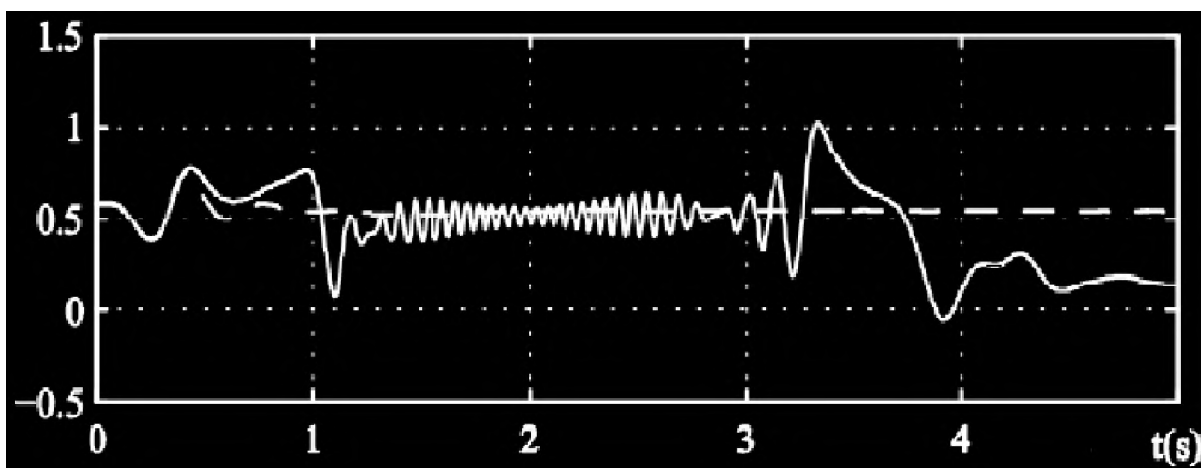


Рисунок 4.4 – Зміна струму під час процесу регулювання

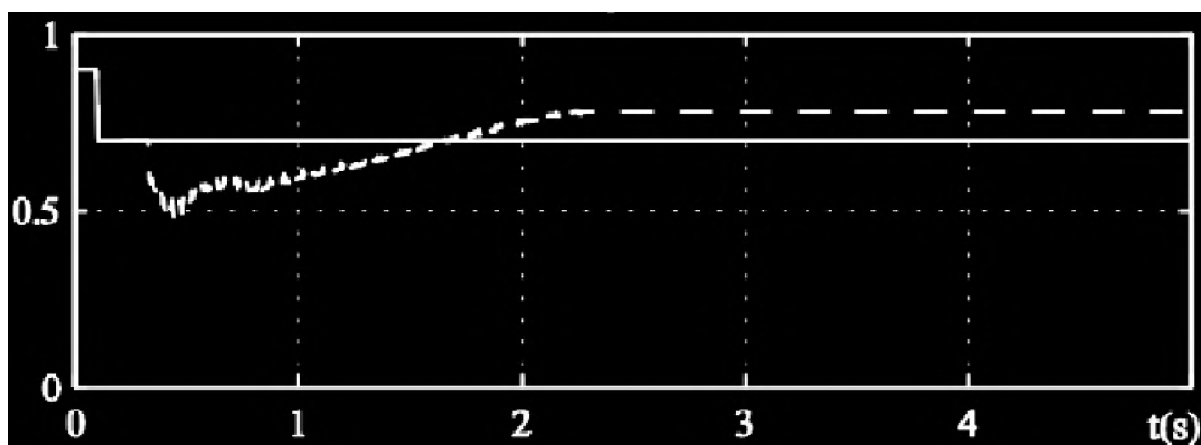


Рисунок 4.5 – Зміна напруги під час процесу регулювання

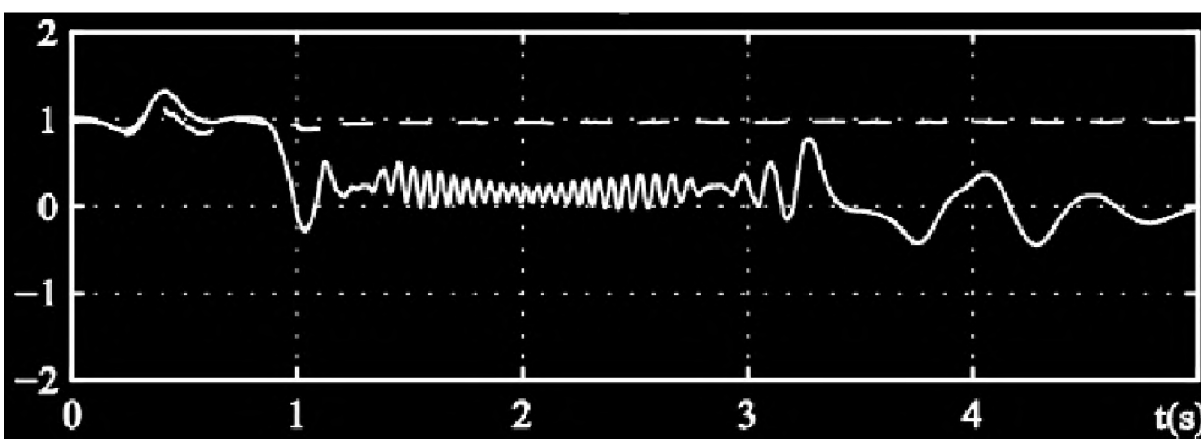


Рисунок 4.6 – Зміна активної потужності під час процесу регулювання

Реакція системи показала покращену стабільність та згасання коливань після активації регулятора кута навантаження.

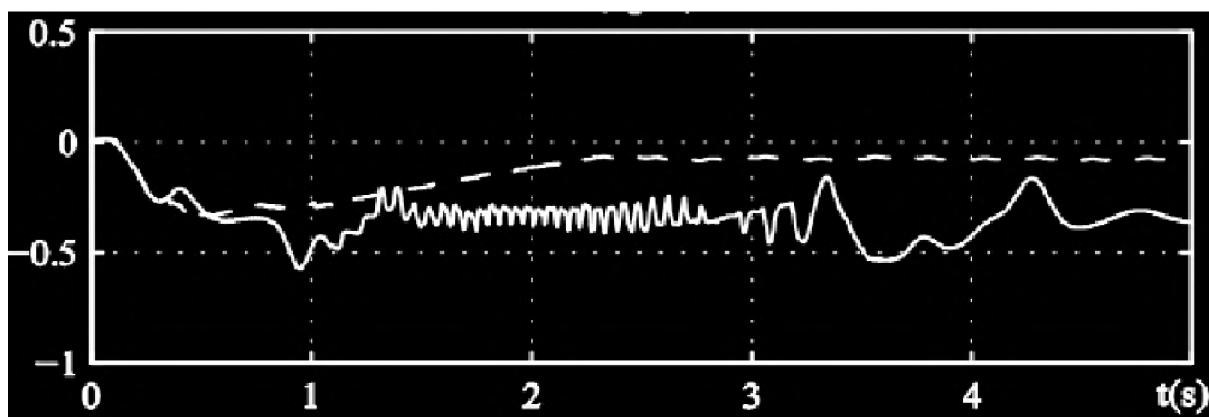


Рисунок 4.7 – Зміна реактивної потужності під час процесу регулювання

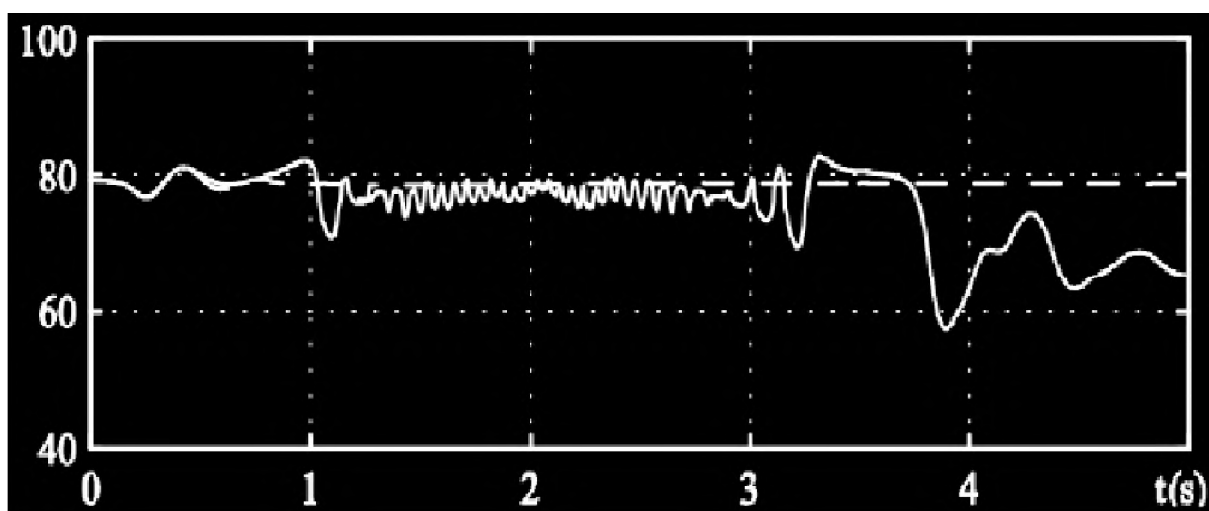


Рисунок 4.8 – Зміна величини кута навантаження під час процесу регулювання

Аналіз графічних залежностей дозволяє зробити наступні висновки: коли напруга знижується, споживання реактивної потужності генератора з мережі зростає, підштовхуючи робочу точку до межі стабільності. Зміна опорної напруги викликає коливання всіх змінних генератора. Коливання активної потужності свідчить про перехід генератора в двигунний режим і коливання величини кута навантаження. Ці коливання завдяки асинхронній роботі призводять до встановлення механічної потужності на нулі для запобігання скидання потужності та пошкодження.

