

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет) \_\_\_\_\_ ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ Електропостачання та енергоменеджменту \_\_\_\_\_

«До захисту в ЕК»  
Директор інституту  
\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«21» \_\_\_\_\_ лютого \_\_\_\_\_ 2023 р.

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Сергій БАЛЮТА \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«21» \_\_\_\_\_ лютого \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання»  
на тему: «Використання накопичувачів енергії для забезпечення динамічної  
стійкості генератора»

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЕЛ-2-7М

\_\_\_\_\_ Клюшников Павло Вікторович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник Куєвда Юлія Валеріївна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище) (підпис)

Рецензент Валентин ПЕТРЕНКО \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач \_\_\_\_\_

(підпис)

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навчально - науковий інженерно - технічний інститут ім. акад. І. С. Гулого

Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ЕПЕМ**

/Балюта С. М./

**“ 7 ” листопада 2022 р.**

## **ЗАВДАННЯ**

### **НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

### **ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР**

Клюшникову Павлу Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Використання накопичувачів енергії для забезпечення динамічної стійкості генераторів

керівник роботи Куєвда Юлія Валеріївна, к.т.н., доцент кафедри ЕПЕМ

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 7 ” листопада 2022 р. № 794-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 10 лютого 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Аналіз стану питання застосування накопичувачів енергії різного типу протиаварійного управління, Дослідження можливості застосування накопичувачів енергії різного типу для рішення завдання забезпечення динамічної стійкості генератора привеликих збудженнях.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Було проведено загальний аналіз накопичувачів енергії, визначено їх переваги, недоліки та перспективи використання, проаналізовано безліч типів накопичувачів.

5. Перелік графічного матеріалу

10 (слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 07 листопада 2022 р. \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Отримання завдання на магістерську роботу	07.11.2022 р.	Виконано
	Вступ	10.11.2022 р.	Виконано
	Аналіз стану питання застосування накопичувачів енергії різного типу протиаварійного управління	16.12.2022 р.	Виконано
	Дослідження можливості застосування накопичувачів енергії різного типу для рішення завдання забезпечення динамічної стійкості генератора привеликих збудженнях	06.01.2023 р.	Виконано
	Маховиковий накопичувач для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі	28.01.2023 р.	Виконано
	Розробка та дослідження способу застосування групи накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях	29.01.2023 р.	Виконано
	Оформлення пояснювальної записки	01.02.2023 р.	Виконано
	Оформлення презентації до роботи	03.02.2023 р.	Виконано
	Подання готової роботи для перевірки на плагіат	10.02.2023 р.	Виконано

**Здобувач**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Клюшников П.В.**

(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Куєвда Ю.В.**

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Клюшников П.В. Використання накопичувачів енергії для забезпечення динамічної стійкості генератора.

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Національний Університет Харчових Технологій

Київ 2022

У кваліфікаційній роботі на здобуття освітнього ступеня магістра розглянуто питання використання накопичувачів енергії для забезпечення динамічної стійкості генератора. Було проведено загальний аналіз накопичувачів енергії, визначено їх переваги, недоліки та перспективи використання, проаналізовано безліч типів накопичувачів. Розроблено та досліджено систему управління напівпровідниковим перетворювачем накопичувача енергії, яка дозволяє в автоматичному режимі на основі величини скидання потужності генератора. Запропоновано та досліджено спосіб застосування накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного керування при великих збудженнях в енергосистемі, що полягає у використанні групи накопичувачів енергії (ємнісний та маховиковий) з оптимізованими параметрами спільно з розробленою системою управління цією групою накопичувачів енергії. Подальші дослідження доцільно направити на вивчення можливості застосування накопичувачів для забезпечення участі низькоманеврених блоків у вторинному регулюванні частоти шляхом забезпечення нормативних параметрів набору та скидання активної потужності генератора.

Ключові слова: використання накопичувачів енергії, загальний аналіз накопичувачів, система управління напівпровідниковим перетворювачем, енергетичне обстеження, низькоманеврені блоки.

## ANNOTATION

Klyushnikov P.V. Use of energy storage to ensure dynamic stability of the generator.

141 "Electricity, electrical engineering and electromechanics"

National university of food technologies

Kyiv 2022

The qualifying work for obtaining a master's degree is considered the issue of using energy storage to ensure the dynamic stability of the generator. A general analysis of energy storage devices was carried out, their advantages, disadvantages and perspectives of use were determined, many types of storage devices were analyzed. A control system for the semiconductor converter of the energy storage device has been developed and investigated, which allows automatic mode based on the amount of generator power reset. A method of using energy storage devices to increase the efficiency of emergency control in case of large excitations in the power system is proposed and investigated, which consists in using a group of energy storage devices (capacitive and flywheel) with optimized parameters together with a developed control system for this group of energy storage devices. It is advisable to direct further research to study the possibility of using storage devices to ensure the participation of low maneuverability units in secondary frequency regulation by ensuring regulatory parameters of the set and resetting of the active power of the generator.

Key words: use of energy storage devices, general analysis of storage devices, semiconductor converter control system, energy survey, low maneuverability units.

# Зміст

Вступ.....	8
1. Аналіз стану питання застосування накопичувачів енергії різного типу протиаварійного управління.....	10
1.1. Деякі положення про забезпечення динамічної стійкості у конкретних умовах.....	10
1.2. Існуючі методи і засоби забезпечення стійкості.....	13
1.3. Застосування накопичувачів енергії з метою забезпечення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі.....	17
2. Дослідження можливості застосування накопичувачів енергії різного типу для рішення завдання забезпечення динамічної стійкості генератора при великих збудженнях.....	25
2.1. Пропозиції по застосування накопичувачів енергії як засоби підвищення динамічної стійкості.....	25
2.2. Визначення схеми підключення накопичувача енергії в мережу.....	27
2.3. Структурна схема моделі енергосистеми з накопичувачем енергії.....	35
2.4. Модель генератора.....	38
3. Маховиковий накопичувач для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі.....	41
3.1. Вибір оптимального типу накопичувача енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях.....	41
3.2. Загальні відомості про параметри маховикового накопичувача.....	42
3.3. Структурна схема моделі енергосистеми з маховиковим накопичувачем.....	46
4. Розробка та дослідження способу застосування групи накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях.....	48
4.1. Спосіб застосування групи накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі.....	48

4.2. Вибір типів накопичувачів енергії для використання у складі групи для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях.....	48
4.3. Розробка рекомендацій по застосуванню накопичувачів енергії .....	53
5. Висновок.....	54
6. Список літератури.....	57

# Вступ

## *Актуальність теми дослідження*

Сучасні тенденції розвитку електроенергетичних систем пов'язані з широкомасштабним впровадженням нових технологій, таких як розподілена генерація на базі відновлюваних джерел енергії (сонячні електростанції, вітрогенератори та ін.), керовані (гнучкі) системи передачі змінного струму, що сприяє запровадженню нових генеруючих потужностей та зниженню екологічного навантаження на довкілля від енергетики, появі нових способів регулювання потоків потужності в енергосистемі. В той же час, впровадження зазначених технологій суттєво впливає на зміну динамічних характеристик енергосистеми та потребує їх вивчення та обліку в алгоритмах роботи систем автоматичного управління (САУ) об'єктами мережі в режимі реального часу. До таких САУ відноситься система протиаварійної автоматики, одним із завдань якої є забезпечення динамічної стійкості генеруючого обладнання при великих збудженнях. Найбільш небезпечним великим збудженням, що може призвести до порушення динамічної стійкості, є коротке замикання.

Існуючі методи забезпечення динамічної стійкості при великих збудженнях пов'язані з необхідністю зміни режиму роботи турбіни енергоблоку. Особливість даних методів полягає в тому, що потужність турбіни неможливо змінити миттєво через необхідність забезпечення нормативних параметрів технологічного процесу, що підвищує час введення керуючого впливу. Ця особливість у ряді випадків призводить до необхідності застосування такого небажаного виду впливу, як відключення генеруючого обладнання для забезпечення динамічної стійкості.

В останні роки активно проводяться дослідження у сфері застосування накопичувачів енергії у різних галузях електроенергетики. Сучасні накопичувачі енергії мають важливу властивість – можливість практично миттєво змінювати потужність видачі чи споживання енергії. Отже, залучення накопичувачів енергії для завдання забезпечення динамічної стійкості синхронного генератора електростанції у складі енергосистеми (далі за текстом – генератор) дозволить реалізувати практично безінерційний вплив на зміну потужності накопичувача

енергії, що призводить до поліпшення умов забезпечення динамічної стійкості та можливості збереження динамічної стійкості без необхідності відключення генеруючого обладнання.

Таким чином, розробка способів застосування сучасних засобів, таких як накопичувачі енергії різного типу, для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях з урахуванням особливостей сучасних енергосистем є важливим та актуальним завданням.

# **1. Аналіз стану питання застосування накопичувачів енергії різного типу для протиаварійного управління**

У цьому розділі наводяться деякі положення про динамічну стійкість необхідні аналізу існуючих методів збереження динамічної стійкості; порівнюються різні способи забезпечення динамічної стійкості; наводиться порівняння різних типів накопичувачів енергії, які можуть використовуватись при забезпеченні динамічної стійкості.

## **1.1. Деякі положення про забезпеченні динамічної стійкості в конкретних умовах**

Динамічна стійкість – це здатність системи відновлювати після великого збудження вихідний (стійкий) стан чи стан, майже близький до вихідного (допустимого за умовами експлуатації системи). При цьому під «великим збудження» розуміють таке збудження, вплив якого на характер поведінки системи істотно залежить від часу існування, значення та місця появи впливу, що збудження[1]. Важливо, що стійкий стан системи характеризується синхронною паралельною роботою генераторів[2].

Динамічна стійкість окремого генератора оцінюється з точки зору збереження режиму видачі потужності в мережу (без порушення синхронізму) у разі раптових, значних змін у ланцюзі електропередачі. Одним з найсерйозніших порушень встановленого режиму синхронного генераторає коротке замикання[3] .

Для описи перехідних процесів, виникаючих в результаті зміни параметрів енергосистеми, що використовується рівняння руху ротора генератора :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_G = \Delta M, \quad (1.1)$$

де  $M_T$  – крутний момент на валу енергетичного двигуна (турбіни),  $M_G$  - момент опору (гальмівний момент, електромагнітний момент) на валу генератора;  $\omega$  – кутова частота обертання валу агрегату;  $J$  – сумарний момент інерції енергетичного двигуна (турбіни) і генератора;  $\Delta M$  - небаланс моментів.

Рівняння (1.1) також називається рівнянням динамічної рівноваги, т.к. при рівності моментів кутова частота обертання ротора генератора не змінюється (Тобто. генератор знаходиться в стані рівноваги) .

Електромагнітний момент у загальному випадку визначається за такою формулою :

$$M_r = \frac{mUE_q}{\omega_1 x_d} \sin(\theta) + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(2\theta), \quad (1.2)$$

де  $m$  - число полюсів статора генератора;  $U$  - напруга на шинах генератора;  $E_q$  - ЕРС генератора;  $\omega_1$  - кутова частота обертання генератора;  $x_d$ ,  $x_q$  - операторні опору синхронною машини відповідно по поздовжній і поперечній осям;  $\theta$  - кут навантаження генератора (кут між вектором ЕРС статора і напругою).

Важливо відзначити, що чисельне значення електромагнітного моменту синхронного генератора визначається енергією, розсіюється на активному опорі обмотки статора генератора і в зовнішньому опорі ланцюга, тобто момент є функцією активною складника струму статора[4] .

Вираз записано для полюсного синхронного генератора, далі для спрощення міркувань буде розглядатися неявно полюсний синхронний генератор, у якого індуктивні опори по поздовжній та поперечній осям рівні, відповідно другий доданок для виразу електромагнітного моменту (називаємо також реактивним моментом) тобто:

$$M_r = \frac{mUE_q}{\omega_1 x_d} \sin(\theta), \quad (1.3)$$

де  $m$  - число полюсів статора генератора;  $U$  - напруга на шинах генератора;  $E_q$  - ЕРС генератора;  $\omega_1$  - кутова частота обертання генератора;  $x_d$ ,  $x_q$  - операторні опору синхронною машини відповідно по поздовжній і поперечній осям;  $\theta$  - кут навантаження генератора (кут між вектором ЕРС статора і напругою).

Розглянемо зміну величини електромагнітного моменту генератора при виникненні раптового короткого замикання[5].

1) При короткому замиканні змінюється характер струму статора: якщо в

навантажувальному режимі, що характеризується номінальним коефіцієнтом потужності генератора  $0.8 \dots 0.9$ , переважає активна складова току статора, то в режимі короткого замикання в залежності від місця, типу короткого замикання і значення перехідного опору, активна складова зменшується аж до нуля (тобто струм короткого замикання має переважно індуктивний характер). Причому активна складова струму статора зменшується чим сильніше, чим менше опір до крапки короткого замикання і чим менше значення перехідного опору. Зменшення активною складника струму знижує кут навантаження  $\theta$ , що наводить до зниження електромагнітного моменту.

- 2) При короткому замиканні також знижується напруга на шинах генератора, що, аналогічно пункту 1), зменшує електромагнітний момент). Рівень зниження напруги також залежить від типу, місця короткого замикання і значення перехідного опору.

Таким чином, режим короткого замикання характеризується зменшенням електромагнітного моменту генератора. При цьому, в зв'язку з тим, що момент турбіни залишається незмінним, порушується баланс моментів, що наводить до неконтрольованого збільшення швидкості генератора – тобто. вихід генератора з синхронізму. У зв'язку з небезпекою роботи в асинхронному режимі без втрати збудження як генератора (через виникнення локальних перегрівів, неприпустимих асинхронних моментів, великих зрівняльних струмів), так і самої енергосистеми, асинхронний режим в енергосистемі неприпустимо [6]. .

## 1.2. Існуючі методи і засоби забезпечення стійкості

В даний час завдання збереження стійкості енергосистеми (у тому числі динамічною) покладається на автоматику запобігання порушення стійкості (АЗПС). АЗПС призначена для запобігання порушення стійкості паралельної роботи електростанцій, енергосистем, стійкості вузлів рухового навантаження при аварійних збудженнях і забезпечення в післяаварійних режимах нормативних запасів стійкості. АЗПС здійснює контроль режиму району управління, фіксацію збуджень, вибірі реалізацію керуючих впливів[7]. .

При роботі АЗПС формує і реалізує наступні керуючі впливи:

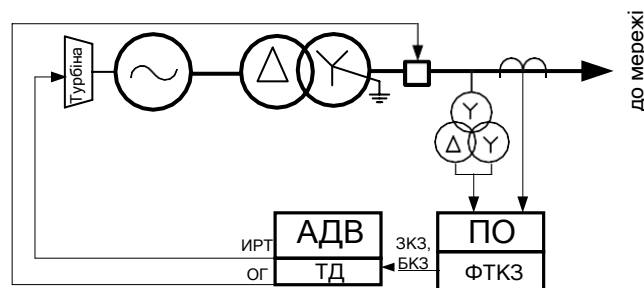
- 1) короткочасна розвантаження турбіни;
- 2) тривала розвантаження турбіни;
- 3) відключення генераторів;
- 4) відключення навантаження споживачів електричної енергії;
- 5) форсування збудження генераторів;
- 6) поділ енергосистеми на несинхронно працюючі частини;
- 7) автоматична завантаження генераторів;
- 8) електричне гальмування;
- 9) зміна топології електричної мережі;
- 10) зміна режимів роботи та експлуатаційного стану керованих елементів електричної мережі.

