

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

«__» _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-науковою програмою «Енергетичний менеджмент,
електропостачання та інжиніринг електротехнічних комплексів»**

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**на тему: «Оцінка ефективності балансування локальних електроенергетичних
систем Microgrid постійного та змінного струму»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ОН-21мн

Лісовик Богдан Андрійович _____

Науковий керівник:

д.т.н., професор

Денисюк Сергій Петрович _____

Рецензент:

д.т.н., професор

Розен Віктор Петрович _____

Консультант з нормоконтролю:

Старший викладач, к. т. н.,

Чернецька Юлія Валентинівна _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра електропостачання

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-наукова програма «Енергетичний менеджмент, електропостачання та інжиніринг електротехнічних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Лісовику Богдану Андрійовичу

1. Тема дисертації «Оцінка ефективності балансування локальних електроенергетичних систем Microgrid постійного та змінного струму», науковий керівник дисертації Денисюк Сергій Петрович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від 29 березня 2024 р. № 1522-с
2. Термін подання студентом дисертації 11 червня 2024 року.
3. Об'єкт дослідження: Балансування локальних електроенергетичних систем Microgrid постійного та змінного струму
4. Предмет дослідження: Балансування локальних електроенергетичних систем Microgrid постійного та змінного струму на базі типових схем взаємодії
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - розглянути особливості побудови систем Microgrid, їх класифікації, особливості використання енергетичних роутерів, види та типи балансів енергії, балансування в ринкових умовах. Провести огляд літератури та аналіз існуючих систем;
 - навести особливості визначення реактивної потужності в колах несинусоїдального струму, оцінку ефективності енергетичних процесів та баланс фідерних потужностей Microgrid постійного струму за концепцією Фризе;

- сформувати базові схеми взаємодії постійного та змінного струму, провести розрахунки процесів в базових схемах взаємодії;
- проаналізувати миттєві характеристики систем та їх вплив на режим роботи, оцінити та порівняти енергетичні характеристики базових схем взаємодії, розглянути баланс генерації та споживання електроенергії на постійному та змінному струмі;
- розробити методику оцінки рівня балансування локальних електроенергетичних систем Microgrid-Nanogrid, яка включає аналіз миттєвих та інтегральних характеристик, оцінку величини небалансу.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*: професор Розен Віктор Петрович

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Розен Віктор Петрович	20.03.2024	8.04.2024
2	Розен Віктор Петрович	8.04.2024	6.05.2024
3	Розен Віктор Петрович	6.05.2024	13.05.2024
4	Розен Віктор Петрович	13.05.2024	20.05.2024
5	Розен Віктор Петрович	20.05.2024	3.06.2024

9. Дата видачі завдання 20 березня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літературних джерел за темою дослідження, розгляд особливостей побудови систем Microgrid, їх класифікація, особливості використання енергетичних роутерів, види та типи балансів енергії, балансування в ринкових умовах.	20.03.2024 - 8.04.2024	
2	Огляд особливостей визначення реактивної потужності в колах несинусоїдального струму, оцінки ефективності енергетичних процесів та балансу фідерних потужностей Microgrid постійного струму за концепцією Фризе.	8.04.2024 - 6.05.2024	

3	Формування базових схем взаємодії постійного та змінного струму, продення розрахунків процесів в базових схемах взаємодії.	6.05.2024 - 13.05.2024	
4	Аналіз миттєвих характеристик систем та їх вплив на режим роботи, оцінка та порівняння енергетичних характеристики базових схем взаємодії, визначення балансу генерації та споживання електроенергії на постійному та змінному струмі.	13.05.2024 - 20.05.2024	
5	Розробка методики оцінки рівня балансування локальних електроенергетичних систем Microgrid-Nanogrid, яка включає аналіз миттєвих та інтегральних характеристик, оцінку величини небалансу.	20.05.2024 - 3.06.2024	
6	Оформлення дисертації	3.06.2024 – 9.06.2024	
7	Проходження передзахисту	10.06.2024	
8	Оформлення реферату та презентації для перевірки на плагіат та проходження та рецензування	12.06.2024	
9	Захист дисертації	13.03.2024	

Студент

Богдан ЛІСОВИК

Науковий керівник

Сергій ДЕНИСЮК

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг дисертації. Магістерська дисертація на тему: «Оцінка ефективності балансування локальних електроенергетичних систем Microgrid постійного та змінного струму» викладена на **XXX** сторінках та складається зі **ВСТУПУ**, **X** розділів та **ВИСНОВКІВ**, містить **XX** рисунків, **XX** таблиць, **XX** бібліографічних посилань.