ВИСНОВКИ

Дослідження стійкості електричних систем є надзвичайно актуальним у сучасних умовах, коли зростає навантаження на енергомережі та відбувається інтеграція відновлюваних джерел енергії.

Основні результати роботи свідчать про те, що інтелектуальні системи управління, зокрема нейронні мережі та алгоритми оптимізації на основі біотехнологій, мають значний потенціал для покращення стабільності перехідних процесів у енергосистемах.

У ході дослідження було розроблено модель для моделювання довгострокової динаміки, яка включає різні автоматичні контролери генерації та систему керування ланкою постійного струму. Застосування таких підходів дозволяє краще контролювати резервну потужність, використовуючи вторинні резерви, керовані національним автоматичним контролером генерації. Дослідження підтверджують, що інтеграція ліній постійного струму є життєво необхідною для покращення стабільності частоти та забезпечення успішної синхронної роботи. Це особливо важливо в умовах зростання складності енергосистем через інтеграцію відновлюваних джерел енергії та розподілених енергетичних ресурсів. Встановлено, що інтелектуальні системи, такі як нейронні мережі та нечітка логіка, можуть забезпечити кращий контроль, використовуючи властивості спостережуваності та менших помилок моделювання, що призводить до більш ефективних контурів керування.

Інтелектуальні системи управління пропонують життєздатне рішення для складних проблем управління в сучасних енергосистемах. Використання різних принципів інтелектуального керування дозволяє значно покращити стабільність енергосистеми, забезпечуючи надійну та ефективну роботу навіть за екстремальних умов.

Результати досліджень включають розробку нових підходів до аналізу та підвищення стійкості електричних систем, які можуть бути використані для вдосконалення існуючих систем автоматичного регулювання та керування. Це дозволить забезпечити більш надійне та стабільне електропостачання в умовах зростаючих вимог до енергетичної системи, а також підвищити ефективність інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Таким чином, дана наукова робота спрямована на вирішення актуальних проблем стійкості електричних систем, що має важливе значення для забезпечення надійного електропостачання та стабільної роботи енергетичної інфраструктури в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сулейманов В. М. Електричні системи та мережі. Частина 1 [Електронний ресурс]: матеріали лекцій / Сулейманов В. М., Кацадзе Т. Л. – Електронні текстові дані, 2011. – 131 с.
2. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: навч. посібник / Ю.Ф. Романюк. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
3. Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І. Перехідні процеси в системах електропостачання. Національна гірнича академія України, 2003. – 597 с.
4. Черемісін М.М., Мороз О.М., Єгоров О.Б., Швець С.В. Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / М.М. Черемісін, О.М. Мороз, О.Б. Єгоров, С.В. Швець. – Харків: ТОВ «В справі», 2016. – 260 с.
5. Черемісін М.М. Перехідні процеси в системах електропостачання. – Х.: Факт, 2005. – 176 с.
6. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT): ДСТУ EN 50160: 2014. – [Чинний від 2014-10-01]. – К.: Мінекономрозвитку, 2014. – 27 с. – (національний стандарт України).
7. Аввакумов В.Г. Перехідні процеси в системах електропостачання: елементи теорії, програми, ілюстрації навчальний посібник / В.Г. Аввакумов. Л.Б. Терешкевич. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 241 с.
8. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty W.H. Electrical Power System Quality. – McGraw-Hill.-2004 – 521 p.
9. The Evolution of the Synchronous Machine, by Proffesor Gerhard Neidhofer, Engineering Science and Education Journal, October 1992.

10. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010, – 408 с.
11. Свиридов М.П. Перехідні процеси. Розрахунок статичної і динамічної стійкості електричної мережі : навчальний посібник / М.П. Свиридов. В.В. Тептя. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 99 с.
12. Попадченко С.А. Захист ліній та підстанцій від блискавки та атмосферних перенапруг / Попадченко С.А., Савченко О.А. – Методичний посібник – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019. – 120 с.
13. Kyrylenko O., Pavlovskiy V., Lukianenko L., Steliuk A., Lenga O. Stability issues in modern power systems. Computational Problems of Electrical Engineering, 2015, 5(1), p. 1-32.
14. Valuva C., Chinnamuthu S., Khurshaid T., Kim, K.-C. A comprehensive review on the modelling and significance of stability indices in power system instability problems. Energies, 2023. 16(6718). <https://doi.org/10.3390/en16186718>.
15. de Cominges Guerra I., Li W., Wang R. A comprehensive analysis of PINNs for power system transient stability. Electronics, 2024, 13(391). <https://doi.org/10.3390/electronics13020391>.
16. Shrestha A., Gonzalez-Longatt F. Frequency stability issues and research opportunities in converter dominated power system. Energies, 2021, 14(4184). <https://doi.org/10.3390/en14144184>.
17. Abro A.G., Mohamad-Saleh J. Control of power system stability – reviewed solutions based on intelligent systems. International journal of innovative computing, information and control, 2012, 8(10A).
18. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора В.І. Мілих. – Київ: Каравела, 2018. – 452 с.
19. Розрахунок стійкості системи електропостачання : методичні вказівки до виконання контрольної роботи з дисципліни «Стійкість систем електропостачання в перехідних та аварійних режимах» / укладачі: Ю.О.

Семененко, О.І. Семененко, О.Д. Супрун, М.М. Одегов; кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 30 с.

20. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://cfm.ehu.es/ricardo/docs/python/Learning_Python.pdf

21. S.J. Chapman. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.

22. Теорія цифрових систем [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», освітньої програми «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / І.Р. Пархомей, В.П. Пасько, О.М. Польшакова, О.А. Стенін; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 133 с.

23. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник/ А.В. Журахівський, С.В. Казанський, Ю.П. Матеєнко, О.Р. Пастух. – Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с.

24. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT): ДСТУ EN 50160: 2014. - [Чинний від 2014-10-01]. – К.: Мінекономрозвитку, 2014. - 27 с. - (національний стандарт України).

25. Правила улаштування електроустановок. – 5-те видання, переробл. й доповн. – Х.: Видавництво «Форт», 2014. – 800 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