Для збереження динамічної стійкості застосовуються керуючі впливу 1), 3), 5), 8) .

Структурна схема АЗПС в частини запобігання порушення динамічної стійкості (раніше в літературі дана функція виділялася у вигляді окремої автоматики - автоматики розвантаження при близьких або зтяжних коротких замикання - АРБКЗ, АРЗКЗ).

Пусковий орган (ПО), виявляє інтенсивність збудження - пристрій фіксації тяжкості короткого замикання (ФТКЗ) - підключається до ланцюгам змінного струму та напруги контрольованого генератора. Залежно від виконання, пусковий орган контролює або скидає активну потужності блоку, або глибину зниження напруги прямої послідовності на шинах станції

і формує відповідний сигнал спрацьовування («зтяжне короткй замикання (ЗКЗ)», «Блиьке короткй замикання (БКЗ)»). Вказані сигнали передаються в автоматику дозування впливів (АДВ), яка на основі закладеної таблиці дозування (ТД) формує потрібне керуюче вплив[8]..



(Рис 1.1) Структурна схема АЗПС в частини збереження динамічної стійкості. АДВ - автоматика дозування впливів, ПО - пусковий орган, ТД - таблиця дозування, ФТКЗ - автоматика фіксації тяжкості короткого замикання, ИРТ - імпульсна розвантаження турбіни, ОГ – відключення генератора, ЗКЗ – зтяжне коротке замикання; БКЗ – близьке короткезамикання.

Далі розглянуті застосовувані керуючі впливу і дані деякі зауваження щодо їх ефективності.

### **Короткочасне розвантаження турбіни**

Короткочасне розвантаження турбіни як засіб протиаварійного управління застосовується з метою компенсації надлишкової кінетичної енергії, придбаной за час короткого замикання та безструмової паузи автоматики повторного включення лінії. Таким чином, розвантаження застосовується для

зниження небалансу моментів по виразу шляхом зниження моменту турбіни  $M_T$ .

Короткочасне розвантаження турбіни з метою збереження динамічної стійкості виконується тільки для теплових турбін; короткочасне розвантаження гідротурбін, незважаючи на деякі пропозиції в цій галузі, через недостатню швидкодію системи регулювання, на практиці практично не застосовується[9]..

Основний недолік імпульсної розвантаження полягає в тому, що для отримання достатньою швидкості розвантаження доводиться мати надмірну розвантаження. Надмірна розвантаження наводить до значному збільшенню амплітуди коливань взаємного кута в післяаварійному режимі, крім того існує небезпека перегальмування та втрати стійкості на другому циклі синхронних коливань[10]..

### **Вимкнення генераторів**

Вимкнення генератора застосовується як засіб збереження динамічної стійкості в випадку відсутності, неможливості або неефективності використання інших, більше сприятливих видів впливу .

Ефективність відключення генератора полягає в двох основних факторів: зменшення небалансу моментів еквівалентного генератора (Тобто. математичного еквівалента прискорюється частини енергосистеми) і зниження постійною інерції еквівалентного генератора[11]. .

До недоліків відключення генератора як засоби збереження динамічної стійкості можна віднести наступні:

- відключення гідрогенератора призводить до підвищених навантажень на підп'ятник і обмотку збудження, що негативно дається ознаки на термініслужби обладнання ;
- включення відключеного турбогенератора можливо тільки через 0.5-3 години , що знижує економічну ефективність генерації

енергії, для атомних станцій час включення відключеного генератора досягає кількох десятків годин;

- ефективність відключення генератора безпосередньо залежить від часу відключення (при збільшенні часу відключення ефективність керуючого впливу падає аж до відсутності впливу стійкість), а також від віддаленості точки короткого замикання;
- відключення генератора призводить до зниження реактивної генерації потужності у післяаварійному режимі, що може призвести до зниження пропускної можливості зв'язків .

### **Форсування збудження**

Форсування збудження призначена для збереження стійкості паралельною роботи генератора при короткому замиканні в прилеглої мережі. Форсування збільшує ЕРС генератора, що наводить до збільшення значення електромагнітного моменту і зниження небалансу моментів[12]..

Форсування збудження є високоефективним засобом підвищення динамічної стійкості, однак має обмеження по максимальному (стельовому) значенням струму і напруги збудження (кратності форсування) та обмежена по тривалості .

У справжнє час форсування збудження є функцією автоматичного регулятора збудження сильного дії і в загальному випадку реалізація даного управління впливу від пристрої автоматики запобігання порушення стійкості не потрібно.

### **Електричне гальмування**

Під електричним гальмуванням розуміється цілеспрямоване підключення навантажувальних (гальмівних) опорів або зміна параметрів схеми системи, наприклад, опорів деяких задалегідь обраних елементів схеми, що впливають на зміну навантаження генераторів[13]..

Електричне гальмування дозволяє збільшити електромагнітний момент за рахунок підключення до генератору додаткового навантаження, тобто. збільшує активну складову струму статора цьому відповідає збільшення кута навантаження генератора  $\theta$  ).

Незважаючи на високу ефективність, електричне гальмування поки не набуло широкого поширення (пристрою електричного гальмування в свого часу було встановлено на Зейській, Бурейській та Братській ГЕС, ГЕС Чиф Джозеф (США)). Широкому поширенню електричного гальмування, мабуть, перешкоджають такі причини: можливість перегальмування через дискретність набірних опорів, необхідність виготовлення спеціального комутаційного апарату[14] .

### **1.3. Застосування накопичувачів енергії з метою забезпечення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі**

Очевидно, що у зв'язку з швидкоплинністю протікання процесу при великих збудження (а саме процесу короткого замикання, до 1 з ), а також в зв'язку з необхідністю швидкого зниження небалансу моментів) для запобігання виходу з синхронізму контрольованого генератора, до накопичувачам енергії, використовуваним для підтримки динамічної стійкості, пред'являється, насамперед, вимога щодо швидкодії – видача високої потужності за короткий період часу[15].

За характеристиками швидкодії накопичувачів енергії різного типу. Можна визначити типи накопичувачів енергії, які можуть бути використані для підвищення ефективності протиаварійного управління в умовах необхідності запобігання порушення динамічної стійкості, а саме: надпровідникові індуктивні накопичувачі (НПІН), маховикові (кінетичні) накопичувачі, суперконденсатори (ємнісні) накопичувачі та акумуляторні батареї великої потужності (електрохімічні накопичувачі).

### *Застосування НППН в сучасній електроенергетиці*

Надпровідникові індуктивні накопичувачі енергії запасають енергію в магнітному полі індуктивної котушки з надпровідника, утвореному протіканням постійного струму.

У Німеччині в Мюнхенському технічному університеті з 1992 р. проводились експериментальні дослідження функціонування НППН при різних способах його застосування. Для цього було розроблено пілотний проект НППН енергоємністю порядку 1,4 МДж.

У Іспанії з 1993 м. проводяться експерименти по різних схемам тиристорних перетворювачів, оцінки теплових втрат, а також по режимам роботи НППН у енергосистемі . Для цих цілей здійснювався проект АМАС 500 по створенню НППН енергоємністю 1 МДж з максимально видається потужністю 500 кВт. У рамках даного проекту був створено експериментальний НППН енергоємністю 25 кДж з максимально видається потужністю 50 кВт .Спільна розробка фірми «Babcock&Wilcox» та Анкоріджської енергокомпанії «Municipal Light and Power» накопичувача енергії енергоємністю 1800 МДж з максимально видається потужністю 40 МВт є самим великим з реалізованих в рамках застосування в електроенергетичної системі проектів НППН . Вказаний накопичувач призначений для підтримки

нормального рівня частоти, регулювання напруги, регулювання видачі потужності генератора, демпфування коливань потужності високовольтної лінії.

В Японії з 1988 р. ведуться розробки застосування надпровідності електроенергетичних системах. При цьому приділяється велика увага тільки створенню НППН, але і різним способам їх застосування. Відомий проект підключення НППН до обмотці збудження генератора, що сприяє зменшенню енергії і потужності накопичувача енергії при демпфування коливань ротора генератора

Велике увага було приділено накопичувачам енергії, що дозволяє швидко змінювати розподіл потужності. Ці накопичувачі енергії характеризує менше кількість запасається енергії. У 1983 м. в Лос-Аламоській лабораторії був створено накопичувач енергії енергоємністю 30 МДж з максимально видається потужністю 10 МВт. Він був встановлений на підстанції Такома для демпфування вагань частотою 0,35 Гц.

У сучасних публікаціях НППН розглядається переважно для компенсації як короткочасних, і тривалих просадок напруги; розглядається застосування в складі системи автоматичного управління генераторами; для стабілізації видачі потужності від вітрогенераторів[16].

Огляд існуючих робіт і впроваджень в області розробки і застосування НППН дозволяють зробити такі висновки:

- 1) на даний час у технічній літературі не розглядається питання застосування НППН для забезпечення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі;
- 2) попередня оцінка параметрів розроблених і перспективних СПН дозволяють розглядати СПН як засіб підвищення динамічної стійкості генератора.

## *Застосування маховикових накопичувачів в сучасній енергетиці*

Маховикові накопичувачі запасують кінетичну енергію при розгоні ротора, щоб віддати її у потрібний момент у вигляді електроенергії. В якості розгінного двигуна і засоби відбору електроенергії зазвичай використовується вертикальний двигун-генератор[17].

Сучасні маховикові накопичувачі є барабаном, виготовлений із композитних матеріалів, наприклад, намотаний із тонких витків сталевий, пластичної стрічки, скловолокна або вуглецевих композитів (Автор ідеї - радянський вчений Гуліа Н.В. [18]). За рахунок цього забезпечується висока міцність на розрив. Для зменшення втрат на тертя маховик міститься у вакуумованій кожух. Найчастіше використовується магнітне підвіс. Один із лідерів у створенні маховикових накопичувачів – компанія Unerco – розробила накопичувачі типу KESS. Ротор маховика зі скловуглецевої композиції довжиною 900 мм та діаметром 330 мм має масу 110 кг. Ротор покритий магнітним композитом, намагніченим з утворенням полюсів двигун-генератора. Ротор обертається у вакуумі на магнітних підшипниках із частотою близько 40 тис. об/хв. Робоча частота цього накопичувача енергії – 630 Гц. Накопичувач KESS видає 11 МДж енергії, час віддачі з повною потужністю 44 с. Розрахунковий термін служби - 20 років або 10 млн циклів розряду. Накопичувачі можуть з'єднуватися групи загальною потужністю до 2,4 МВт [19, 20]. Успішним прикладом застосування маховикової системи як засоби впливу на режим мережі є накопичувальна встановлення ROTES, розроблена компанією Toshiba. Система представляє собою вертикальний двигун-генератор потужністю 26.5 МВА з маховиком на валу. Маховий момент  $GD^2$  системи -  $710 \text{ тм}^2$ . Установка ROTES працює з 1996 р. в ізолюваній енергосистемі острови Окінава і суттєво знижує коливання частоти в системі при роботі електрочечей (ваганя) навантаження порядку 30 МВт при повному

споживанні острова 400-1200 МВт). Особливістю установки ROTES є застосування для двигун-генератора машини з подвійним харчуванням, що дозволяє регулювати частоту її обертання і тим самим поглинати або віддавати накопичену в махових масах енергію в мережа[21].

У сучасних публікаціях маховиковий накопичувач розглядається переважно як засіб вирівнювання графіків навантаження ; для зниження вагань активною потужності і напруги, вироблюваної вітрогенераторами; для забезпечення швидкого заряджання електротранспорту; локалізації наслідків коротких замикання на передачах постійного струму високої напруги, що застосовуються для видачі потужності в мережу від морських вітростанцій.

Огляд існуючих робіт і впроваджень в області розробки і застосування маховикових накопичувачів дозволяють зробити наступні висновки:

- 1) на даний час у технічній літературі не розглядається питання застосування маховикових накопичувачів для цілей протиаварійного управління при великих збудження в енергосистемі;
- 2) попередня оцінка параметрів розроблених і перспективних маховикових накопичувачів дозволяють розглядати їх в якості засоби підвищення динамічної стійкості генератора.

### ***Застосування суперконденсаторів в сучасній енергетиці***

Суперконденсатори - удосконалені конденсатори, працюючі на постійному напрузі і мають дуже високу щільність заряду завдяки вибору конструкції та обробки матеріалу електродів. Велика ємність таких конденсаторів (порядку кількох фарад) дозволяє накопичувати значну енергію, що віддається у потрібний момент у вигляді великих струмів. Термін служби у таких конденсаторів багато вище, чим у звичайних[22] .

Суперконденсатори відносяться до розряду накопичувачів короткого часу таконкурують з маховиками і СПН, однак більше компактні і прості .

Двошарові конденсатори корпорації Meidensha типу EDLC використовуються в установці для покриття провалів напруги, 70 осередків по 4.5 Ф на напруга 160 V дозволяють гасити провали тривалістю 1 с на напрузі 6600 В при навантаженні 10 МВА.

Основні розробки ОІВТ РАН в області застосування суперконденсаторів впроваджує в промислове виробництво спільно з провідним виробником набірних суперконденсаторів у Росії ЗАТ «НВО «ТехноКор». Ця фірма виробляє набірні суперконденсатори з номінальним напругою від 12 до 420 В, ємністю від 0.1 до 500 Ф, запасеною енергією від 5 до 150 кДж, потужністю імпульсного розряду до 100 кВт при струмі розряду до 5000 А і що зберігають свої Характеристики при практично необмеженому кількості циклів заряд-розряд[23] .

У сучасних публікаціях суперконденсатор розглядається як засіб запасення енергії в складі енергетичної установки автономного транспортного засоби для підвищення ефективності функціонування систем тягового електроприводу; як засіб стабілізації видачі потужності від сонячних електростанцій; для згладжування різко змінного графіка видачі потужності від приливних електростанцій; для винятки відключення морської вітроелектростанції від мережі при зниженні напруги внаслідок короткого замикання[24] .

Огляд існуючих робіт і впроваджень в області розробки і застосування суперконденсаторів дозволяють зробити наступні висновки:

- 1) на даний час у технічній літературі не розглядається питання застосування суперконденсаторів для цілей протиаварійного управління при великих збудження в енергосистемі;
- 2) попередня оцінка параметрів розроблених і перспективних суперконденсаторів дозволяють розглядати їх в якості засоби підвищення динамічної стійкості генератора.

## *Застосування акумуляторних батарей великої потужності в сучасній енергетиці*

Акумуляторна батарея - два або більше акумуляторів (елементів), з'єднаних між собою і використовуваних як джерело електричної енергії.