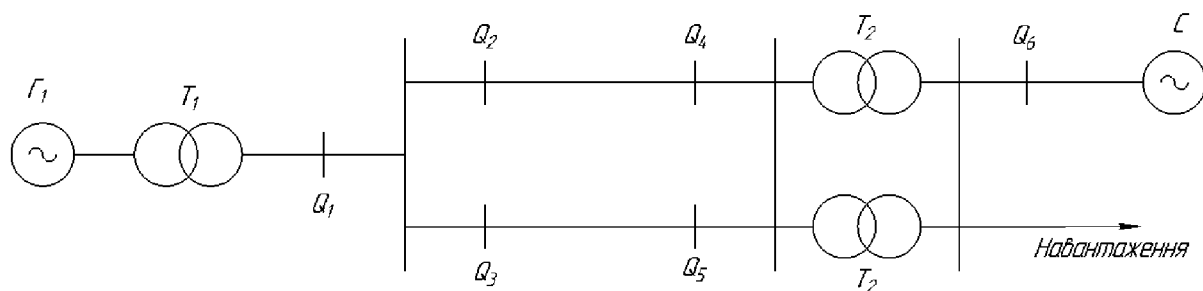


Схема електричної системи

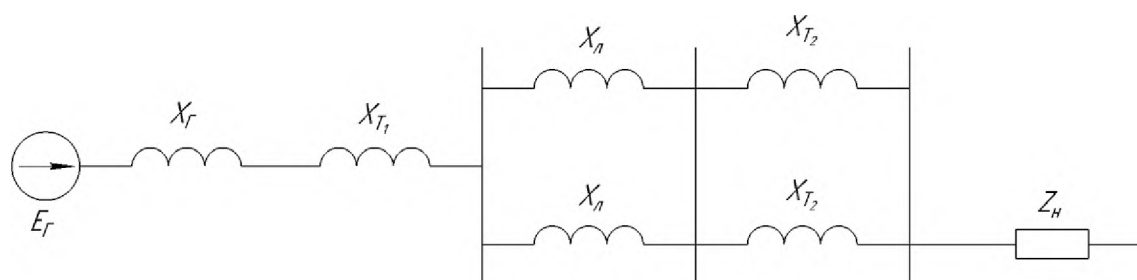
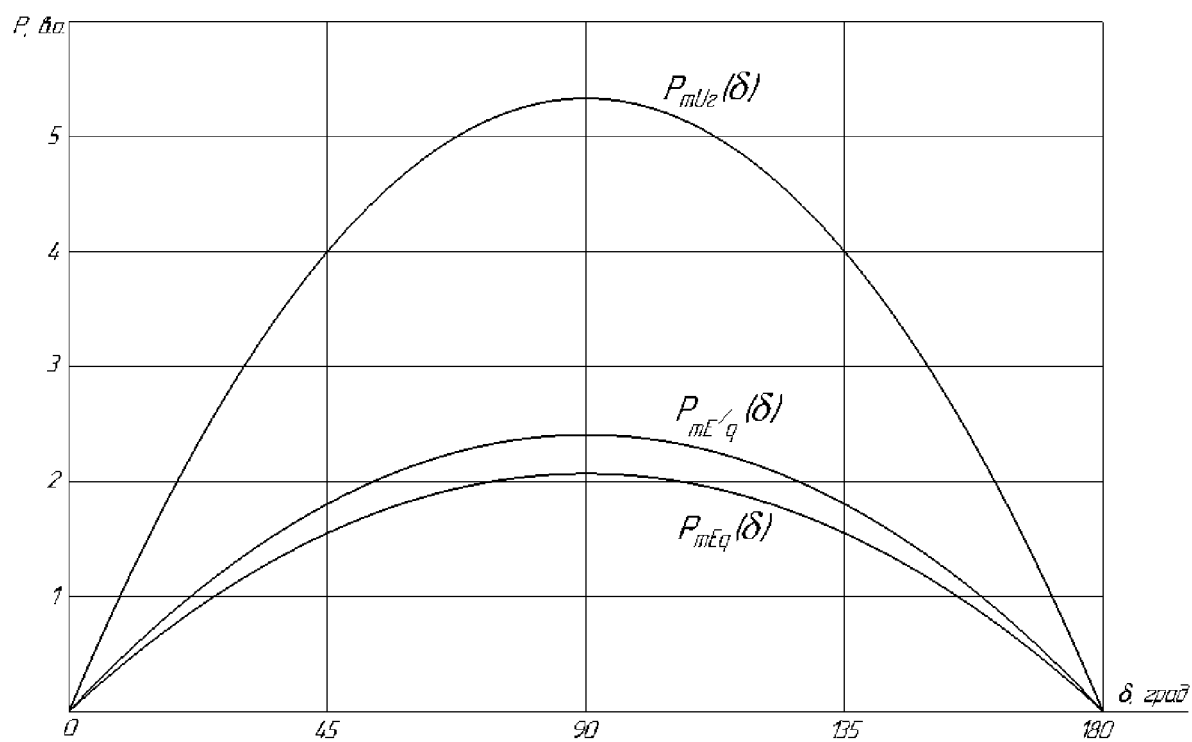


Схема заміщення



Графічна інтерпретація характеристики потужності

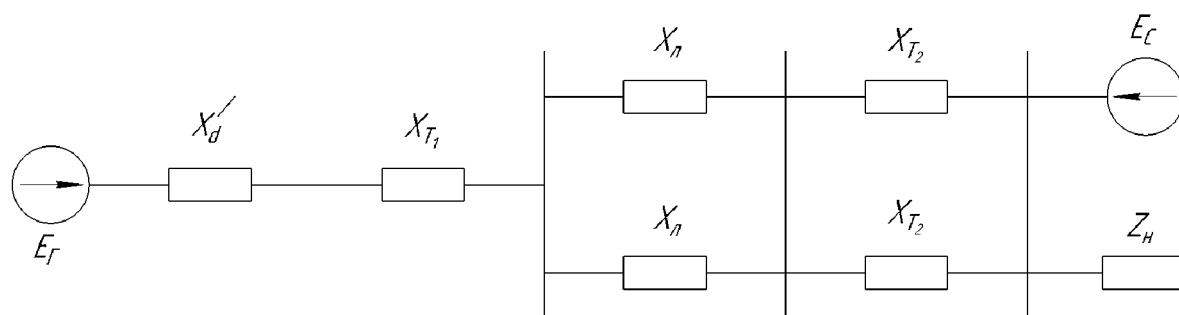


Схема заміщення при нормальному режимі

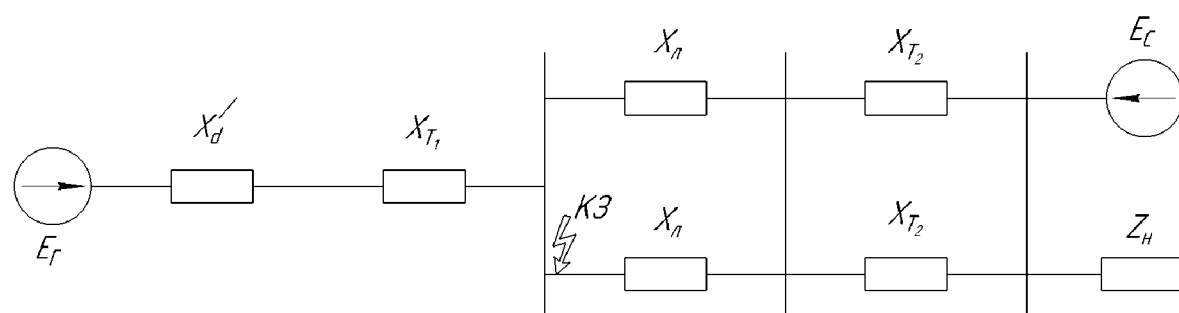


Схема заміщення при аварійному режимі – коротке замикання

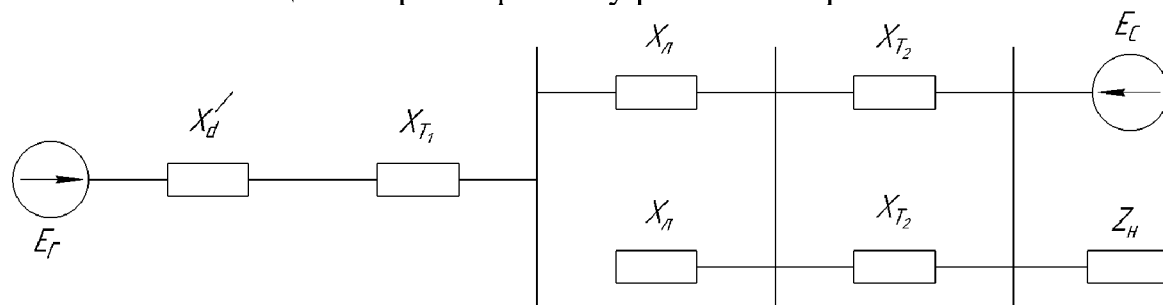


Схема заміщення при аварійному режимі – відмова одного з вимикачів

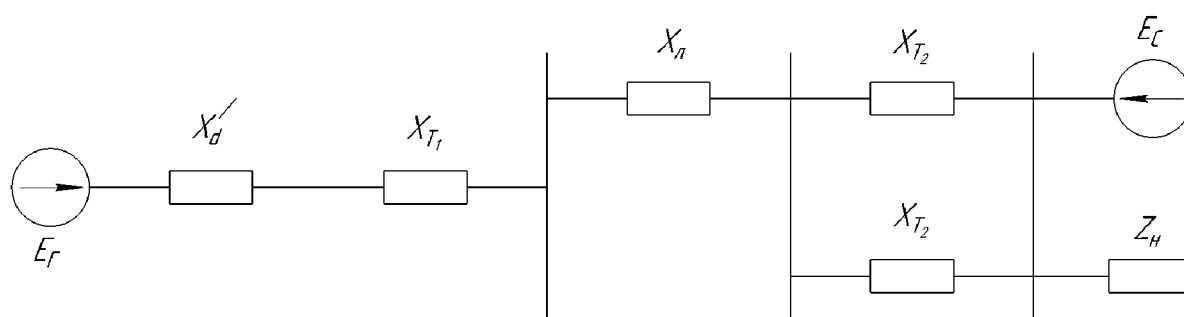


Схема заміщення при післяварійному режимі

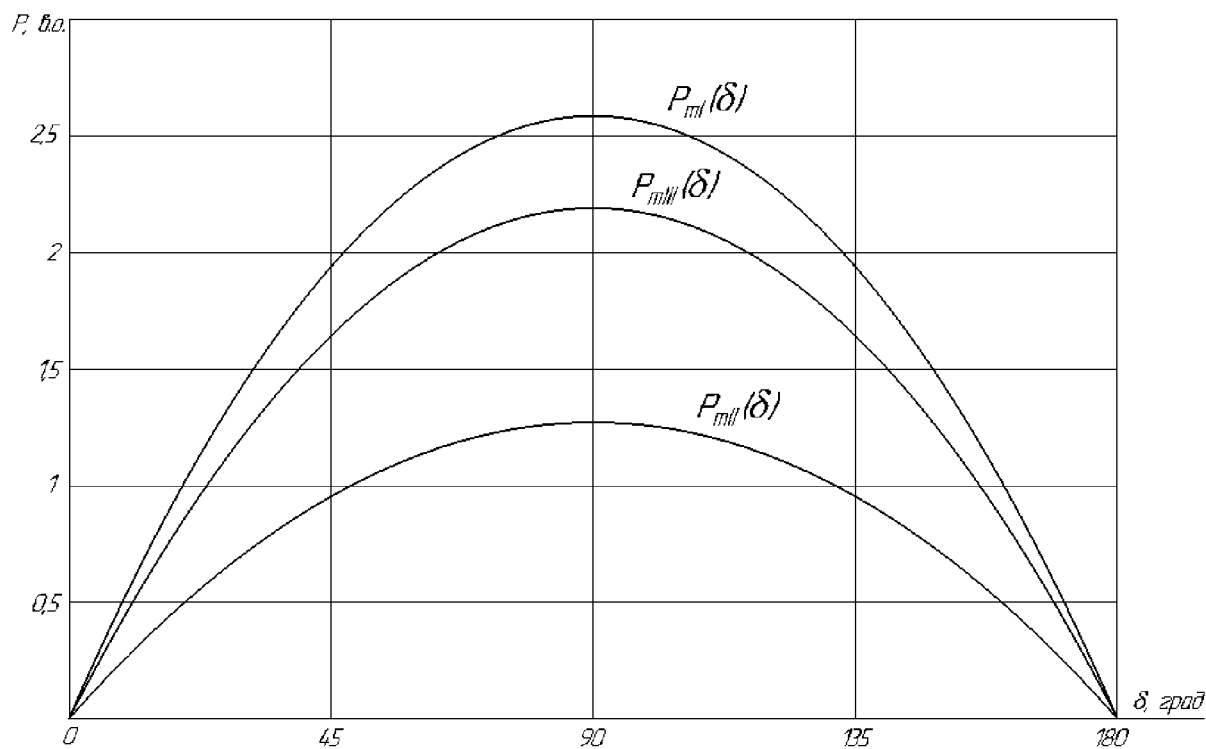
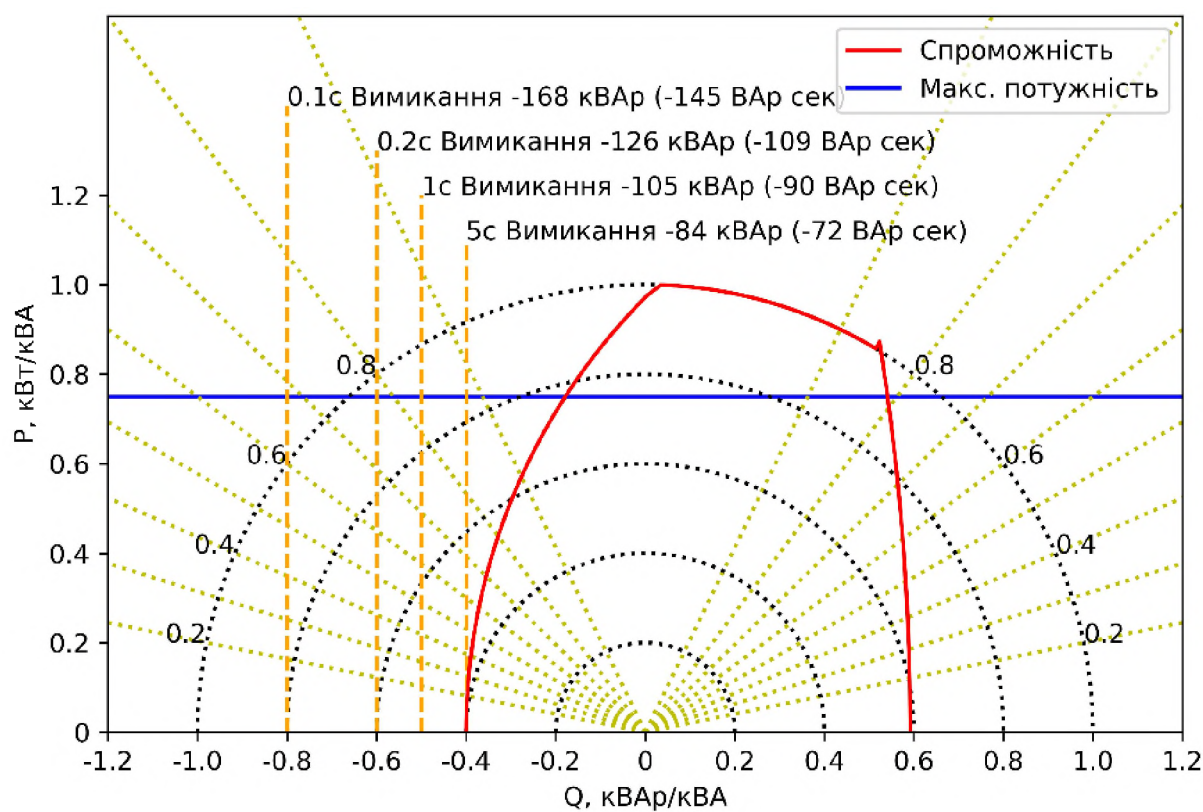
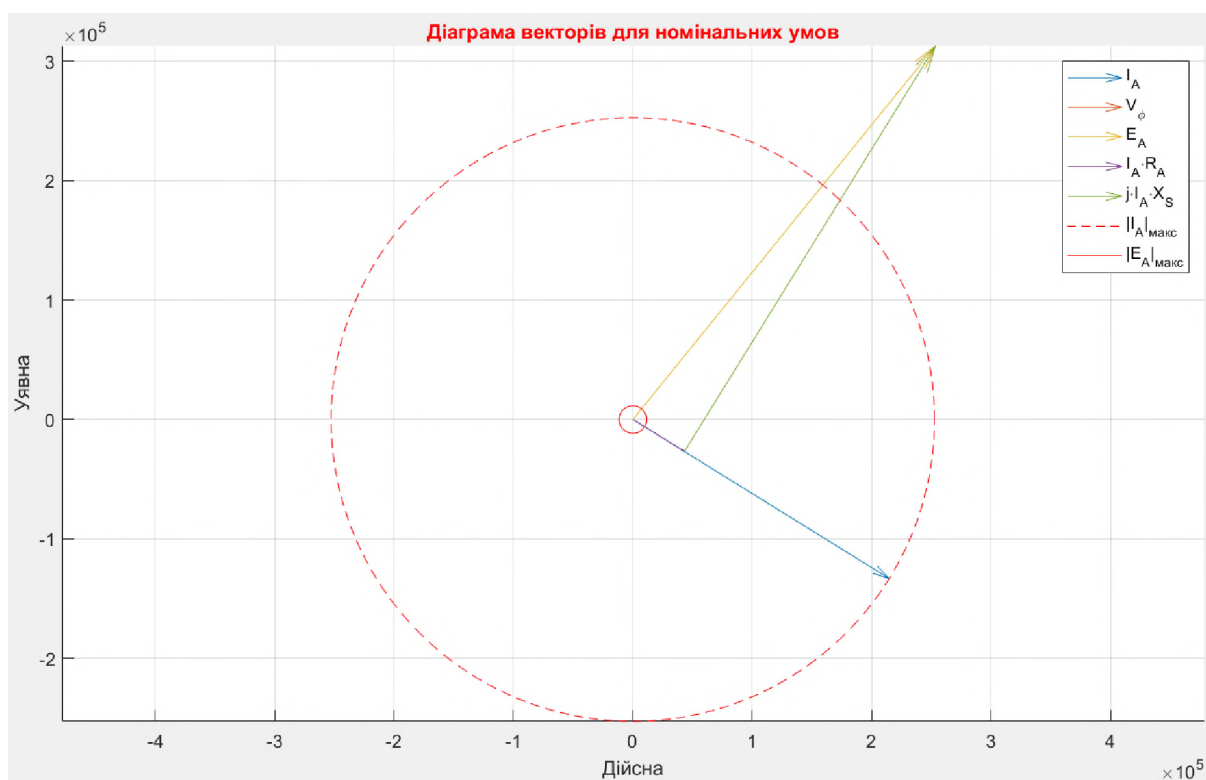