В даний час в енергетиці застосовують переважно такі види батарей: свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, літій-іонні.

В даний час акумуляторні батареї великої потужності активно застосовуються на об'єктах у системах енергопостачання великих міст:

- запуск електростанції «з нуля» після її раптового виходу з роботи через аварії в мережі (зупинка турбін);
- зняття перевантажень розподільчою мережі при проходженні максимумів навантаження;
- в виробництвах, чутливих не тільки до тривалим порушенням електропостачання, але і до короткочасним;
- для запобігання лавини напруги в районах з великим зосередженням синхронною рухової навантаження.

У Фербенксе (Аляска, США) встановлена одна з найбільш великих акумуляторних установок - потужністю до 46 МВт - для забезпечення безперервності живлення мережі[25] .

У сучасних публікаціях акумуляторні батареї великої потужності розглядають переважно як накопичувач енергії для згладжування вагань потужності генерації сонячної генерації , для зниження коливань потужності в мережі, для керування перетіканнями в мережі .

Огляд існуючих робіт і впроваджень в області розробки і застосування акумуляторних батарей великої потужності дозволяють зробити наступні висновки :

- 1) на даний час у технічній літературі не розглядається питання застосування акумуляторних батарей великої потужності для цілей протиаварійного управління;
- 2) попередня оцінка параметрів розроблених і перспективних акумуляторних батарей великої потужності дозволяють розглядати їх в якості засоби підвищення динамічної стійкості генератора.

## **2. Дослідження можливості застосування накопичувачів енергії різного типу для рішення завдання забезпечення динамічної стійкості генератора при великих збудженнях**

У рамках даної глави досліджується способи підключення накопичувача енергії до мережі, розробляється і досліджується система управління напівпровідниковим перетворювачем накопичувача енергії, формується модель енергосистеми з накопичувачем енергії, розраховуються параметри накопичувачів енергії і проводяться дослідження на розроблену моделі можливості застосування накопичувачів різного типу для забезпечення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі[26].

### **2.1. Пропозиції щодо застосування накопичувачів енергії як засобу підвищення динамічної стійкості**

У зв'язку з тим, що в справжнє час все більше поширення во всіх сферах електроенергетики отримують різні типи накопичувачів енергії, а також з обліком обмежень застосовуваних керуючих впливів, в рамках даної роботи пропонується для підвищення ефективності протиаварійного управління замінити частину застосовуваних на даний час керуючих впливів для збереження динамічної стійкості від автоматики запобігання порушенню стійкості на впливи на накопичувачі енергії. З обліком даної пропозиції, структурна схема протиаварійної автоматики в частини АПНУ, працюючою спільно з накопичувачем (або групою накопичувачів) енергії[27].

Для того, щоб накопичувач енергії забезпечував обмін енергії із зовнішньої мережею, він повинен включати в себе по крайньої міри два блоки:

- пристрій управління (УУ) потоком енергії, регулює і перетворює енергію одного роду в інший в відповідно з законом зміни потужності;



- 3) підвищення терміну служби комутаційного обладнання через зниження числа аварійних відключень;
- 4) запобігання можливих обмежень зі сторони регулюючих органів на максимальну завантаження генераторів станції через неможливості забезпечення динамічної стійкості при нормативні збурення.

Стоїть відзначити, що накопичувачі можуть бути використані також і для забезпечення необхідних коефіцієнтів запасу стійкості в нормальних і післяаварійних режимах, проте це питання вимагає окремого опрацювання та в даній роботі не розглядається[29].

Для підвищення надійності розроблюваного рішення керуюче вплив на відключення генератора пропонується не виключати повністю з контуру протиаварійної автоматики, задіявши даний тип впливу як резервний у разі відмови розроблюваної системи управління чи аварій в схемою видачі потужності накопичувача енергії.

## **2.2. Визначення схеми підключення накопичувача енергії в мережу**

За результатами глави 1, розглянути прийняті наступні типи накопичувачів енергії:

- 1) надпровідниковий індуктивний накопичувач;
- 2) ємнісний накопичувач енергії на базі суперконденсатора;
- 3) акумуляторний накопичувач на базі батарей великої потужності;
- 4) маховиковий накопичувач.

Застосування накопичувача енергії в складі електроенергетичної мережі має на увазі під собою необхідність обміну енергією між накопичувачем і мережею. Оскільки конструкція типів накопичувачів, що розглядаються, не дозволяє організувати безпосередній обмін енергією (Потужністю) з трифазний енергетичної системою, в системах накопичення енергії передбачаються перетворювачі. Для накопичувачів енергії, здійснюють безпосереднє накопичення електричної енергії (увигляді зарядів для ємнісного накопичувача, в вигляді хімічної реакції для акумуляторних батарей, в магнітному полі для СПН),

потрібно перетворення постійного струму, що знімається з накопичувача енергії, в трифазний змінний струм і навпаки. Для маховикового накопичувача енергії, здійснюючого накопичення енергії во обертається тілі, необхідний електромашинний перетворювач. При цьому, у разі використання як електромашинного перетворювача машин постійного струму, також необхідний перетворювач з постійного струму в змінний трифазний і навпаки[30].

Також, враховуючи поставлену завдання (а саме забезпечення динамічної стійкості генератора), необхідно забезпечити незалежне регулювання обміну активною потужністю. Додатково бажано забезпечити також регулювання реактивною потужності (роздільно від активної), т.к. реактивна потужність опосередковано через рівень напруги впливає на динамічну стійкість як окремого генератора, так і всією станції.

Для уніфікації, а також для забезпечення однакових умов порівняння накопичувачів різного типу, всі типи накопичувачів підключаються до мережі через оборотний перетворювач (випрямляч – інвертор).

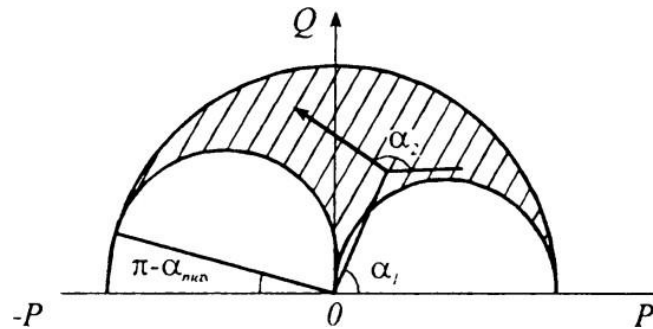
У справжнє час найбільше поширення отримали оборотні перетворювачі на базі силових напівпровідникових вентилів, які, в залежно від кутів керування, дозволяють працювати перетворювачу в режимі випрямляча чи інвертора. Для підключення накопичувача до трифазної мережі, відповідно, необхідний трьох- або більше фазний перетворювач.

Однак схеми з'єднання, що найчастіше застосовуються в даний час напівпровідникових вентилів (мостова схема та ін.) не дозволяють здійснювати роздільне регулювання активною і реактивною потужностей.

У зв'язку з цим, в рамках даної роботи розглядаються схеми напівпровідникових перетворювачів, які дозволяють здійснювати двопараметричне (роздільне) управління потужністю, що протікає через перетворювач. [31]

Так як двопараметричне управління має на увазі наявність двох параметрів з можливістю їх незалежного зміни, напівпровідниковий перетворювач повинен забезпечувати роздільне управління окремими напівпровідниковими вентилями (або групами вентилів).

В результаті, двопараметричне управління, з урахуванням вищезазначених вимог повинно задовольняти кутовий діаграмі, наведеною на малюнку



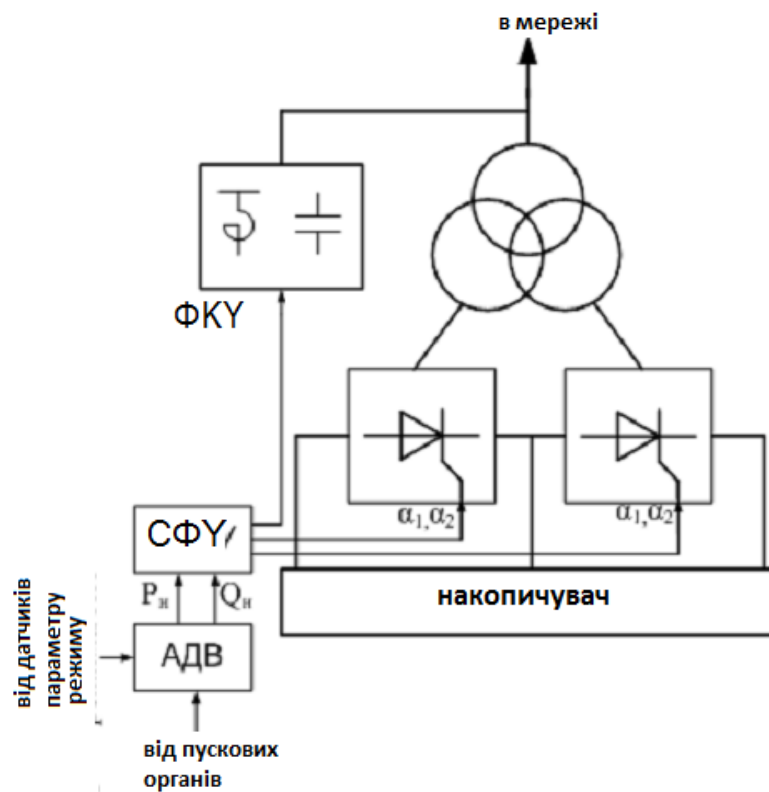
(Рис 2.2) Кутова діаграма двопараметричного керування.  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути управління напівпровідниковими вентилями (або групою напівпровідникових вентилів);  $P, Q$  – відповідно споживана активна і реактивна потужність накопичувача

Область допустимих значень споживання і видачі активною і реактивною потужності перетворювача визначається заштрихованою областю на малюнку .

У зв'язку з викладеним вище, структурна схема підключення накопичувача з перетворювачем до мережі повинна мати вигляд[32].

Для реалізації двопараметричного управління видається і споживаною потужністю існує кілька схем, наприклад: шестифазна схема з нульовим висновком з зрівняльним реактором, бруківка схема і ін.

на даному етапі стоїть відзначити наступну особливість роботи накопичувачів енергії: для суперконденсатора, акумуляторних батарей великий потужності, маховикового накопичувача з електромашинним приводом необхідно застосовувати схему напівпровідникового перетворювача, що працює в режимі джерела напруги, тоді як для СПН необхідно застосовувати схему перетворювача, працюючого в режимі джерела струму, по наступним причин[33].



(Рис 2.3) Структурна схема підключення накопичувача до мережі. ФКУ – фільтрокомпенсуючий пристрій; СФУ – система фазового управління; АДВ – автоматика дозування впливів,  $P_n$ ,  $Q_n$  - задається значення потужності через перетворювач,  $\alpha_1, \alpha_2$  - кути управління напівпровідниковим перетворювачем.

Для індуктивних накопичувачів (такі як СПН) для переведення з режиму накопичення в режим видачі енергії (Тобто. з режиму випрямляча в режим інвертора) необхідно змінити напрямки струму в накопичувачі без необхідності зміни полярності напруги. У цьому випадку схема напівпровідникового перетворювача працює в режимі джерела струму. Такий перетворювач формує в точці підключення струм заданою амплітуди і фази. Для реалізації даної схеми можливо застосування одного трифазного напівпровідникового перетворювача. Але, для покращення гармонійного складу мережевого струму, рекомендується підключати накопичувач через дві групи перетворювачів до двох вторинних обмоток силового трансформатора, одна з яких з'єднана у зірку, а інша – у трикутник. [34] Таке підключення забезпечує зрушення  $30^\circ$  в одному з плечей перетворювача, таким чином,

забезпечується дванадцятифазна пульсація струму замість шестифазний (для схемиз одним перетворювачем).

Схема підключення накопичувача енергії з напівпровідниковим перетворювачем за схемою джерела струму.

Для решта групи накопичувачів - конденсаторних накопичувачів (акумуляторних батарей великої потужності, суперконденсаторів, маховикових накопичувачів з електромашинним приводом) крім зміни напрямки протікання струму через накопичувач, для переведення в режим видачі енергії необхідно також змінити полярність напруги. Такий режим роботи напівпровідникового перетворювача називається режимом джерела напруги.

Один трифазний перетворювач через свою схему не може забезпечити зміну полярності напруги на затискачі накопичувача. Для вирішення цієї проблеми застосовують дві групи перетворювачів, з'єднаних послідовно друг з другом, причому накопичувач енергії підключається паралельно в розсічення між групами перетворювачів. Одна з груп перетворювачів у разі працює у режимі випрямляча, а друга – в режимі інвертор. При зміні кутів управління групами перетворювачами змінюється «вплив» кожного з перетворювачів, таким чином досягається реверс полярності напруги на затисках накопичувача[35].

У загальному випадку виділяють два типи управління накопичувачами - фазове та імпульсне. Незважаючи на те, що існують роботи, в яких описується двопараметричне імпульсне керування надпровідниковим накопичувачем, в даній роботі розглядається фазове, т.к. такий вигляд управління дозволяє уніфікувати схему управління перетворювачем, працюючим як режимі джерела струму, і джерела напруги. Однак, до недоліків даного типу управління стоїть віднести неможливість роботи перетворювача в режимі видачі реактивною потужності.

Управління двома групами перетворювачів для забезпечення можливості зміни полярності напруги можливо двома способами: узгоджене і роздільне керування.

Під роздільним управлінням мається на увазі подання різних кутів управління на різні групи перетворювачів. При цьому, управління припускає замикання непрацюючою групи вентилів при відсутності зрівняльного струму. Таке управління вимагає системи контролю стану вентиля для винятки подачі одночасних імпульсів на аналогічні вентиля двох груп перетворювачів (для виключення короткого замикання). Крім того, таке управління не дозволяє швидко перевести перетворювач з режиму випрямляча в режим інвертора[36] .

Узгоджене управління має на увазі під собою подачу узгоджених кутів управління на відповідні перетворювачі згідно Закону:

$$\begin{aligned}\alpha'_1 &= 180 - \alpha_1; \\ \alpha'_2 &= 180 - \alpha_2;\end{aligned}\tag{2.1}$$

де  $\alpha_1$  ,  $\alpha_2$  - кути управління фазними і буферними вентилями першого напівпровідникового перетворювача відповідно,  $\alpha'_1$  ,  $\alpha'_2$  - Кути управління фазними та буферними вентилями другого напівпровідникового перетворювача відповідно.

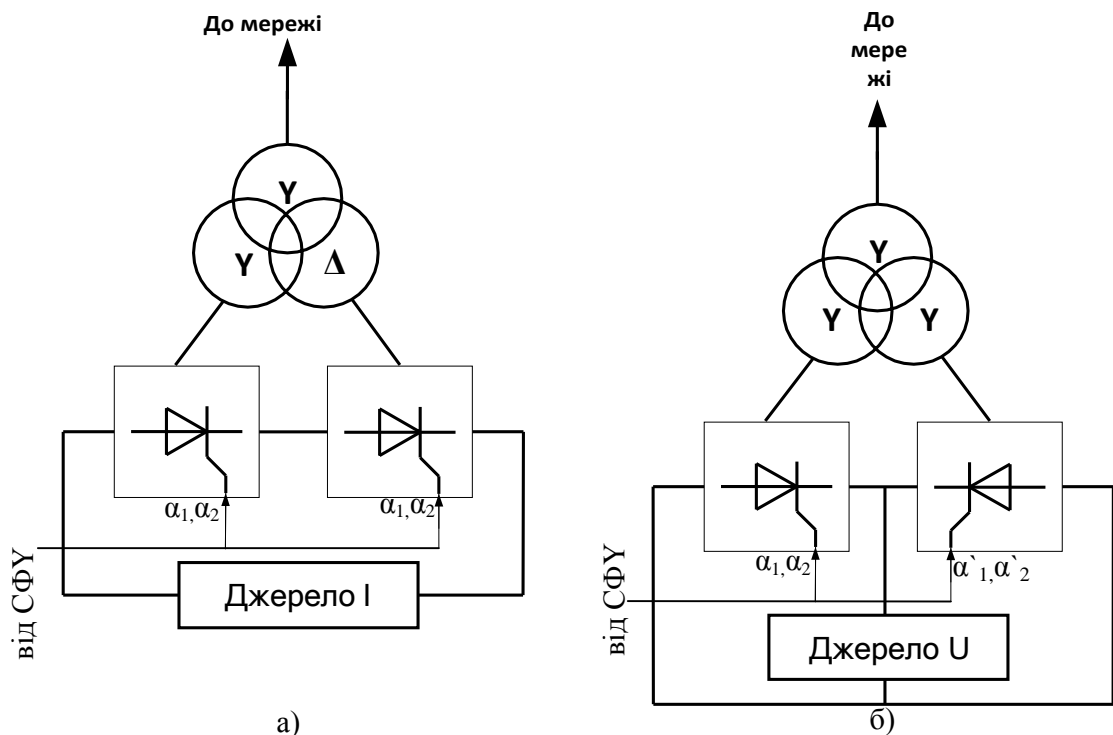
Основна перевага узгодженого управління – максимально швидка перемикання з режиму накопичувача в інверторний режим і навпаки. Таким чином, завдяки даній властивості, далі в роботі застосовуватиметься саме узгоджене управління перетворювачами, які працюють у режимі джереланапруги.

Схема підключення перетворювача, працюючого в режимі джерела напруги.

На основі описаних вище вимог для аналізу роботи накопичувачів енергії вибрано мостову схему з буферними вентилями в нульовому проводі по наступним причин:

- дана схема забезпечує високий рівень пульсацій (стосовно до дванадцятифазний двомостовий схемою),
- схема забезпечує високу швидкість перемикання режимів випрямлення/інвертування;

- схема забезпечує роботу як в режимі джерела струму (дванадцятифазна схема), так і в режимі джерела напруги (оборотний перетворювач).



(Рис 2.4) Схеми підключення напівпровідникових перетворювачів для накопичувачів енергії для різних режимів. а) режим джерела струму, б) режим джерела напруги.

СФУ – система фазового управління;  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути керування напівпровідниковими вентилями (або групою напівпровідникових вентилів);  $\alpha_1, \alpha_2$  - Кути управління суміжними напівпровідниковими вентилями при узгодженому управлінні

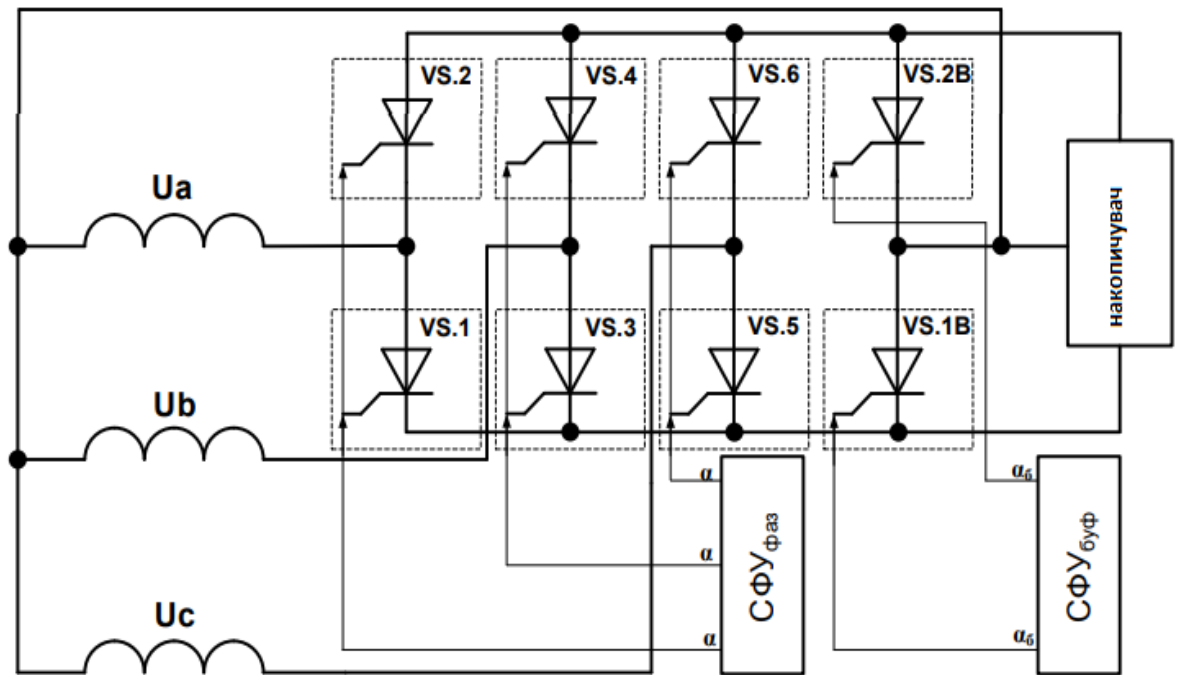
Для реалізації двопараметричного керування необхідно застосовувати двоопераційні (Цілком керовані або замикаються) вентиля, здатні комутувати високі значення струмів на напрузі 6-20 кВ. До таким вентилям можна віднести сучасні біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT) та МОП-транзистори (MOSFET).

Наведена схема однієї з двох груп використовуваного мостового напівпровідникового перетворювача на базі керованих вентилів з буферними вентилями в нульовому дроті.

Фазні вентиля (VS.1-VS.6) комутують відповідні позитивні (катодна група) та негативні (анодна група), кожна з груп вступає в роботу один раз за період. Буферні вентиля (VS.1B, VS.2B)

комутують відповідні фазні вентилялі (кожен з буферних вентилів вступає в роботу тричі за період).

Тут і далі прийняті наступні позначення кутів управління фазними і буферними вентилями:  $\alpha$  - для фазних вентилів,  $\alpha_b$  - для буферні вентилі.



(Рис 2.5) Схема перетворювальної групи трифазного мостового напівпровідникового перетворювача з буферними вентилями. VS.1-VS.6 – фазні вентилялі, VS.1B, VS.2B – буферні вентилялі,  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  - Обмотки мережевого трансформатора зв'язку,  $\alpha$ ,  $\alpha_b$  - кути управління відповідно фазними і буферними вентилями

Реалізована схема напівпровідникового перетворювача накладає наступні обмеження на діапазон зміни кутів (виходячи з умов симетричної роботи всіх трьох плечей моста):

$$0 \leq \alpha - \alpha_b \leq \frac{2\pi}{3} \quad (2.2)$$

Формування імпульсів, що дозволяють регулювати потужність, протікаючу через перетворювач, покладається на систему фазового управління (СФУ).

В даний час існують дві основні реалізації системи фазового управління – синхронне та асинхронне [37]. У разі синхронного керування моменти формування імпульсів управління завжди синхронізовані з

напругою мережі, до якого підключений вентиль. У асинхронній системі частота генерації імпульсів стає синхронною по відношенню до частоті напруги мережі тільки в що встановилося режимі при замкненим контурі регулювання фазою імпульсу керування. Оскільки керування перетворювачем для мети забезпечення ефективності протиаварійного управління при великих збудження здійснюється в темпі перехідного процесу, тому в цьому випадку застосовна лише синхронна схема управління.

Вираз для визначення потужності перетікання через перетворювач наведено:

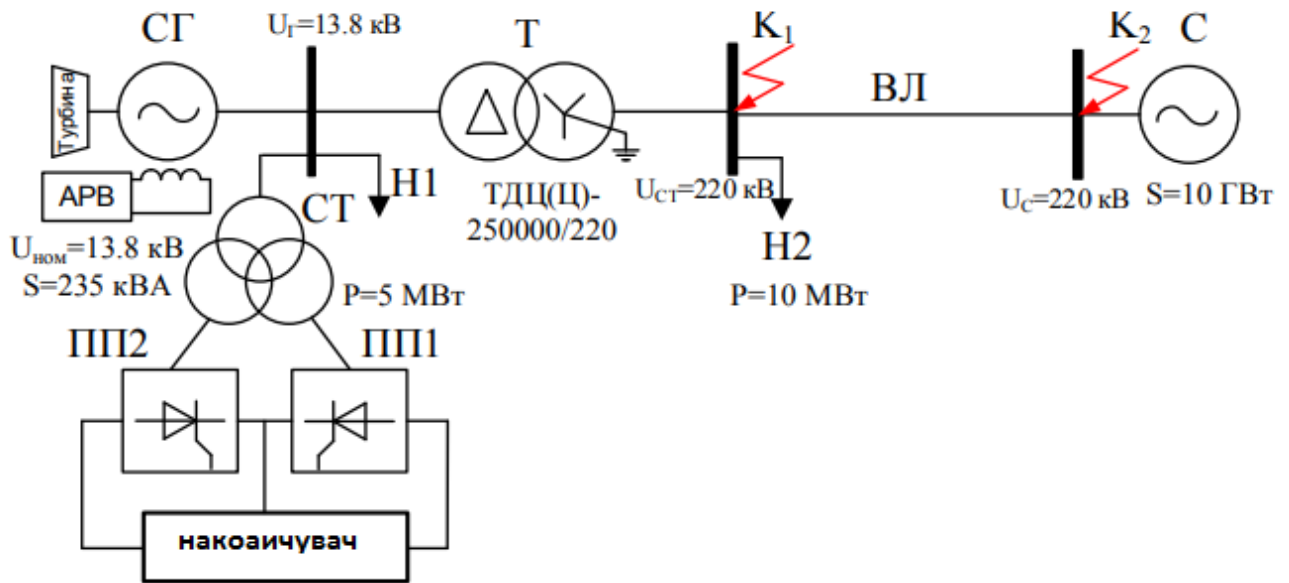
$$\begin{aligned}
 P &= \frac{3\sqrt{2}U_T I_d}{\pi} (\cos\alpha' + \cos\alpha'_6), \\
 Q &= \frac{3\sqrt{2}U_T I_d}{\pi} (\sin\alpha' + \sin\alpha'_6), \\
 \alpha' &= \alpha + \frac{\pi}{6}; \\
 \alpha'_6 &= \alpha_6 + \frac{\pi}{6};
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

де  $\alpha$  - кути відкриття фазних вентилів;  $\alpha_6$  - кути відкриття буферних вентилів;  $U_T$  - Напруга мережної обмотки трансформатора зв'язку;  $I_d$  - Випрямлений струм навантаження (перетворювача);  $P$  – активна потужність обміну перетворювача з мережею;  $Q$  - реактивна потужність обміну перетворювача з мережею.

Також вираз дозволяє отримати кути управління перетворювачами для отримання необхідною потужності, видається або споживаної накопичувачами.

### 2.3. Структурна схема моделі енергосистеми з накопичувачем енергії

Для дослідження впливу накопичувачів енергії на динамічну стійкість генератора автором розроблено структурна схема моделі енергосистеми із накопичувачем енергії. Структурна схема досліджуваної моделі енергосистеми з накопичувачем енергії

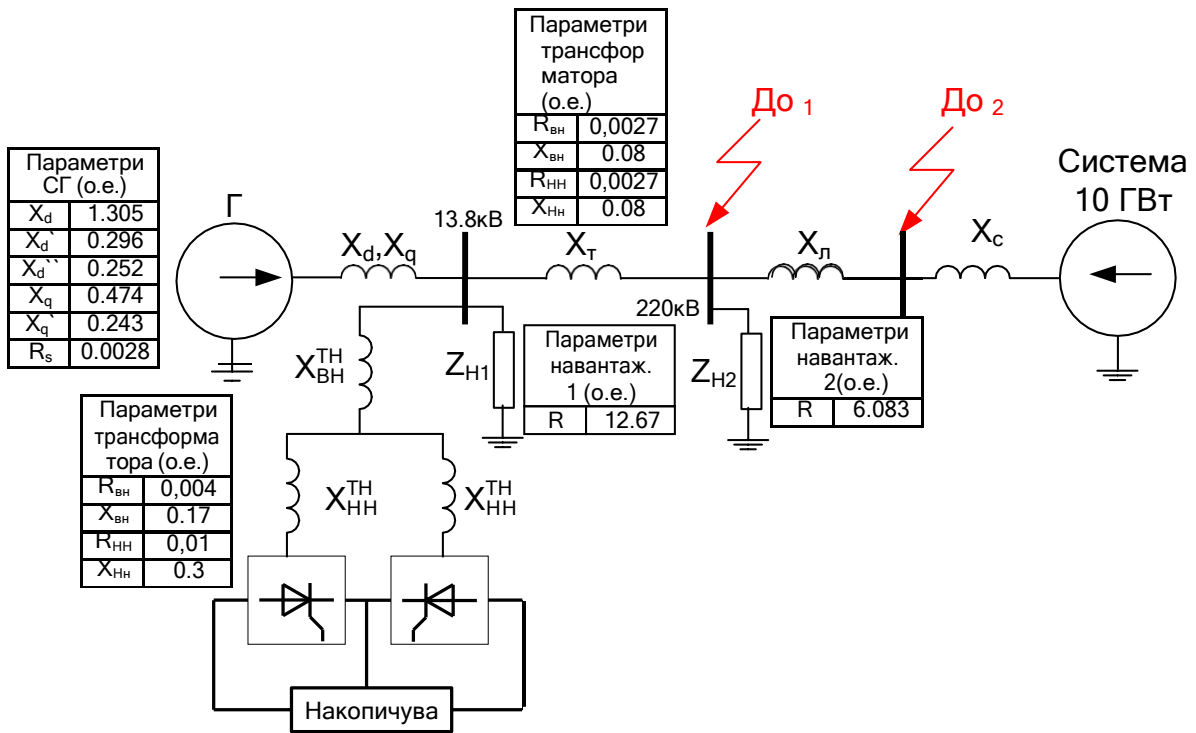


(Рис 2.6) Структурна схема досліджуваної моделі енергосистеми із накопичувачем енергії. СТ - мережевий трансформатор, ПП – напівпровідниковий перетворювач, СВ – система збудження, АРВ – автоматика регулювання збудження, Н – навантаження, С – електроенергетична система, СГ - синхронний генератор, Т - блоковий трансформатор, ПЛ - лінія.