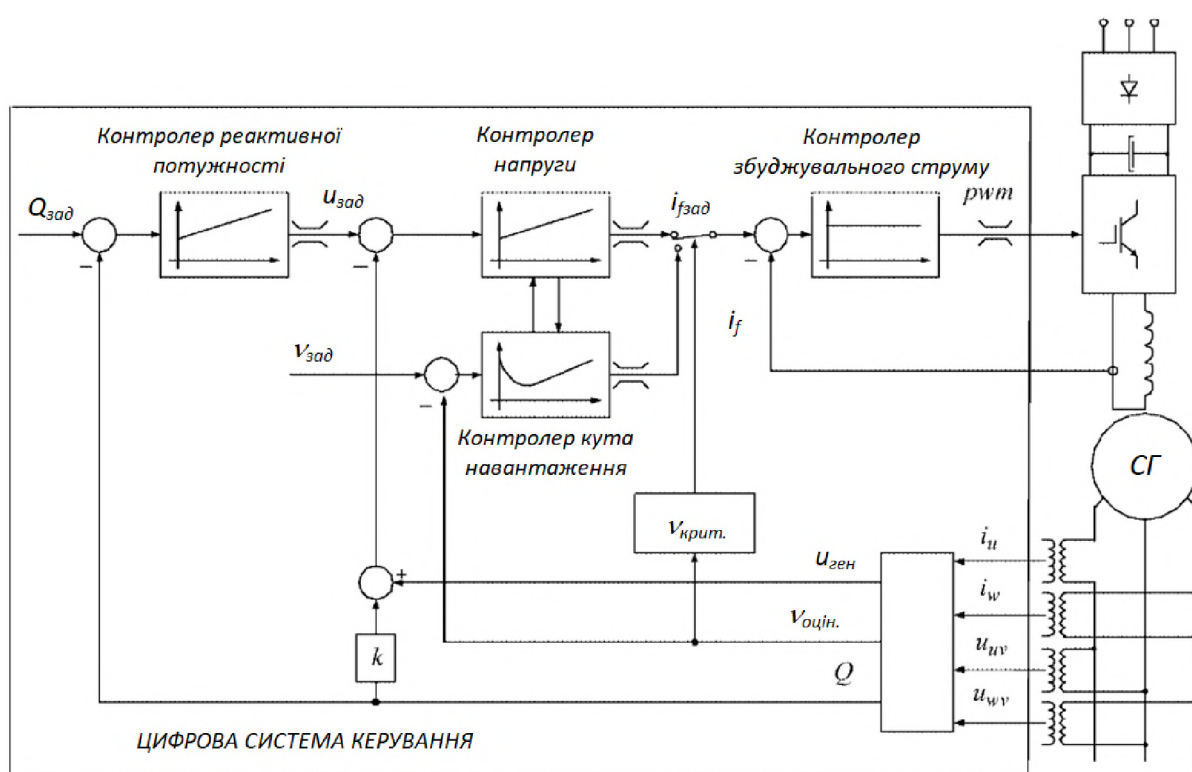
Схема заміщення при аварійному режимі – відмова одного з вимикачів



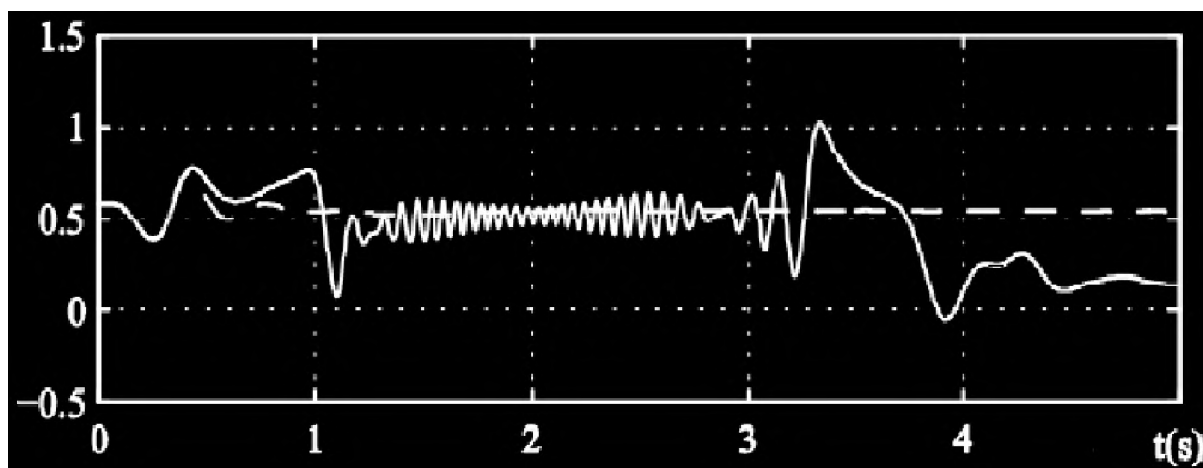
Діаграма можливостей генератора у просторі потужностей



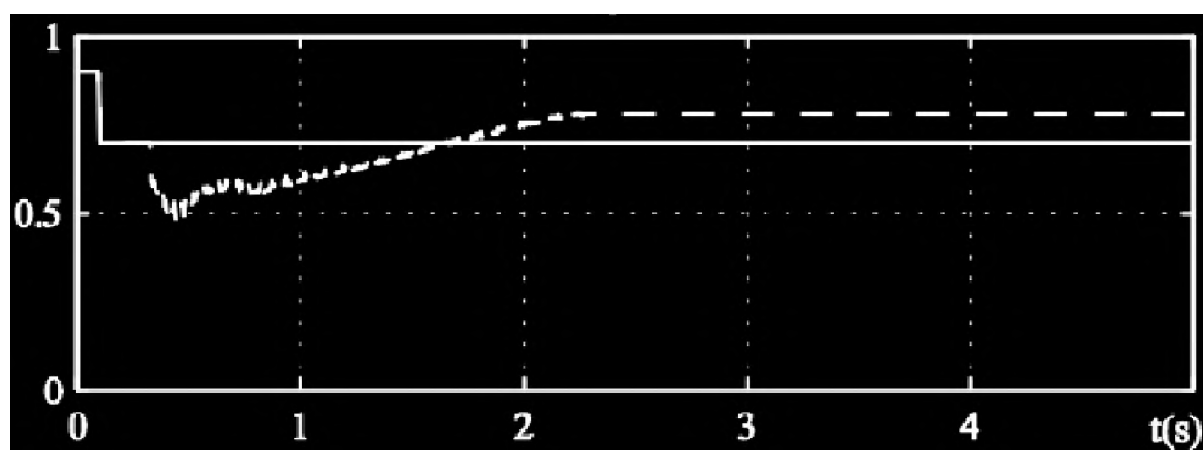
Коливання напруги на клеммах трансформатора при перемиканнях вимикача (при низькій індуктивності електричного ланцюга)



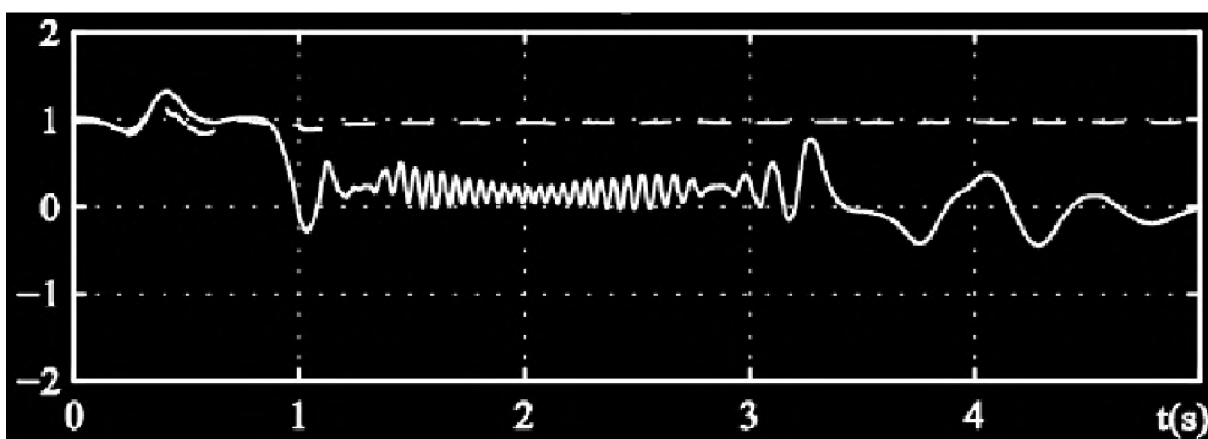
Запровадження цифрової системи керування генератором для підвищення його стабільної роботи



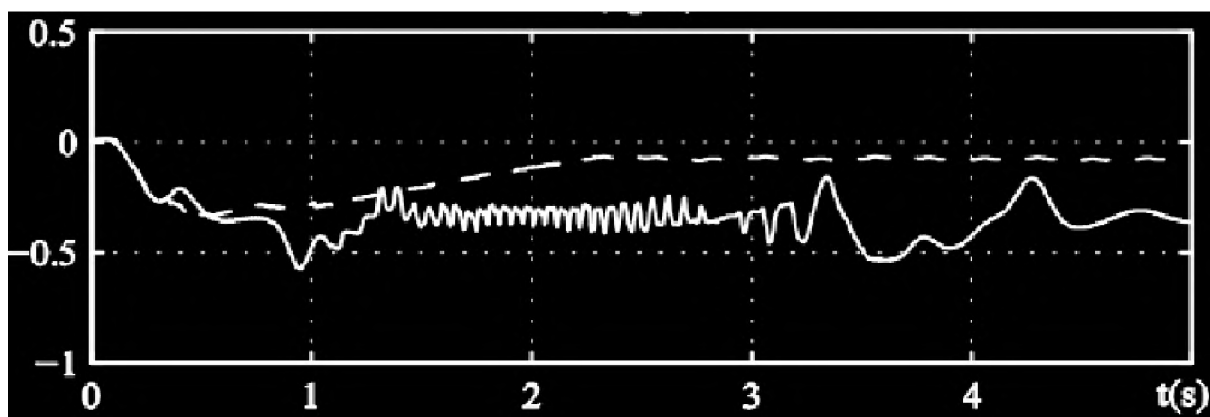
Зміна струму під час процесу регулювання