Модель складається з генератора потужністю 200 МВт, блочного трансформатора, навантажень (власні потреби 13.8 кВ та виділене навантаження на шинах 220 кВ), лінії 220 кВ і електроенергетичної системи (представляється джерелом трифазного напруги). Параметри схеми заміщення структурної схеми.

Для зв'язку накопичувача з мережею, а також для реалізації режимів заряду/розряду, накопичувач енергії підключається через напівпровідниковий перетворювач з мережевими трансформаторами[38]. Як вентиля обрані IGBT, т.к. дані вентиля мають достатню високою потужністю і достатньою ізоляцією для використання на генераторному напрузі (13.8 кВ). У рамках досліджуваної моделі розглядаються наступні збудження , що приводять до виникненню аварійного небалансу потужності:

*Режим 1* : трифазне коротке замикання на висновках вищої напруги блочного трансформатора. Цей режим характеризується глибоким зниженням напруги і призначений для оцінки можливості роботи накопичувача в умовах глибокого зниження напруги.



(Рис 2.7) Схема заміщення досліджуваної моделі енергосистеми з накопичувачем енергії

*Режим 2:* двофазне коротке замикання на землю на лінії, що відходить 220 кВ. Даний режим характеризується зниженням напруги, однак не настільки глибоким, як в *режимі 1* і призначений для оцінки можливості роботи накопичувача в умовах неглибокого зниження напруги.

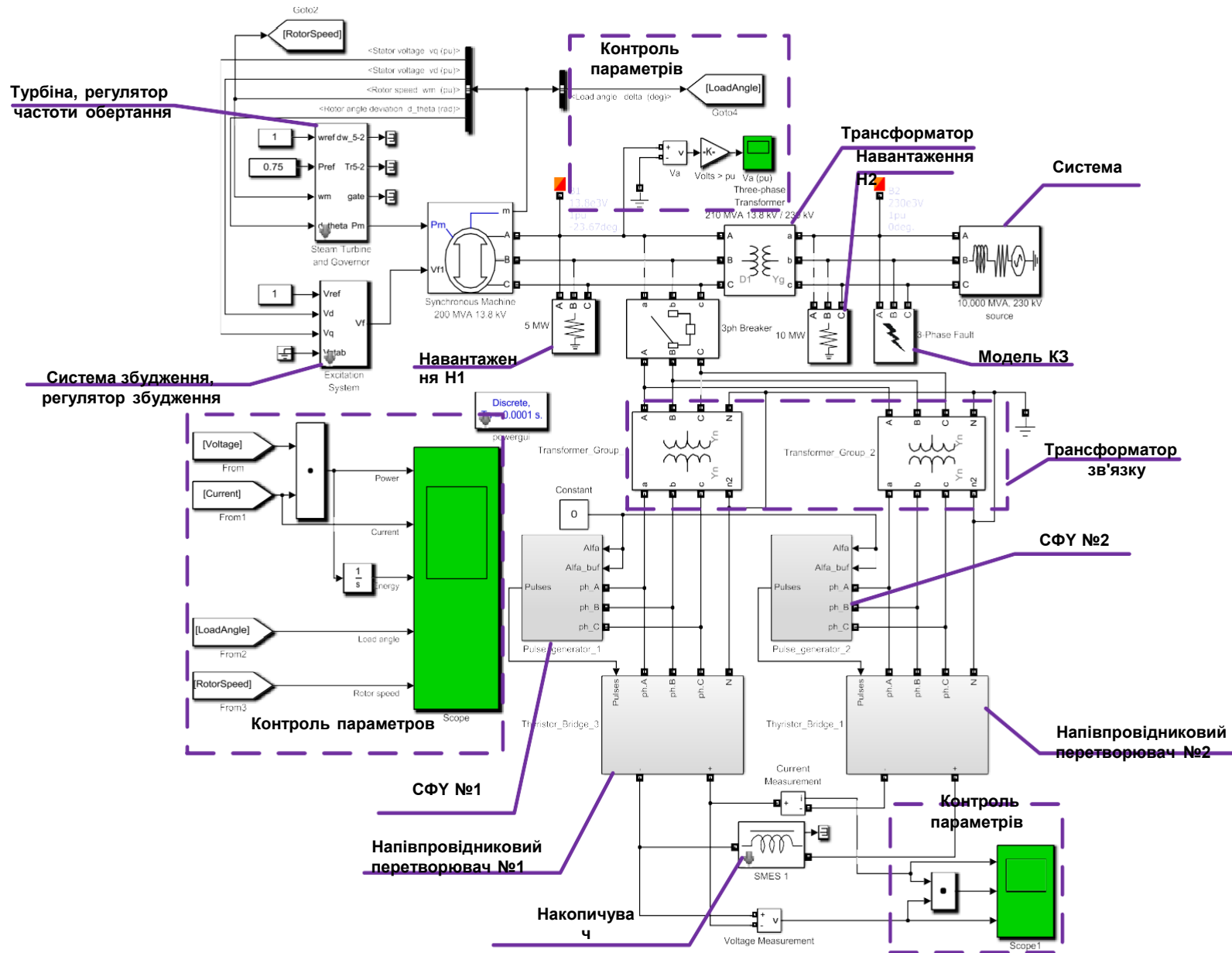
*Режим 3:* відключення лінії, зв'язуючою генератор з системою в результаті однофазного короткого замикання, що відключається швидкодіючої захистом і наступним успішним автоматичним повторним включенням. Даний режим характеризується короточасним зниженням і швидким відновлення напруги. Призначений для оцінки роботи накопичувача при напругах, близьких до номінальному.

## 2.4 Модель генератора

Електрична Модель генератора представлена синхронною машиною з демпферними обмотками (дві обмотки в осі  $q$  і одна в осі  $d$ ) і описується наступною системою рівнянь Парку-Горьова :

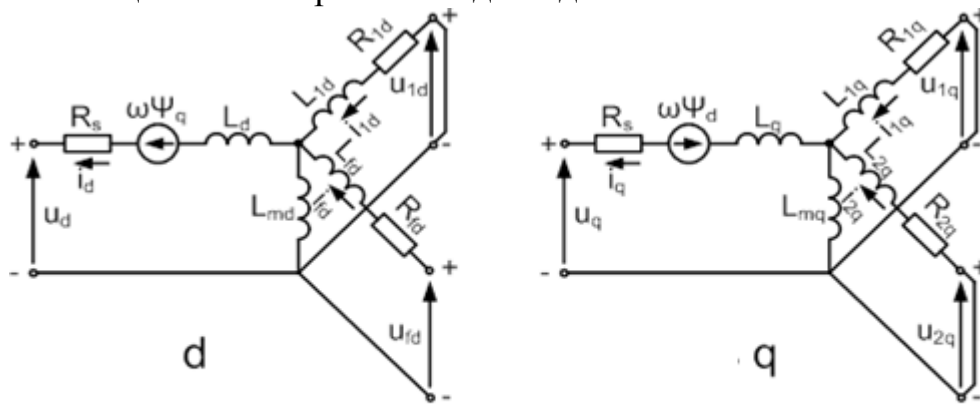
$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} + \omega\Psi_q + R_s i_d &= -u_d; \\ \omega\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - R_s i_q &= u_q; \\ \frac{d\Psi_d}{dt} + R_{fd} i_{fd} &= u_{fd}; \\ \frac{d\Psi_{1d}}{dt} + R_{1d} i_{1d} &= u_{1d} = 0; \\ \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + R_{1q} i_{1q} &= u_{1q} = 0; \\ \frac{d\Psi_{2q}}{dt} + R_{2q} i_{2q} &= u_{2q} = 0; \end{aligned} \quad (2.4)$$

де  $\Psi_{d,q}$  - потокозчеплення в обмотках статора у відповідних осях;  $R_s$  - активне опір обмотки статора;  $\omega$  - швидкість обертання ротора;  $u_{d,q}$  - напруга обмотки статора у відповідних осях;  $u_{fd}$  - Напруга обмотки збудження;  $i_{d,q}$  - Струм обмотки статора у відповідних осях;  $u_{1d}, u_{1q}, u_{2q}$  - напруги демпферних обмоток в відповідних осях;  $R_{1d}, R_{1q}, R_{2q}$  - активне опір демпферних обмоток;  $T_{1d}, T_{1q}, T_{2q}$  - потокозчеплення демпферних обмоток;  $i_{1d}, i_{1q}, i_{2q}$  - струм демпферних обмоток.



(Рис 2.8) Досліджувана модель енергосистеми з накопичувачем.

цієї системі рівнянь відповідає схема.



(Рис 2.9) Схема заміщення синхронного генератора

Як видно з рівнянь, дана модель є повною п'ятиконтурною моделлю, враховує перехідні процеси як в обмотці ротора, так і в обмотці статора.

Механічна частина генератора описується рівнянням руху ротора :

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2J} \int_0^t (T_m - T_e) dt;$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0. \quad (2.5)$$

де  $\omega$ ,  $\Delta\omega$  – швидкість обертання та збільшення швидкості обертання ротора;  $\omega_0$  - початкова швидкість обертання ротора;  $J$  - момент інерції ротора;  $T_m$  - механічний момент турбіни (розганяючий момент);  $T_e$  - електричний момент генератора (Момент опору) [39].

### **3. Маховиковий накопичувач для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі**

У рамках цього розділу проводиться вибір ефективного типу накопичувача енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі; уточнюються параметри обраного накопичувача енергії; формується спосіб застосування накопичувача енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях, розробляється модель енергосистеми з обраним накопичувачем енергії і система управління даними накопичувачем енергії, проводяться дослідження ефективності запропонованого способу.

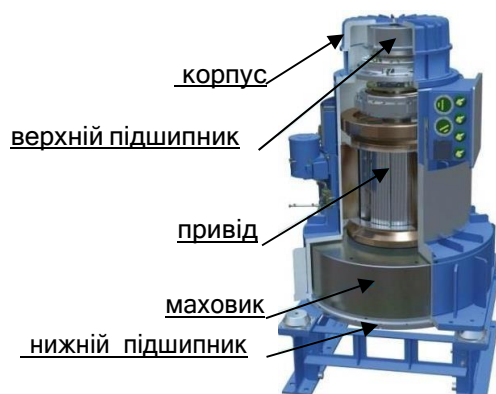
#### **3.1. Вибір оптимального типу накопичувача енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях**

Згідно результатам, доцільними типами накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях є суперконденсатор і маховиковий накопичувач енергії.

Також у процесі аналізу параметрів накопичувачів енергії було наведено питомі вартості енергії для різних типів накопичувачів. Для суперконденсаторів питома вартість складає 140 тис.дол/МДж тоді для маховикового накопичувача дана величина складає 20 тис.дол/МДж крім того суперконденсатори характеризуються щодо великим струмом саморозряду[40]. Дана інформація дозволяє зробити висновок, що з видів, що розглядаються накопичувачів енергії ефективним для вирішення поставленого завдання саме маховиковий накопичувач.

### 3.2. Загальні відомості про параметрах маховикового накопичувача

В даний час виробництво маховиків здійснюється у багатьох країнах. Вироблені маховикові накопичувачі мають вертикальне виконання.



(Рис 3.1) Маховиковий накопичувач

Маховиковий накопичувач має наступні компоненти в своєю конструкції: привід (у вигляді оборотний електричної машини), призначений для перетворення електричної енергії в кінетичну та навпаки; маховик, здійснюючий запасання енергії в вигляді кінетичної енергії тіла, що обертається; опорні підшипники

Зазвичай виділяють два основних класу маховикових накопичувачів: високошвидкісні та низькошвидкісні[41].

Виходячи з призначення, ціни, перевага типу маховикового накопичувача для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях стоїть віддати низькошвидкісним маховиковим накопичувачам. Однак додатково необхідно уточнити тип приводу для маховикового накопичувача, щоб остаточно визначити конструкцію машини.

(Таб 3.1) Порівняння характеристик високошвидкісних і низькошвидкісних маховикових накопичувачів

Параметр	Низькошвидкісний маховиковий накопичувач	Високошвидкісний маховиковий накопичувач
Швидкість обертання	До 10000 об/хв	Більше 10000 про/хв
Матеріал маховика	Сталь	Композитні матеріали (скловолокно і карбон)
Типи приводів (машин)	Асинхронні, синхронні вентильні, реактивні	Синхронні вентильні, реактивні
Середа всередині корпуси	Низький/середній вакуум або газ	Високий вакуум
Вага корпуси	2 x Вага маховика	1/2 x Вага маховика
Тип підшипників	Механічні або змішані (механічні та магнітні)	Магнітні
Основне призначення	Якість електроенергії, регулювання перетікань	Тяговий транспорт, авіакосмічна галузь
Відносна ціна	1	5

***Вибір типу приводу для маховикового накопичувача для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях***

Привід маховикового накопичувача і його система управління є одними з найбільш складних і відповідальних вузлів накопичувача. До них пред'являються такі вимоги:

- можливість працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна;
- високий рівень ККД як в режимі генератора, так і в режимі двигуна;
- забезпечення якісного регулювання швидкості;
- низькі втрати в ротор;
- забезпечення високою вихідний потужності;
- можливість формувати значні електромагнітні моменти без ушкодження;
- тривалий термін служби без ремонту;

- надійну роботу, просте обслуговування, високу термічну стійкість.

У справжнє час в якості приводів для маховикового накопичувача застосовують такі види електричних машин: асинхронні машини (Автори в до асинхронним машинам також відносять машини з подвійним харчуванням), реактивні електричні машини (або машини з змінним магнітним опором) і машини з постійними магнітами на ротор.

Асинхронні машини використовують для маховикових накопичувачів потужності через їх просто ти, високого електромагнітного моменту і низькою вартості. [42] Основними недоліками даних машин є обмеження в максимальному ковзанні, складне управління і високі вимоги до обслуговування. Машини з подвійним харчуванням знаходять своє застосування в якості приводу для маховикового накопичувача через можливості гнучкого управління потужністю обміну між накопичувачем енергії і мережею, знижених вимог до силовій електроніці через те, що керування потоком енергії здійснюється не в ланцюги статора, а в ланцюгах збудження[43].

Машини з змінним магнітним опором надійні, мають низькі втрати при роботі в режимі холостого ходу та широкі межі регулювання швидкості обертання. Дані машини мають більше просте управління по порівнянні з асинхронними машинами при роботі на високих швидкостях. З інший сторони, машини з змінним магнітним мають низький коефіцієнт потужності і низьку питому потужність, крім того мають високою пульсацією крутить моменту. Реактивна синхронна (РСМ) і реактивна крокова авто (РШМ) як види машин з змінним магнітним опором використовуються для високошвидкісних маховикових накопичувачів[44].

Машини з постійними магнітами на роторі найчастіше використовують для маховикових накопичувачів через їх високою ефективності, високою питомий потужності та низьких втрат у роторі. Основні типи застосовуваних машин з постійними магнітами наступні: синхронна вентильна машина (СВМ) та безколекторна авто постійного струму (БМПТ) .