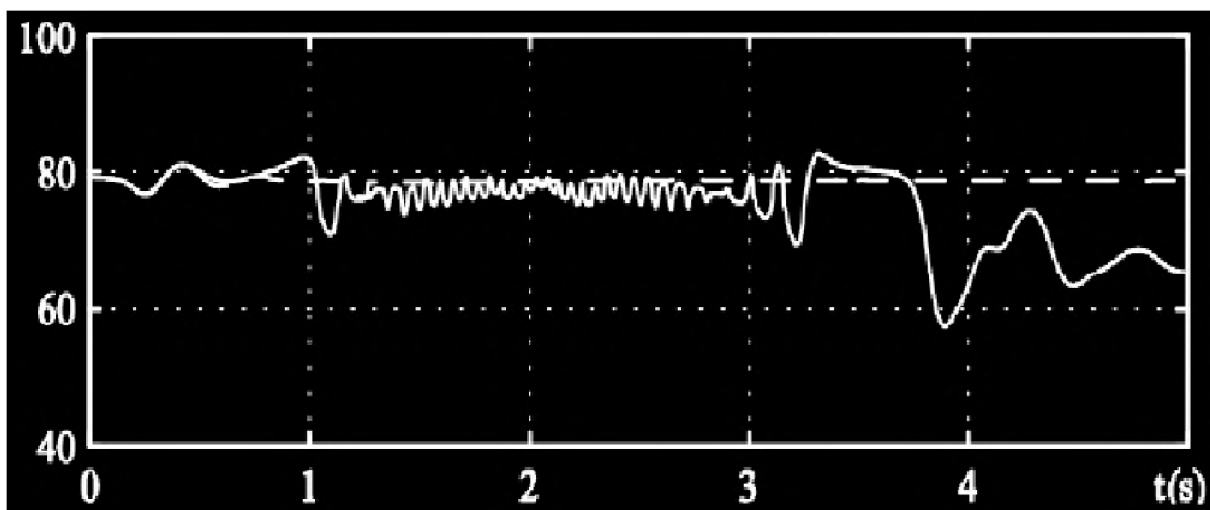
Зміна напруги під час процесу регулювання



Зміна активної потужності під час процесу регулювання



Зміна реактивної потужності під час процесу регулювання



Зміна величини кута навантаження під час процесу регулювання

ДОДАТОК Б.

ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК (ВИТЯГ)

1. Обов'язки працівників

1.1. Обслуговування діючих електроустановок, проведення в них оперативних перемикань, організацію та виконання ремонтних, монтажних чи налагоджувальних робіт і випробувань повинні здійснювати спеціально підготовлені та атестовані електротехнічні працівники.

У споживачів, як правило, має бути створена електротехнічна служба (відділ, група), укомплектована необхідною кількістю електротехнічного персоналу, залежно від класу напруги живлення, складності та обсягу обслуговуваних електроустановок.

У разі відсутності атестованого обслуговуючого персоналу допускається визначити спеціалізовану організацію, відповідальну за технічну експлуатацію та обслуговування електроустановок споживача. Ця організація згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 15.10.2003 N 1631 "Про затвердження Порядку видачі дозволів Державним комітетом з нагляду за охороною праці та його територіальними органами" повинна мати відповідний дозвіл на проведення робіт в електроустановках. У цьому разі відповідальність за технічно грамотну та безпечну експлуатацію електрогосподарства споживача повинна визначатись договором, укладеним між споживачем і цією організацією.

За відсутності такого обслуговування експлуатація електроустановок забороняється.

1.2. Власник електроустановки повинен забезпечити організацію:

- експлуатації електроустановок (електротехнічного та електротехнологічного обладнання) згідно з вимогами цих Правил, інших чинних НД та Правил користування електричною енергією, затверджених постановою НКРЕ від 31.07.96 N 28, зареєстрованих у Міністерстві

юстиції України 02.08.96 за N 417/1442 (у редакції постанови НКРЕ від 17.10.2005 N 910, зареєстрованої у Міністерстві юстиції України 18.11.2005 за N 1399/11679);

- надійної роботи електроустановок і безпечного їх обслуговування;
- виконання заходів із запобігання використанню технологій і методів роботи, що негативно впливають на навколишнє природне середовище;
- дотримання встановлених режимів споживання електричної енергії та потужності;
- виконання приписів органів державного нагляду.

1.3. Для безпосереднього виконання функцій щодо організації експлуатації електроустановок керівник (роботодавець) повинен призначити особу, відповідальну за електрогосподарство споживача (далі - особа, відповідальна за електрогосподарство), та особу, яка буде її замінювати у разі відсутності.

Особу, відповідальну за електрогосподарство, та особу, яка буде її замінювати, призначають з числа спеціалістів, кваліфікація яких відповідає вимогам Правил та які пройшли навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки та охорони праці.

Після успішної перевірки знань з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки та охорони праці та присвоєння цим особам IV групи з електробезпеки для обслуговування електроустановок напругою до 1000 В та V групи з електробезпеки для обслуговування електроустановок напругою понад 1000 В ці особи наказом споживача допускаються до виконання своїх обов'язків.

За наявності в споживача посади головного енергетика обов'язки особи, відповідальної за електрогосподарство, як правило, покладаються на нього. Допускається виконання обов'язків особи, відповідальної за електрогосподарство, та/або її заступника, за сумісництвом.

Організація вищого рівня споживача може призначати особу, відповідальну за електрогосподарство, для своїх структурних підрозділів.

1.4. Споживачі, у яких електрогосподарство включає тільки ввідно-розподільний пристрій, освітлювальні установки, прилади побутового призначення напругою до 220 В, особу, відповідальну за електрогосподарство, можуть не призначати.

Відповідальність за технічно грамотне та безпечне користування електроустановкою за письмовою згодою територіального підрозділу Держенергонагляду покладається на керівника споживача. Ця особа повинна пройти навчання в СНЗ за 8-годинною програмою. Надалі вона проходить інструктаж в енергопостачальній організації з питань технічної та безпечної експлуатації електроустановок в обсязі знань, що відповідає II групі з електробезпеки, про що робиться запис у журналі інструктажу споживачів і в договорі про користування електроенергією.

За умови відсутності змін в умовах виробництва та складі електрообладнання періодичність проведення інструктажів установлюється один раз на два роки.

Якщо під час здійснення енергетичного нагляду будуть виявлені порушення умов експлуатації та умов електроспоживання, то постачання електроенергії повинно бути припинене або обмежене в установленому порядку до призначення на цьому об'єкті особи, відповідальної за електрогосподарство, або електроустановку необхідно передати на обслуговування спеціалізованій організації.

1.5. Експлуатація електроустановок з напругою понад 1000 В, власниками яких є населення, дозволяється у разі, якщо споживач має V групу з електробезпеки або оформив договір про надання послуг щодо обслуговування електроустановок зі спеціалізованою організацією або з фізичною особою.

1.6. Особа, відповідальна за електрогосподарство (спеціалізована організація), повинна забезпечити:

1) розроблення і проведення організаційних і технічних заходів, що включають:

- утримання електроустановок у робочому стані та їх експлуатацію згідно з вимогами цих Правил, ПУЕ, ПБЕЕ, інструкцій та інших НД;
 - дотримання заданих електропередавальною (електропостачальною) організацією режимів електроспоживання і договірних умов споживання електричної енергії та потужності;
 - виконання заходів з підготовки електроустановок підприємства до роботи в осінньо-зимовий період;
 - раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів;
 - оптимальне споживання реактивної потужності та економічні режими роботи компенсуючих пристроїв;
 - упровадження автоматизованих систем і приладів вимірювання та обліку електричної енергії;
 - своєчасний і якісний ремонт електроустановок;
 - зменшення аварійності та травматизму;
 - забезпечення промислової безпеки;
 - підвищення надійності роботи електроустановок;
 - навчання і перевірку знань цих Правил, ПБЕЕ, ПУЕ, ПБЕ, Правил пожежної безпеки в Україні, виробничих (посадових і експлуатаційних) інструкцій та інструкцій з охорони праці для електротехнічного (електротехнологічного) персоналу;
 - охорону навколишнього природного середовища (у залежності від покладених функцій);
- 2) удосконалення мережі електропостачання споживача з виділенням на резервні зовнішні живильні лінії навантажень струмоприймачів екологічної та аварійної броні;
- 3) розроблення комплексу заходів, спрямованих на запобігання травматизму, зниженню рівня промислової безпеки, загибелі тварин, пошкодженню обладнання, можливим негативним екологічним та іншим наслідкам у разі припинення або обмеження електропостачання, здійсненого у встановленому порядку;

4) розслідування технологічних порушень в роботі електроустановок та оперативне повідомлення про них територіальному підрозділу Держенергонагляду;

5) розроблення та дотримання норм витрати палива, електричної енергії, їх своєчасний перегляд під час удосконалення технології виробництва та впровадження нової техніки;

6) проведення діагностування технічного стану електроустановок;