(Таб 3.2) Порівняння приводів для маховикового накопичувача

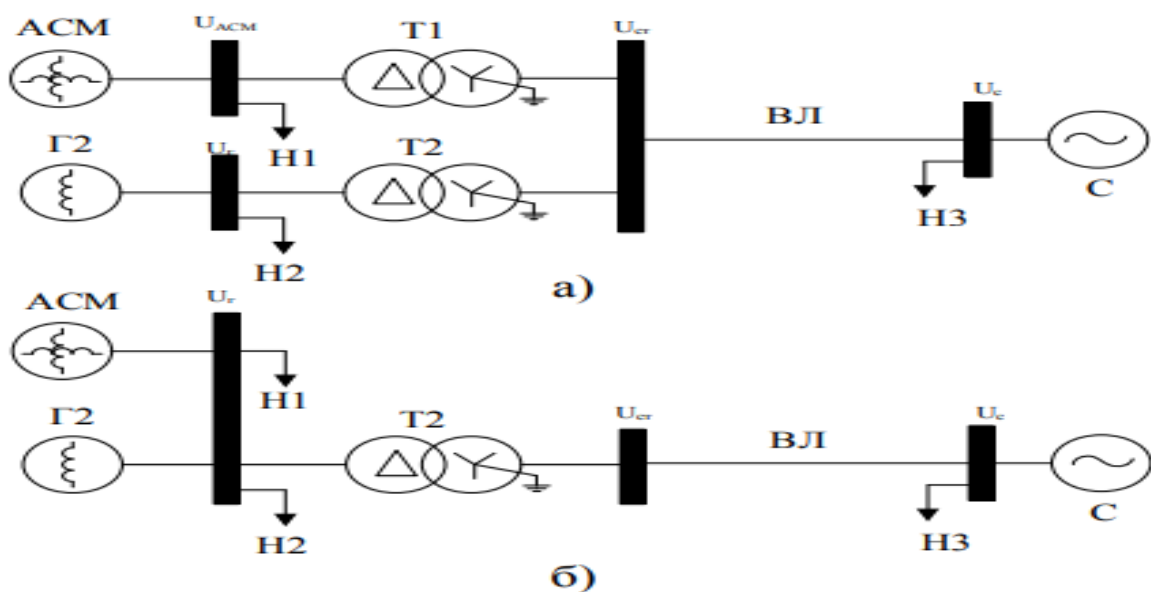
Авто	Асинхронна (з подвійним харчуванням)	Зі змінним магнітним опором	З постійними магнітами
Потужність	Висока	Середня і низька	Середня і низька
Питома потужність	Середні (~0.7 кВт/кг)	Середні (~0.7 кВт/кг)	Високі (~0.7 кВт/кг)
Втрати на ХХ	0 при зняття поля	0 при зняття поля	Присутні
ККД	Високий (93.4%)	Високий (93%)	Дуже високий (95%)
Управління	Векторне	РСМ: векторне РШМ: цифрове	СВМ: векторне БМПТ: цифрове
Межа міцності	Середній	Середній	Низький
Пульсація моменту	Середня (7.3%)	Висока (24%)	Середня (10%)
Відношення макс. до базовий швидкості	Середнє (>3)	Висока (>4)	Низьке (<2)
Розмагнічування	Ні	Ні	При перегріві
Вартість	Низька (22) €/кВт)	Низька (24) €/кВт)	Низька (38) €/кВт)
Переваги	Низька вартість	Стійкість до перегріву	Низькі втрати, високий ККД
	Просте виробництво	Високі навантаження	Висока уд. потужність
	Налагоджене виробництво	Низькі втрати при пуску	Високий питомий момент
	Управління $\cos \varphi$	Просте розсіювання тепла	Маленький розмір, низький вага
	Ні розмагнічування	Низькі втрати, високий КДП	Немає обмотки збудження
	Висока енергоємність	Висока уд. потужність	Просте управління
	Ні втрат на ХХ		Висока надійність
Недоліки	Обмежена швидкість	Складна структура	Неприпустимі темпи навантаження
	Великий розмір	Складне виробництво	Розмагнічування
	Високі втрати	Низький $\cos \varphi$	Висока вартість
		Пульсація моменту, вібрація	Крихіткі матеріали
		Складне регулювання швидкості	Складність розрахунку потоку в зазорі

зведені основні параметри, а також переваги і недоліки застосовуваних приводів для маховикового накопичувача.

Найбільшефективним типом приводу для маховикового накопичувача для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях є низькошвидкісна машина з подвійним живленням з наступних причин: дані машини забезпечують високу потужність, мають низьку вартість, можливість роздільного регулювання активної та реактивної потужностей обміну накопичувача енергії з мережею, відсутністю пульсації моменту, наявністю напрацювань в виробництві та експлуатації машин даного типу[45].

### 3.3. Структурна схема моделі енергосистеми з маховиковим накопичувачем

Для дослідження можливості і оцінки ефективності використання маховикового накопичувача на базі асинхронізованої синхронної машини підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях, необхідно розробити структурну схему моделі енергосистеми з накопичувачем енергії даного типу. Особливо увагу слід приділити точці підключення асинхронізованої машини щодо синхронного генератора. Слід розглянути 2 основних випадки: підключення на шини вищої напруги станції та підключення на шини генератора[46].

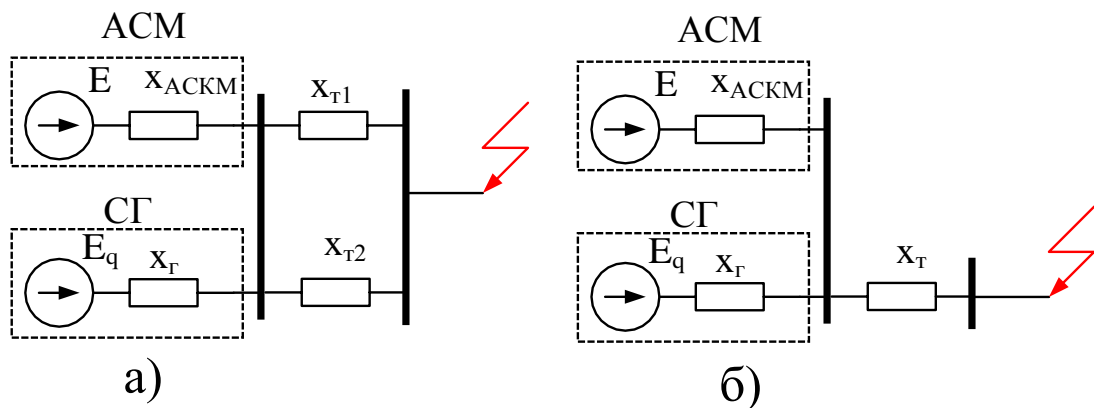


(Рис 3.2)Варіанти підключення асинхронізованої синхронної машини з маховиковим накопичувачем: а) через індивідуальний трансформатор на шини станції; б) на

шини генераторної напруги. АСМ - асинхронізована синхронна машина, Г - синхронний генератор, ВЛ - Лінія, Т - трансформатор

Синхронний генератор для обох цих випадків працює через підвищуючий трансформатор.

Наведена схема заміщення при роботі асинхронізованої синхронною машини з маховиком накопичувачем паралельно синхронному генератору на шини станції, тобто. відповідає схемою.



(Рис 3.3) Схеми заміщення під час підключення асинхронізованої синхронної машини з маховиком: а) на шини станції; б) на шини генераторної напруги. АСМ - асинхронізована синхронна авто, СГ - синхронний генератор.

Кутова характеристика активною потужності передачі від синхронного генератора до асинхронізованої синхронної машини визначається виразом:

$$(3.1) \quad P(\delta) = \frac{E_q^{\text{ген}} E^{\text{АСМ}}}{x_{\text{св}}} \sin(\delta) = \frac{E_q^{\text{ген}} E^{\text{АСМ}}}{x_{\text{АСМ}} + x_{\text{Т1}} + x_{\text{Т2}} + x_{\text{Т}}} \sin(\delta)$$

де  $E^{\text{АСМ}}$ ,  $E_q^{\text{ген}}$  – ЕРС відповідно асинхронізованої синхронної машини та синхронного генератора;  $x_{\text{АСМ}}$ ,  $x_{\text{Г}}$ , - опір обмотки статора відповідно асинхронізованою синхронною машини і синхронного генератора;  $x_{\text{Т1}}$ ,  $x_{\text{Т2}}$  - опір блокових трансформаторів.

Очевидно, що можливості передачі потужності від генератора до асинхронізованою синхронною машині обмежені опором зв'язку між ЕРС синхронного генератора і асинхронізованою синхронною машини, в яке входить опору трансформаторів[47].

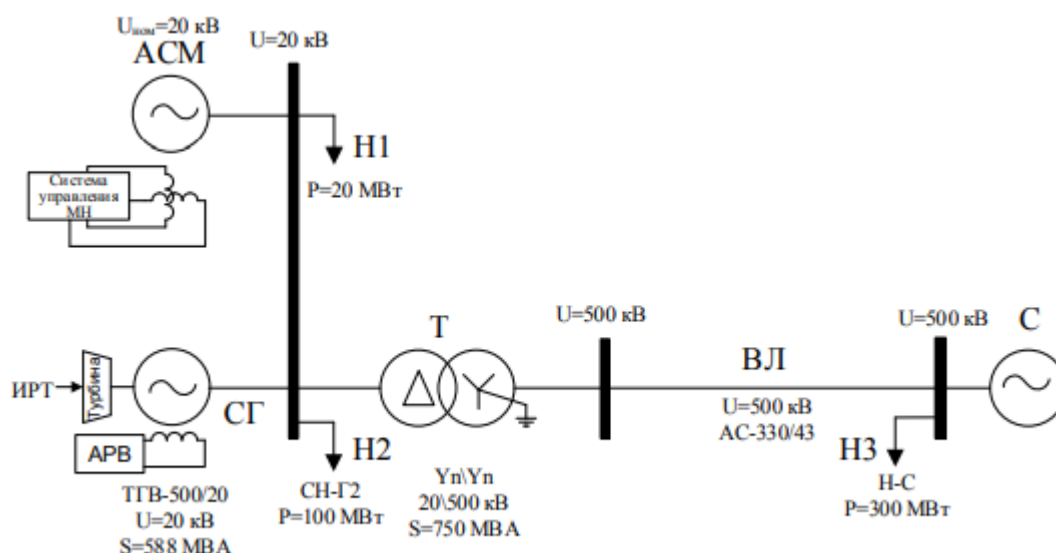
Розглянемо випадок, коли асинхронізована синхронна машина підключається на

генераторне напруга. Відповідно для даного випадку характеристика потужності визначається наступним чином:

$$P(\delta) = \frac{E_q^{\text{ген}} E^{\text{АСМ}}}{x_{\text{св}}} \sin(\delta) = \frac{E_q^{\text{ген}} E^{\text{АСМ}}}{x_{\text{АСМ}} + x_{\text{Г}}} \sin(\delta) \quad (3.2)$$

Очевидно, що при зменшенні опору зв'язку за рахунок виключення підвищують трансформаторів, ефективність обміну потужністю між синхронним генератором і асинхронізованою синхронною машиною значно збільшується. Таким чином, далі розглядається варіант підключення асинхронізованою синхронною машини з маховиковим накопичувачем на шини генераторної напруги.

З обліком уточнення крапки підключення накопичувача, розроблено структурна схема енергосистеми з маховиковим накопичувачем на базі асинхронізованою синхронної машини.



(Рис 3.4) Структурна схема моделі енергосистеми з маховиковим накопичувачем. АРВ - автоматика регулювання збудження; ІРТ - імпульсна розвантаження турбіни; Н - навантаження; З - Електроенергетична система; МН - маховиковий накопичувач; Г-синхронний генератор; АСМ - асинхронізована синхронна авто; Т - блоковий трансформатор; Л - лінія.

Вибір потужного генератора (ТГВ-500) для моделі обумовлений наступним: на великих станціях (у зокрема, на АЕС) при певних

компонування розподільчих пристроїв існують т.зв. «мертві зони», які, за певних умов, відключаються не основними, а резервними захистами. Таким чином, час відключення короткого замикання значно збільшується[48]. Крім того, зазвичай час ліквідації короткого замикання у мертвій зоні з відмовою вимикача і, відповідно, роботою пристрої резервування при відмові вимикача, виявляється значно більшим, ніж максимально допустиме за умовою динамічної стійкості. В даному випадку на станцію може бути накладено обмеження максимально припустиму генерується потужність, що загрожує для власника станції значними витратами.

Таким чином, в експерименті обраний генератор типу ТГВ-500, що встановлюється на атомних станціях. Параметри основних елементів моделі (вихідні та розрахункові).

### ***Система управління збудженням асинхронізованою синхронною машиною при коротких замиканнях***

Система управління збудженням синхронізованої синхронної машини в доаварійному режимі здійснюється відомими пристроями АРВ і окремо в рамках даної роботи не розглядаються, т.к. метою розгляду даної роботи є перехідні процеси при коротких замиканнях[49].

Відповідно до обраної концепції, при фіксації короткого режиму замикання, управління збудженням передається системі управління асинхронізованою синхронною машиною, мова про якої піде нижче.

Основна відмінність полягає в блоці розрахунку напруги збудження (замість блоку розрахунку кута відкриття вентилів).

Блок розрахунок напруги збудження на основі необхідною потужності відбору здійснює розрахунок вектора напруги обмотки збудження[50]. Розрахунок проводиться за наступними рівняннями для квазіустановленого режиму для заданих активною, реактивною потужності, напруги статора і ковзання згідно:

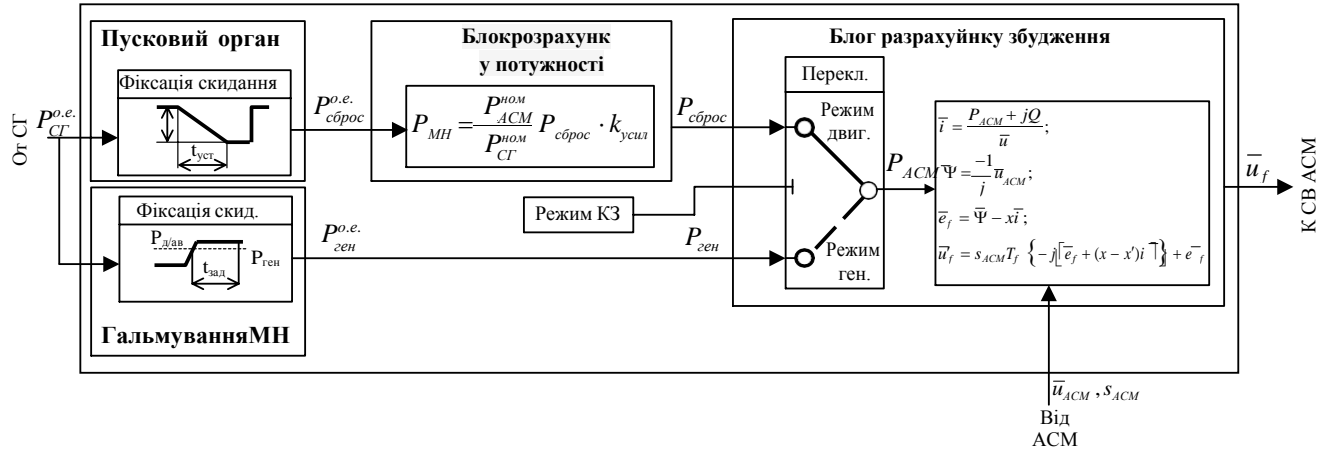
$$\begin{aligned}
-\bar{u} &= r\bar{i}; \\
\bar{i} &= \frac{P + jQ}{\bar{u}}; \\
\bar{\Psi} &= \frac{-1}{j}\bar{u}; \\
\bar{e}_f &= \Psi - x\bar{i}; \\
\bar{u}'_f &= sT_f\{-j[\bar{e}_f + (x - x')\bar{i}]\} + \bar{e}_f;
\end{aligned} \tag{3.3}$$

де  $\bar{u}$  – вектор напруги на затискачі обмотки статора;  $r$  – активне опір обмотки статора;  $\bar{\Psi}$ – вектор потокозчеплення обмотки статора;  $u'_f$ – вектор напруги обмотки ротора, виражений у спеціальних одиницях;  $e_f$  – вектор, чисельно рівний ЕРС  $e$ , наведеної струмом ротора в статорній обмотці, і збігається у напрямі зі струмом ротора, тобто.  $e_f = je$ ;  $T_f$  - постійна часу обмотки ротора при розімкнутій обмотці статора;  $x$  - індуктивний опір обмотки статора;  $x'$ – перехідний індуктивний опір обмотки статора;  $T_j$ – електромеханічна постійна часу;  $MR$  - механічний момент;  $ME$ – електромеханічний момент;  $s$ -ковзання.

Рівняння дозволяють розраховувати напруги збудження для заданих значень активною та реактивної потужності [51].

### Блок розрахунку потужності.

(Рис 3.5) Підсумкова структура схеми управління.



- $P_{сброс}^{o.e.}$  - активна потужність скидання СГ (з обліком синхронізуючого моменту);
- $P_{СГ}^{ном}$  - номінальна активна потужність СГ;
- $P_{АСМ}^{max}$  - максимальна активна потужність АСМ;
- $P_{АСМ}$  - завдання по активною потужності АСМ;
- $P_{АСМ}^{ном}$  - номінальна потужність АСМ;
- $\alpha$  - поточна потужність СГ;
- $P_{уст}$  - уставка по величині активною скидання потужності СГ;
- $P_{д/ав}$  - доаварійна потужність СГ;
- $t_{уст}$  - уставка усереднення потужності СГ;

- $\bar{u}$  - вектор напруги на затискачі обмотки статора;
- $r$  - активне опір обмотки статора;
- $\bar{\Psi}$  - вектор потокозчеплення обмотки статора;
- $\bar{u}'_f$  - вектор напруги обмотки ротора, виражений спеціальних одиницях;
- $\bar{e}'_f$  - вектор, чисельно рівний ЕРС, наведеної струмом ротора в обмотці статора, і збігається по напрямку з струмом ротора, тобто  $\bar{e}'_f = j\bar{e}$ ;
- $T_f$  - постійна обмотки часу ротора при розімкнуту обмотці статора;
- $x$  - індуктивний опір обмотки статора;
- $x'_s$  - перехідне індуктивне опір обмотки статора;
- $\sigma$  - ковзання;
- $S_{АСМ}$

## **4. Розробка і дослідження способу застосування групи накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях**

### **4.1. Спосіб застосування групи накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі**

Вибір типів накопичувачів енергії, що використовуються спільно, визначається наступними положеннями :

- 1) застосування групи накопичувачів енергії має забезпечувати ефект у частині підвищення максимально допустимої тривалості короткого замикання за умовою збереження динамічної стійкості не гірше, чим застосування одиночного накопичувача енергії[52];
- 2) сумарна вартість групи накопичувачів енергії має бути нижчою вартості одиночного накопичувача енергії з еквівалентними параметрами[53].

### **4.2. Вибір типів накопичувачів енергії для використання у складі групи для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях**

на основі вимог , необхідно вибрати типи накопичувачів для використання у групі[54],[55]. За результатами були обрані та розглянуті наступні типи накопичувачів:

- надпровідникові індуктивні накопичувачі;
- маховикові накопичувачі;
- суперконденсатори;
- акумуляторні батареї великої потужності.

З розглянутих типів накопичувачів слід виключити з розгляду СПІН через високі витрати на спорудження.

Окремо варто розглянути застосування акумуляторних батарей великої потужності).

Розглянемо можливість застосування акумуляторних батарей великої потужності для компенсації частини надлишкового електромагнітного моменту генератора, припускаючи, що решта буде скомпенсована накопичувачем іншого типу[56]. При цьому доцільно провести якісну оцінку вартості акумуляторних батарей у порівнянні з іншими типами накопичувачів енергії з враховуючи наступну початкову умову: забезпечення видачі активної потужності  $P=1$  МВт в течії 1с.

Параметри для розглянутою комірки акумуляторної батареї) наведено.

(Таб 4.1) Параметри комірки акумуляторної батареї

Тип комірки	Напруга, $U_{яч}, \text{V}$	Струм заряду (максимальний), $I_{яч}, \text{A}$	Місткість акумуляторної комірки *, $Q_{яч}$	
			А год	До
<b>SPB803496H</b>	3.7 V	2,6	2,6	9360

Примітка: під ємністю акумуляторної комірки розуміється кількість електрики, віддається (отриманого) при певних умовах розряду (заряду)

На основі енергоємність однієї комірки обраного типу визначається наступним чином :

$$W_{яч} = U_{яч} Q_{яч} = 34.6 \text{ кДж} = 34.6 \text{ кВт} \cdot \text{с} \quad (4.1)$$

З крапки зору забезпечення початкової умови в частини необхідною енергоємності в 1 МВт·с потрібно близько 30 осередків. Проте, з погляду забезпечення необхідного струму заряду для збирання  $U_{бат}=740$  В (тобто один модуль з 200 послідовних комірок), необхідно забезпечити струм зарядки батареї:

$$I_{бат} = 1/2 \text{ с} = 13 \text{ кА} \quad (4.2)$$

Для такого значення струму потрібно 520 модулів по 740 В. Загальна кількість елементів такого збирання – близько 100 тисяч, при цьому енергоємність збирання складе  $W_{бат} = 3.6 \text{ ГВт} \cdot \text{с} = 3.6 \text{ ГДж}$ . Таким чином, для цілі забезпечення динамічної стійкості при короткому замиканні в даному випадку буде використовуватися не понад 0.3% від ємності[57].

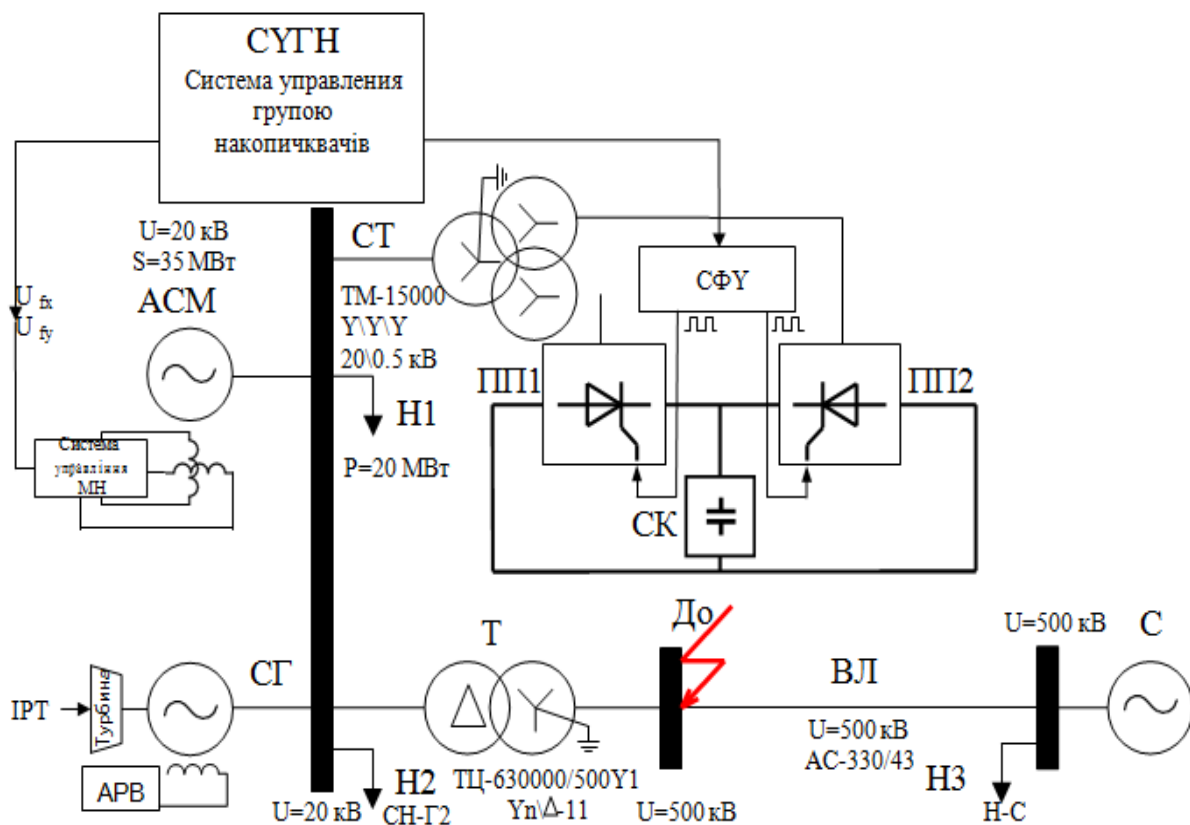
Вартість потужності для акумуляторної батареї великої потужності складає  $28^{\text{дол}} \frac{\text{—}}{\text{кВт}}$ , що значно перевищує вартість потужності для інших типів накопичувачів (для суперконденсатора вартість потужності

складає  $2,96 \frac{\text{дол}}{\text{кВт}}$  ). Таким чином, застосування акумуляторних батарей для компенсації навіть частини надлишкового електромагнітного моменту синхронного генератора недоцільно.

У результаті, в подальшому розглядається група з двох накопичувачів енергії: ємнісний накопичувач (на базі суперконденсатора) і маховиковий накопичувач.

## Структурна схема моделі енергосистеми із групою накопичувачів енергії і розрахункові умови

Структурна схема моделі енергосистеми, що включає групу накопичувачів енергії різного типу (маховиковий на базі асинхронізованої синхронної машини та ємнісний на базі суперконденсатора) наведено[58]



(Рис 4.1) Структурна схема схеми, що моделюється. СК – суперконденсатор, СТ – мережевий трансформатор, ПП - напівпровідниковий перетворювач, СВ - система збудження, СФУ -

система фазового управління, АРВ – автоматика регулювання збудження, ІРТ – імпульсне розвантаження турбіни, Н – навантаження, С – електроенергетична система, МН – маховиковий накопичувач, Г-синхронний генератор, АСМ - синхронна асинхронізованаавто; ПЛ – лінія.

У структурі використаний генератор ТГВ-500,

Маховиковий і ємнісний накопичувачі енергії підключаються на шини генераторного напруги[59].

У доварійному режимі група накопичувачів енергії (на базі маховикового і ємнісного накопичувача) працює на неодруженим ходу, синхронний генератор

працює в режимі видачі активною і реактивною потужності. Ємнісний накопичувач енергії підключений через триобмотувальний мережевий трансформатор ( $3U_{\text{нн}} = 0.5 \text{ кВ}$ ) і дві групи напівпровідникових перетворювачів. Напівпровідникові перетворювачі з'єднані за мостовою схемою з буферним вентилям в нульовому дроті.

Управління потужністю обох накопичувачів енергії здійснюється з допомогою системи управління групою накопичувачів (СУДН). Система управління на основі контролю зміни потужності синхронного генератора формує керуючі впливи на[61]:

- систему збудження асинхронізованою синхронною машини - значення збудження по осям  $d, q$  ;
- систему фазового управління – кути відкриття фазних та буферних вентилів обох перетворювальних груп.

У зв'язку з тим, що розрахункова потужність ємнісного накопичувача енергії не перевищує 30 МВт, встановлення пасивного фільтра не вимагається .

У момент виникнення короткого замикання, система управління групою накопичувачів енергії формує керуючі впливи (на систему збудження асинхронізованою синхронною машини і систему фазового управління), збільшуючи гальмівний момент на валу синхронного генератора, запобігаючи його розгін.

Також при моделюванні враховується імпульсна розвантаження турбіни енергоблока на 50% від номінальної активної потужності синхронного генератора . Облік імпульсної розвантаження враховується шляхом зміни активної потужності генератора з урахуванням реальної затримки реалізації розвантаження турбіни.

### 4.3. Розробка рекомендацій по застосуванню накопичувачів енергії

Отримані результати досліджень дозволяють розробити рекомендації по застосуванню накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях[62],[63] :

- 1) запропоновані рішення можуть застосовуватися у разі труднощів у забезпеченні динамічної стійкості генераторів станції без його відключення при великих збудженнях у енергосистемі за наступними причин:
  - при наявності «мертвих зон» релейний захисту в компонування розподільних пристроїв, що призводить до збільшення часу відключення короткого замикання;
  - при неможливості застосування імпульсної розвантаження або при значних затримках скидання активною потужності турбіни енергоблока при дії імпульсного розвантаження через необхідність забезпечення параметрів технологічного процесу;
  - при експлуатації низькоманеврених блоків турбіна-генератор (наприклад, АЕС).
- 2) для зниження витрат на встановлення накопичувачів рекомендується застосовувати груповий накопичувач енергії, що складається з маховикового накопичувача базі асинхронізованої синхронної машини та ємнісного накопичувача на базі суперконденсатора з оптимізованими по вартості параметрами;
- 3) для управління накопичувачами (і групами накопичувачів) енергії рекомендується застосовувати розроблені та досліджені в даній роботі системи управління[64].

## 5. Висновок

1. Встановлено можливість ефективного використання накопичувачів енергії деяких типів для протиаварійного керування при великих збудженнях в енергосистемі. Показано, що науково-обґрунтований вибір типу накопичувачів здійснюється на основі спільного аналізу технічних характеристик енергосистеми, накопичувача, системи протиаварійної автоматики, виду та інтенсивності збудженнях в енергосистемі.

Виявлено, що накопичувачі типу акумуляторні батареї великої потужності та надпровідниковий індуктивний накопичувач не можуть отримати практичного застосування через незадовільні параметри забезпечення динамічної стійкості з використанням системи протиаварійної автоматики. Показано, що накопичувачі типу, що рекомендується, є ефективним додатковим засобом підвищення динамічної стійкості при великих збудженнях в енергосистемі.