7) проведення вимірів споживання електричної енергії та потужності в установленій електропередавальною організацією характерний режимний день літнього та зимового періодів і подання в установлені терміни добових режимних графіків до електропередавальної організації та територіального підрозділу Держенергонагляду;

8) систематичний контроль за графіком навантаження споживача; розроблення постійно діючих заходів з регулювання добового графіка електричного навантаження, зниження граничних величин споживання електричної потужності в години максимуму навантаження мережі електропередавальної організації;

9) виконання графіка обмеження споживання електричної енергії, потужності та аварійного відключення споживачів; розробку заходів щодо зниження споживання електричної енергії та потужності для забезпечення встановлених режимів електроспоживання у відповідності до доведених графіків обмеження;

10) ведення обліку (у спеціальному журналі) щодобового споживання електричної енергії і навантаження в години контролю максимуму електричної потужності та надання інформації електропередавальній організації і відповідному територіальному підрозділу Держенергонагляду (на їх вимогу);

11) розроблення із залученням технологічних та інших підрозділів, а також спеціалізованих інститутів і проектних організацій перспективних планів зниження енергоємності продукції, яка випускається, упровадження

енергозберігаючих технологій, теплоутилізаційних установок, використання вторинних паливно-енергетичних ресурсів, запровадження прогресивних форм економічного стимулювання;

12) облік та аналіз аварій і нещасних випадків, а також ужиття заходів з усунення причин їх виникнення;

13) розроблення виробничих інструкцій та інструкцій з охорони праці і пожежної безпеки для працівників енергетичної служби;

14) надання інформації на вимогу Держенергонагляду у відповідності до нормативно-правових актів;

15) ведення документації з електрогосподарства згідно з вимогами нормативно-правових актів;

16) розроблення інструкцій про порядок дій обслуговуючого персоналу у разі виникнення аварійних та надзвичайних ситуацій, пожеж;

17) додержання вимог санітарних норм і правил щодо умов праці на робочих місцях обслуговуючого персоналу згідно з підрозділом 5.7 цих Правил.

1.7. Працівник, який виявив порушення цих Правил або помітив несправність електроустановки, колективного або індивідуального засобу захисту, зобов'язаний повідомити про це свого безпосереднього керівника, а за його відсутності - керівника вищого рівня.

У тих випадках, коли несправність в електроустановці становить явну небезпеку для людей чи для самої установки, а усунути цю несправність може працівник, який її виявив, він повинен зробити це негайно за умови дотримання вимог правил безпеки, а потім повідомити про цей випадок безпосереднього керівника.

1.8. Керівники споживачів повинні забезпечити безперешкодний доступ на свої об'єкти посадових осіб органів державного нагляду та контролю, надання їм інформації і документів, необхідних для здійснення ними своїх повноважень та виконання виданих цими органами приписів у зазначені терміни.

1.9. Контроль і нагляд за виконанням вимог цих Правил, відповідно до своїх обов'язків, здійснюють спеціалісти енергослужби, служби охорони праці споживача та організацій вищого рівня.

1.10. Державний нагляд за виконанням вимог цих Правил відповідно до Закону України "Про електроенергетику" та Положення про державний енергетичний нагляд за режимами споживання електричної і теплової енергії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 07.08.96 N 929, із змінами та доповненнями, здійснюють Держенергонагляд.

2 Вимоги до працівників і їх підготовка

2.1. Обслуговування електроустановок споживачів, у тому числі виконання ремонтних, монтажних, налагоджувальних робіт і оперативних перемикань в електроустановках, повинні здійснювати спеціально підготовлені електротехнічні працівники, а саме: керівники і фахівці, оперативні, виробничі та оперативно-виробничі працівники.

2.2. Обслуговування установок електротехнологічних процесів (електрозварювання, електролізу, електротермії тощо) вантажопідіймальних механізмів, ручних електричних машин, переносних та пересувних струмоприймачів, складного енергонасиченого виробничо-технологічного обладнання, під час роботи якого необхідно постійно проводити технічний нагляд, зміну, коригування ведення технологічних режимів за допомогою штатних засобів регулювання електроапаратури, електроприводів, повинні здійснювати спеціально підготовлені електротехнологічні працівники, які мають навички та знання для безпечного виконання робіт з технічного обслуговування закріпленої за ними установки.

2.3. Перелік посад та професій електротехнічних та електротехнологічних працівників, яким необхідно мати відповідну групу з електробезпеки, затверджує роботодавець.

2.4. Електротехнологічні працівники виробничих цехів і дільниць, які здійснюють експлуатацію електротехнологічних установок, повинні мати групу з електробезпеки II і вище.

Керівники структурних підрозділів, яким безпосередньо підпорядковані електротехнологічні працівники, повинні мати групу з електробезпеки не нижчу, ніж у підлеглих працівників. Вони повинні здійснювати технічне керівництво цими працівниками і контроль за їхньою роботою.

2.5. Працівники, які обслуговують електроустановки споживачів або технологічні процеси, які базуються на використанні електричної енергії, повинні мати вік понад 18 років. При прийнятті на роботу, а також періодично стан здоров'я працівників повинен засвідчуватися медоглядом.

2.6. Роботодавець відповідно до ГНД 34.12.102-2004 та ДНАОП 0.00-4.12-05 з урахуванням місцевих умов та складу енергетичного обладнання повинен затвердити положення про навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, охорони праці та про перевірку знань.

Навчання з технічної експлуатації електроустановок включає такі форми роботи з працівниками, що обслуговують електричні установки: проведення самого навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки, перевірку знань з цих питань, а також інструктажі, стажування, дублювання, проведення аварійних тренувань та допуск до роботи.

2.7. Для виконання роботи в електроустановках, розміщених у вибухонебезпечних або пожежонебезпечних зонах, працівник повинен пройти спеціальне навчання за програмою пожежно-технічного мінімуму відповідно до НАПБ Б.02.005-2003. Порядок організації навчання визначається НАПБ Б 06.001-2003.

2.8. Електротехнічні та електротехнологічні працівники повинні проходити інструктажі. Залежно від характеру і часу проведення інструктажі поділяються на: вступний, первинний, повторний, позаплановий, цільовий.

За результатами проведеного інструктажу особа, яка інструктує (шляхом опитування), повинна переконатись, що працівник засвоїв питання, з яких проводився інструктаж.

Проведення інструктажів можна здійснювати разом з інструктажами з охорони праці і фіксувати у відповідному журналі.

Відповідальність за організацію та проведення інструктажів, усіх форм навчання та перевірки знань з питань технології робіт, пожежної безпеки та охорони праці покладається на роботодавця.

2.9. У процесі трудової діяльності працівники проходять такі види навчання з питань технічної експлуатації електроустановок: професійне навчання кадрів на виробництві, яке проводиться відповідно до Положення про професійне навчання кадрів на виробництві, затвердженого спільним наказом Міністерства праці та соціальної політики України і Міністерства освіти і науки України від 26.03.2001 N 127/151, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 06.04.2001 за N 315/5506; періодичне навчання в СНЗ; щорічне навчання на виробництві.

2.10. У кожного споживача для персоналу, який забезпечує виробничі процеси в електроенергетиці, повинні бути затверджені керівництвом план-графіки на проведення щорічного навчання на виробництві та періодичного навчання в СНЗ.

2.11. Особи, відповідальні за електрогосподарство, проходять не рідше одного разу на три роки періодичне навчання з питань технічної експлуатації електроустановок.

2.12. Щорічне навчання на виробництві проходять електротехнічні та електротехнологічні працівники, які зайняті на роботах з підвищеною небезпекою або там, де є потреба в професійному доборі.

2.13. Після закінчення навчання з питань технічної експлуатації електроустановок працівник повинен пройти перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки (далі - перевірка знань з технології робіт).

Результати перевірки знань з технології робіт заносяться в журнал установленної форми та підписуються всіма членами комісії. Якщо перевірка знань декількох працівників проводилась в один день і склад комісії не змінювався, то члени комісії можуть підписатися один раз після закінчення роботи комісії. При цьому необхідно вказати словами загальну кількість осіб, у яких перевірено знання з технології робіт.

2.14. Новопризначені працівники, що прийняті на роботу, пов'язану з обслуговуванням електроустановок, або при перерві в роботі понад один рік, проходять первинну перевірку знань.

Первинна перевірка знань працівників повинна проводитись у терміни, установлені програмами і планами їх підготовки.

Допускається при проведенні перевірки знань використання контрольно-навчальних засобів на базі персональних електронно-обчислювальних машин для всіх видів перевірок, з наступним усним опитуванням, окрім первинної. У цьому разі запис у журналі перевірки знань не відміняється.

2.15. Допускається не проводити перевірку знань з технології робіт у працівника, якого прийнято на роботу за сумісництвом з метою покладення на нього обов'язків особи, відповідальної за електрогосподарство, при одночасному виконанні таких умов:

- якщо з моменту перевірки знань у комісії за основним місцем роботи минуло не більше одного року;

- енергоємність електроустановок, їх складність в організації експлуатації електрогосподарства за сумісництвом не вища, ніж за місцем основної роботи.