2. Розроблено та досліджено систему управління напівпровідниковим перетворювачем накопичувача енергії, яка дозволяє в автоматичному режимі на основі величини скидання потужності генератора, визначати необхідні кути відкриття вентилів перетворювача для створення накопичувачем енергії необхідного для збереження динамічної стійкості електромагнітного моменту на валу генератора в режимі короткого замикання.

3. Розроблено та досліджено систему управління асинхронізованою синхронною машиною, що дозволяє в автоматичному режимі розраховувати напругу збудження по осях  $d$ - $q$  для створення маховиковим накопичувачем необхідного збереження динамічної стійкості електромагнітного моменту на валу генератора в режимі короткого замикання.

4. Запропоновано та досліджено спосіб застосування накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного керування при великих збудженнях в енергосистемі, що полягає у використанні маховикового накопичувача з оптимізованими параметрами спільно з розробленою системою керування цим накопичувачем енергії.

5. Розроблено та досліджено систему управління групою накопичувачів енергії

(ємнісний та маховиковий), що дозволяє в автоматичному режимі розподіляти завдання по активній потужності споживання між накопичувачами енергії та визначати напруги збудження по осях  $d, q$  (для маховикового накопичувача) та кути відкриття напівпровідникових перетворювачів (для ємнісного накопичувача) для створення групою накопичувачів енергії, необхідного для збереження динамічної стійкості електромагнітного моменту на валу генератора в режимі короткого замикання.

6. Запропоновано та досліджено спосіб застосування накопичувачів енергії для підвищення ефективності протиаварійного керування при великих збудженнях в енергосистемі, що полягає у використанні групи накопичувачів енергії (ємнісний та маховиковий) з оптимізованими параметрами спільно з розробленою системою управління цією групою накопичувачів енергії.

7. Проведені дослідження особливостей застосування накопичувачів енергії різного типу показали, що ефективними типами накопичувачів для збереження динамічної стійкості генератора без його відключення є маховиковий накопичувач і суперконденсатор.

8. Застосування розробленого варіанту підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі з використанням маховикового накопичувача, системи управління цим накопичувачем енергії спільно з імпульсним розвантаженням турбіни енергоблока дозволяє забезпечити динамічну стійкість генератора при всіх нормативних збудженнях без відключення генератора станції.

9. Встановлено, що ефективним типом приводу для маховикового накопичувача для забезпечення динамічної стійкості синхронного генератора при великих збудженнях в енергосистемі є асинхронізована синхронна машина.

10. Застосування розробленого способу для підвищення ефективності протиаварійного управління при великих збудженнях в енергосистемі з використанням групи накопичувачів енергії, що складається з маховикового та ємнісного накопичувачів енергії, системи управління даною групою спільно з імпульсним розвантаженням турбіни енергоблока дозволяє забезпечити динамічну

стійкість генератора нормативних збудженнях без відключення генератора станції.

11. Показано, що для завдання забезпечення динамічної стійкості генератора при великих збудженнях в енергосистемі доцільними типами накопичувачів енергії у складі групи є маховиковий та ємнісний, при цьому вартість розробленого рішення нижча за вартість одиночного накопичувача енергії з еквівалентними параметрами.

12. Подальші дослідження доцільно направити на вивчення можливості застосування накопичувачів для забезпечення участі низькоманеврених блоків у вторинному регулюванні частоти шляхом забезпечення нормативних параметрів набору та скидання активної потужності генератора; забезпечення виділення низькоманеврених блоків на власні потреби або збалансований район при дії частотної ділильної автоматики шляхом забезпечення нормативних параметрів скидання активної потужності генератора.

## Список літератури

1. Глускін І.З., Дмитрієва Г.А., Місріханов М.Ш., Наровлянський В.Г., Якимець І.В. Надпровідникові струмообмежувальні пристрої та накопичувачі енергії для електроенергетичних систем. 2002.
2. Ілюшин П.В. Особливості протиаварійного управління при аварійних дефіцитах потужності в автономних енергосистемах // Електро, №6, 2016. С. 2-11.
3. Масалев Д.Ю. Дослідження та розробка методів вибору характеристик надпровідникового індуктивного накопичувача в системі протиаварійного керування електроенергетичних систем: Дис... канд. техн. наук. М. 2000.
4. Воронін В.А., Любарський Д.Р., Макаровський С.М., Под'ячов В.М. Про можливий шлях розвитку ЄЕС на основі широкого використання накопичувачів енергії // Електричні станції, № 5, 2012..
5. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управління потоками електроенергії та підвищення ефективності електроенергетичних систем: навчальний посібник. 2012.
6. Астахов Ю.М., Вініков В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопичувачі енергії в електричних системах: Навчання, посібник для електроенергетичних спец. вишів. М: Вища школа, 1989.
7. Новіков Н.Л. Підвищення режимної надійності та керованості об'єднаних енергосистем за допомогою нових засобів та систем управління: Дис...докт. техн. наук. 2001.
8. Daoud I.M., Massoud A.M., Abdel-Khalik A.S., Elserougi A., Ahmed S. A Flywheel Energy Storage System для Fault Ride За допомогою Grid-Connected VSC HVDC-Based Offshore Wind Farms // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 3, May 2016. pp. 1671–1680.
9. Ghosh S., Kamalasan S. An Energy Function-Based Optimal Control Strategy для Output Stabilization of Integrated DFIG-Flywheel Energy Storage System // IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 4, July 2017. pp. 1922-1931.
10. Sun B., Dragičević T., Freijedo F.D., Vasquez J.C., Guerrero J.M. A Control Algorithm

for Electric Vehicle Fast Charging Stations Equipped With Flywheel Energy Storage Systems // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 9, Sept. 2016. pp. 6674-6685.

11. Worku M.Y., Abido M.A., Iravani R. Power fluctuation minimization в grid connected photovoltaic за допомогою supercapacitor energy storage system. // Journal of Renewable та Sustainable Energy, Vol. 8, No. 1, 2016.

12. Єфремов Д.Г., Єфремова І.Ю. Дослідження можливості застосування накопичувачів енергії з метою протиаварійної автоматики. 2015

13. Єфремов Д.Г., Єфремова І.Ю. Підвищення динамічної стійкості станції за допомогою використання накопичувачів енергії. 2016.

14. Єфремов Д.Г., Глускін І.З. Управління маховиковим накопичувачем енергії. // Радіоелектроніка, електротехніка та енергетика: 2017.

15. Єфремов Д.Г., Єфремова І.Ю. Деякі питання моделювання накопичувачів енергії з метою протиаварійної автоматики. // Радіоелектроніка, електротехніка та енергетика. 2016. С. 335.

16. Єфремов Д.Г., Глускін І.З. Підвищення динамічної стійкості електростанції за допомогою накопичувачів енергії. 2016.

17. Єфремов Д.Г., Єфремова І.Ю. Дослідження можливості застосування накопичувачів енергії з метою протиаварійної автоматики. // Десята міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Енергія-2015", Т. 3, 2015. С. 129-131.

18. Єфремов Д.Г., Єфремова І.Ю., Глускін І.З. Управління маховиковим накопичувачем енергії // Дванадцята міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Енергія-2017», Т. 3, 2017. С. 106-107.

19. Єфремов Д.Г., Глускін І.З. Підвищення динамічної стійкості генератора за допомогою керування групою накопичувачів енергії різного виду. 20. Єфремов Д.Г., Єфремова І.Ю., Глускін І.З. Застосування накопичувачів в енергосистемі для протиаварійної автоматики 2015

21. Єфремов Д.Г., Глускін І.З. Управління маховиковим накопичувачем з метою

- підвищення динамічної стійкості станції // Релейний захист та автоматизація 2016.
22. Веніков В.А. Перехідні електромеханічні процеси в електричних системах. М: Вища школа, 1985. 536 с.
  23. Беркович М.А., Гладішев В.А., Семенов В.А. Автоматика енергосистем. М.: Вища школа, 1991. 240 с.
  24. Мелешкін Г.А., Меркур'єв Г.В. Стійкість енергосистем 2006
  25. Брускін Д.Е., Зохорович А.Є., Хвостов В.С. Електричні машини та мікромашини. М: Вища школа, 1990. 528 с.
  26. Неклепа Б.Н., Крючков І.П. Електрична частина станцій та підстанцій 1989.
  27. Алексєєв О.П., Козіс В.Л., Кривенков В.В. і д. Автоматизація електроенергетичних систем: Навчальний посібник для вишів. М.: Вища школа, 1994. 448 с.
  28. ВАТ "З ЄЕС". СТО 59012820.29.240.001-2011. Стандарт організації. Автоматичне протиаварійне керування режимами енергосистем. Протиаварійна автоматика енергосистем. Умови організації процесу. Умови створення об'єкта. Норми та вимоги. М. 2011. 30 с.
  29. Овчаренко Н.І. Автоматика електричних станцій та електроенергетичних систем. 2000. 504 с.
  30. Окін А.А. Протиаварійна автоматика енергосистем. М: Видавництво МЕІ, 1995. 212 с.
  31. Засипкін А.С. Автоматизація енергетичних систем. Спеціальна системна протиаварійна автоматика 2008.
  32. Коцєєв Л.А. Автоматичне протиаварійне керування в електроенергетичних системах. Л.: Вища школа, 1990.
  33. Тамадаєв А.М., А.Т. К. II Всесоюзне науково-технічне повідомлення стійкості та надійності енергосистем СРСР // Способи екстреного аеродинамічного впливу на моменти обертання турбін ГЕС. 1969.
  34. Тамадаєв А.М., А.Т. К. II Всесоюзне науково-технічне повідомлення щодо стійкості та надійності енергосистем СРСР // Способи аварійного регулювання потужності турбін ГЕС з використанням явища негативного гідроудару 1969.
  35. Іоф'єв Б.І. Автоматичне аварійне керування потужністю енергосистем. М: Енергія,

1973. 415 с.

36. Тимофєєва К.М., Чекаловець Л.М. Аналіз та коригування дії системи регулювання К-300-240, обладнаної електроприставкою при перехідних процесах. 1968.

37. Лукутін В.А. Розрахунок динамічної стійкості електричних систем з потужними інверторними установками. // Известия ТПУ, 1958. 3. 200-206.

38. Вайнштейн Р.А., Пономарьов Є.А., Наумов В.А., Розумов Р.В. Основи протиаварійної автоматики в електроенергетичних системах 2015

39. Павлов Г.М., Меркур'єв Г.В. Автоматика енергосистем 2001. 384 с.

40. ВАТ "З ЄЕС". СТО 59012820.29.160.20.001-2012. Стандарт організації. Вимоги до систем збудження та автоматичних регуляторів збудження сильної дії синхронних генераторів. М. 2012. 67 с.

41. Зеленохат Н.І. Підвищення динамічної стійкості енергосистеми з за допомогою електричного гальмування генераторів. // Електро, № 4, 2004. С. 11-14.

42. Зеленохат Н.І., Баргуті Х.С., Ба Т.С., Негаш Г.А. Стабілізація режиму енергосистеми за допомогою керованого електричного гальмування // Вісті РАН, № 6, 1996.

43. Алексєєв Б.А. Застосування накопичувачів енергії в енергетиці // Електро, № 1, 2005. С. 42-46.

44. Birkner PJ, Brammer U., Lorenzen HW, Karner JF. Testing plant with small fast superconducting energy storage at TU Munchen // IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 3, No. 1, 1993. pp. 207-210.

45. Bautista A., Iglesias I.J., Acero J. Comparative study i simulation of optimal converter topologies for SMES systems // IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 5, No. 21, 1995. pp. 254-257.

46. Huang X., Kral S.F., Lenmann G.A., Lvovsky Y.M. 30 MW Babcock and Wilcox program for utility applications // IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 5, No. 2, 1995. pp. 428-432

47. Ueda K., Ageta T., Nakayama S. Super-GM та інші superconductivity проекти в Japanese electric power sector // IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 7, No.

2, 1997. pp. 245-249.

48. Mitani Y., Tsuji K. Power system stabilization by superconducting magnetic energy storage connected to rotating exciter // IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 3, No. 1, 1993. pp. 219-222.

49. Rogers JD. 30-MJ SMES for Utility Transmission Stabilization // Proceedings of IEEE, Vol. H, No. 9, 1983. pp. 1099–1107.

50. Агарков О.А., Воропай Н.І., Кичаков В.П. Дослідження ефективності надпровідних накопичувачів електричної енергії для підвищення стійкості та живучості електроенергетичних систем // Системні оцінки ефективності та вибір напрямів технічного прогресу енергетиці, 1990. С. 132-140.

51. Ковальов Г.Ф. Методика оцінки системної ефективності накопичувачів енергії з урахуванням надійності. // Системні оцінки ефективності та Вибір напрямів технічного прогресу в енергетиці, 1990. С. 122-132.

52. Носков В.М. Надпровідникові індуктивні накопичувачі енергії енергоустановках залізничного транспорту: Дис... канд. техн. наук. 2010. 209 с.

53. Gee A.M., Robinson F., Yuan W. A superconducting magnetic energy storage-emulator/battery supported dynamic voltage restorer // IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 32, No. 1, March 2017. pp. 55-64.

54. Srinivas S.T., Rama Devi D.A. Application of superconducting magnetic energy storage (SMES) system in automatic generation control // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 3, No. 10, October 2016. pp. 839-845.

55. Mohamed A., Mamdouh A.A., Said M.M., Sayed M., Tomonobu S. A developed control strategy for mitigating wind power generation transients using superconducting magnetic energy storage with reactive powersupport // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 83, 2016. pp. 485-494.

56. Гулія Н.В. Супермаховики - із суперкарбону // Винахідник-раціоналізатор, №12, 2005.

57. Алексеев Б.А. Застосування накопичувачів в електроенергетиці // Електро, № 2, 2005. С. 48-52.

58. Kinetic Energy Storage System of Urenco // IEE Power Engineer, No. №6, 2003. pp. 26-

29.

59. Nohara T., Senaha H., Nohara S., Tsukada T. CIGRE / IEE Japan Coll.on Rotat. Elec. Mach. система. Йокохама. 29 жовтня 1997.

60. Новіков Н.Л., Новіков А.М. Молодіжна секція РНК СІГРЕ // Перспективи застосування накопичувачів енергії та інтелектуальних систем управління для розподіленої генерації, що включає відновлювані джерела енергії. 2017.

61. Мосієнко А.Б. Розробка алгоритму та системи автоматичного управління електромеханічного накопичувача для автономних енергосистем. 2004.

62. Денщиков К.К., Жук А.З., Герасимов А.Ф., Голюков М.В. Суперконденсатори у сучасній енергетиці // Вісті РАН. Енергетика, № 5, 2011. С. 121-131.

63. Аносов В.М. Методи та засоби підвищення ефективності систем тягового електроприводу автономних транспортних засобів: Дис...докт. техн. наук. 2009р.

64. Brando G., Dannier A., Del Pizzo A., Di Noia L.P., Pisani C. Grid connection of wave energy converter in heaving mode operation by supercapacitor storage technology // IET Renewable Power Generation, Vol. 10, No. 1, 2016. pp. 88-97.