2.16. У разі переходу на інше підприємство чи переведення на іншу роботу (посаду) у межах одного підприємства або у зв'язку з перервою в роботі особі з електротехнічних працівників, яка успішно пройшла перевірку знань, рішенням комісії може бути підтверджена та група з електробезпеки, яку вона мала до переходу або перерви в роботі.

2.17. Періодичність навчання та періодичної перевірки знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці (далі - перевірка знань) з присвоєнням відповідної групи з електробезпеки проводиться в такі терміни:

- первинне навчання та перевірка знань усіх працівників до початку виконання роботи;

- для працівників, які безпосередньо організовують та проводять роботи з оперативного обслуговування діючих електроустановок чи виконують у них налагоджувальні, електромонтажні, ремонтні, профілактичні випробування або експлуатують електроустановки у вибухонебезпечних, пожежонебезпечних зонах, - один раз на рік;

- для адміністративно-технічних працівників, які не належать до попередньої групи, а також для працівників з охорони праці, допущених до інспектування електроустановок, - один раз на три роки.

Перевірка знань з питань правил пожежної безпеки в працівників, які обслуговують електроустановки у вибухонебезпечних і пожежонебезпечних зонах, здійснюється один раз на рік, в інших випадках - один раз на три роки.

Забороняється допуск до роботи працівників, які не пройшли навчання та перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки, охорони праці, а також у разі закінчення терміну дії попередніх періодичних перевірок знань. Комісією з перевірок знань працівникові може бути присвоєна група з електробезпеки, яку він мав до перерви в роботі.

2.18. Позачергову перевірку знань працівнику здійснюють незалежно від терміну проведення попередньої перевірки знань у разі:

- уведення в дію нової редакції або перероблених правил;
- переведення працівника на іншу роботу або призначення на іншу посаду, що потребує додаткових знань;
- при перерві в роботі на даній посаді понад шість місяців;
- незадовільної оцінки знань працівника - у терміни, визначені комісією з перевірки знань, але не раніше ніж через два тижні;
- вимог органів Держенергонагляду та Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду (далі - Держгірпромнагляд).

2.19. Для проведення перевірки знань електротехнічного та електротехнологічного персоналу керівник споживача повинен своїм наказом призначити комісію з перевірки знань.

Головою комісії призначається керівник споживача або його заступник, до службових обов'язків яких входить організація роботи з питань технічної експлуатації електроустановок, охорони праці.

До складу комісії споживача з перевірки знань входять спеціалісти служби охорони праці, представники юридичних, виробничих, технічних служб, представник профспілки або вповноважена найманими працівниками особа з питань охорони праці.

Комісія вважається правочинною, якщо до її складу входять не менше трьох осіб.

У разі потреби створюються комісії в окремих структурних підрозділах, їх очолюють керівники відповідних підрозділів чи їх заступники.

2.20. Перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці проводять:

- 1) в особи, відповідальної за електрогосподарство споживача (головного енергетика), його заступника - комісія за участю керівника

споживача (його заступника) або комісія організації вищого рівня, інспектора Держенергонагляду, Держгірпромнагляду;

2) в осіб, відповідальних за електрогосподарство структурних виробничих підрозділів, - комісія за участю особи, відповідальної за електрогосподарство споживача. Склад комісії затверджує керівник споживача;

3) у решти працівників - комісія споживача або його підрозділів, склад яких визначає та затверджує керівник споживача, за участю особи, відповідальної за електрогосподарство споживача (підрозділу). До складу вказаних комісій, як правило, повинен уходити безпосередній керівник того працівника, чиї знання перевіряє комісія.

Члени комісій структурних підрозділів повинні пройти перевірку знань правил в центральній комісії споживача.

2.21. Споживачі, чисельність яких не дає змоги створити комісію з перевірки знань з питань технології робіт, перевірку знань проходять у комісії територіальних підрозділів Держенергонагляду.

У роботі такої комісії, як правило, бере участь керівник споживача, працівники якого проходять перевірку знань, або представники організацій вищого рівня.

Комісії для перевірки знань з питань технології робіт можуть також створюватись при СНЗ. Вони призначаються наказом (розпорядженням) керівника СНЗ за погодженням з відповідним територіальним підрозділом Держенергонагляду. Члени комісії повинні пройти перевірку знань в територіальному підрозділі Держенергонагляду. Головою комісії призначається старший державний інспектор з енергетичного нагляду.

2.22. Дозволяється проводити окремо перевірку знань, крім випадку, зазначеного в підпункті 1 пункту 5.2.20:

- з питань технічної експлуатації електроустановок, правил та інструкцій з пожежної безпеки за участю інспектора Держенергонагляду;

- з питань охорони праці та інших нормативних актів з охорони праці за участю інспектора Держгірпромнагляду.

У цьому випадку роблять окремі записи в журналі перевірки знань.

Право оперативних переговорів та оперативних перемикань надається особі, відповідальній за оперативну роботу споживача, при проведенні перевірки знань у комісії з перевірки знань за участю інспектора Держенергонагляду. Представник диспетчерської служби структурного підрозділу електропередавальної організації може брати участь у роботі цієї комісії.

2.23. Перевірка знань кожного працівника здійснюється індивідуально. Результати перевірки оформляються протоколом та записуються у журнал установленної форми. Записи оформляються окремо з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці за підписом усіх членів комісії.

Керівники споживачів наприкінці року повинні подавати до інспекції Держенергонагляду графік перевірки знань електротехнічних працівників на наступний рік.

Про дату перевірки знань представники інспекцій повинні бути повідомлені споживачем не пізніше ніж за 20 днів до її початку.

2.24. Споживачі, які не мають можливості проводити навчання безпосередньо у себе та створити комісію з перевірки знань з технології робіт, проходять навчання в навчальних закладах та установах, які отримали відповідне рішення Держенергонагляду на проведення навчання з питань технології робіт. Перевірка знань з технології робіт таких посадових осіб проводиться комісією, створеною Держенергонаглядом.

У роботі такої комісії, як правило, бере участь керівник споживача, працівники якого проходять перевірку знань, або представники організації вищого рівня.

Перевірка знань осіб, відповідальних за електрогосподарство споживачів, незалежно від форм власності та відомчої підпорядкованості, допускається в комісії підприємств вищого рівня або засновників.

2.25. Після успішної перевірки знань працівник допускається до стажування тривалістю 2 - 15 змін і дублювання на робочому місці у відповідності до вимог ГНД 34.12.102-2004.

Допуск оформлюється наказом або розпорядженням керівника споживача (структурного підрозділу) з визначенням тривалості стажувань та призначенням працівника, відповідального за стажування.

2.26. Стажування проводиться під час спеціальної підготовки та під час підготовки на нову посаду. У процесі стажування працівник повинен:

- закріпити знання щодо правил технічної експлуатації електрообладнання, правил безпечної експлуатації технологічного обладнання та пожежної безпеки, технологічних і посадових інструкцій, інструкцій з охорони праці;
- оволодіти навичками орієнтування у виробничих ситуаціях у нормальних і аварійних умовах;
- засвоїти в конкретних умовах технологічні процеси та методи безаварійного керування обладнанням з метою забезпечення вимог технічної експлуатації, безпеки праці та економічної експлуатації устаткування, що обслуговується.

2.27. Керівник споживача або структурного підрозділу може звільняти від стажування працівника, що має стаж за фахом не менше трьох років, що переходить з одного робочого місця на інше, де характер його роботи і тип устаткування, на якому він працюватиме, не змінюються.

Тривалість стажування працівника встановлюється індивідуально в залежності від його рівня професійної освіти, досвіду роботи, професії (посади).

Після закінчення стажування і перевірки знань ремонтні працівники допускаються до самостійної роботи, а оперативні - до дублювання.

Тривалість дублювання на робочому місці встановлюється рішенням комісії з перевірки знань і залежить від кваліфікації працівника та складності обладнання, яке він обслуговуватиме, але не менше шести змін.

2.28. Під час дублювання особа, що навчається, може робити оперативні перемикання або інші роботи в електроустановці тільки з дозволу і під наглядом відповідального працівника, який її навчає.

Відповідальним за правильність дій дублера і дотримання ним нормативних документів та інструкцій є як працівник, який навчає, так і сам дублер.

2.29. На підприємстві під керівництвом особи, відповідальної за електрогосподарство, електротехнічні працівники повинні проходити протиаварійні тренування на робочих місцях і відпрацьовувати способи та прийоми запобігання порушенням у роботі обладнання та швидкої ліквідації несправностей і аварій.

2.30. Керівники спеціалізованих організацій, персонал яких виконує технічне обслуговування і експлуатацію електроустановок споживачів чи проводить у них монтажні, налагоджувальні, ремонтні роботи, випробовування і профілактичні вимірювання за договором, повинні проходити перевірку знань відповідно до вимог цих Правил.

2.31. Навчання та перевірка знань працівників навчальних закладів, які організовують та проводять навчання з використанням електричного обладнання, здійснюється згідно з вимогами цих Правил та нормативних документів, діючих у відповідній галузі.

2.32. Відповідальними за своєчасну перевірку знань в електротехнічних та електротехнологічних працівників є керівники підрозділів споживача, у підпорядкуванні яких перебувають ці працівники.

ДОДАТОК В

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____