Актуальність теми: Електроенергетична галузь перебуває у стані активного розвитку, який спричинений стрімким зниженням вартості ДРГ, та як наслідок зростанням обсягів генерування електроенергії цими джерелами, включаючи PV системи, електромобілі, накопичувачі енергії та двонаправлені інтелектуальні системи управління енергією. Наявність таких складових в мережах створює серйозні виклики перед енергосистемою, через непостійність генерування електроенергії такими джерелами як сонячні панелі та вітряки, графік генерування електроенергії яких є досить мінливим та залежить насамперед від географічного розташування та погодних умов. Впоратись з даними викликами можна за рахунок формування систем Microgrid, проте такі системи, до складу яких може входити різнотипна генерація, потребують нового підходу до балансування генерації та споживання електроенергії. Для ефективного балансування таких систем виникає потреба в створенні нових методів аналізу та оцінки.

Мета: Оцінка методів балансування в Microgrid постійного та змінного струму

Задачі:

1. Провести аналіз локальних електроенергетичних систем Microgrid постійного та змінного струму, надати класифікацію, розглянути види балансів в локальних електроенергетичних системах Microgrid та балансування в електроенергетичних системах Microgrid за допомогою споживачів електричної енергії.
2. Розглянути балансування складових електроенергії в локальних електроенергетичних системах, визначення реактивної потужності у колах

несинусоїдального струму, оцінку ефективності енергетичних процесів та баланс потужностей за концепцією Фризе.

3. Сформувати та провести розрахунок процесів в базових схемах взаємодії постійного та змінного струму.
4. Провести підведення балансу в локальних електроенергетичних системах Microgrid-Nanogrid, проаналізувати та оцінити миттєві та енергетичні характеристики базових схем взаємодії.
5. Розглянути особливості оцінки рівня балансування та сформувати методику «Оцінки рівня балансування».

Об'єкт дослідження: Локальні електроенергетичні системи Microgrid постійного та змінного струму

Предмет дослідження: Балансування електроенергетичних систем Microgrid постійного та змінного струму.

Методи дослідження: Комплексне числення, математичне моделювання режимів роботи для базових схем взаємодії за різних параметрів елементів, порівняння миттєвих, енергетичних характеристик, методика оцінки рівня балансування.

Наукова новизна роботи:

1. Розглянуто особливості побудови систем Microgrid, їх класифікацію, будову та аналіз основних елементів, особливості використання енергетичних роутерів, види та типи балансів енергії, а також балансування в ринкових умовах. Проведено огляд літератури та аналіз існуючих систем, використано реальні приклади та дані. Сформовано детальну структуру, визначено основні компоненти та принципи їх балансування.
2. Наведено особливості визначення реактивної потужності в колах несинусоїдального струму, проведено оцінку ефективності енергетичних процесів та баланс фідерних потужностей Microgrid постійного струму за концепцією Фризе. Використано теоретичні основи та аналітичні методи для оцінки різних аспектів балансування. Забезпечено глибоке розуміння процесів балансування в локальних системах, що дозволяє розробити ефективні методи для їх оптимізації.

3. Сформовано базові схеми взаємодії постійного та змінного струму, до складу яких входить різна кількість генераторів та навантажень, проведено розрахунки процесів в базових схемах взаємодії. Застосовано методи комплексного числення для розрахунку процесів в базових схемах взаємодії змінного струму. Отримані результати дозволяють підвести будь-яку реальну систему Microgrid-Nanogrid до базової схеми взаємодії та розрахувати процеси.
4. Проаналізовано миттєві характеристики систем та їх вплив на режим роботи, оцінено та порівняно енергетичні характеристики базових схем взаємодії, розглянуто баланс генерації та споживання електроенергії на постійному та змінному струмі за рахунок моделювання режимів роботи систем та побудови графіків та часових діаграм. Визначено ключові напрями для покращення балансування, що дозволяє підвищити ефективність та стабільність роботи систем Microgrid-Nanogrid.
5. Розроблено методику оцінки рівня балансування локальних електроенергетичних систем Microgrid-Nanogrid, яка включає аналіз миттєвих та інтегральних характеристик, оцінку величини небалансу, розробку та впровадження заходів балансування. Використано систематичний підхід, який базується на розрахунку енергетичних та інтегральних характеристик. Методика дозволяє ефективно оцінювати та коригувати процеси що протікають в системі, що дає змогу забезпечити їх стабільну та ефективну роботу.

Практичне значення одержаних результатів: полягає у можливості забезпечити оптимізацію роботи локальних електроенергетичних систем Microgrid та Nanogrid. Врахування особливостей побудови, класифікації та аналізу основних елементів, зокрема використання енергетичних роутерів, дозволяє формувати детальні структури та визначати основні принципи їх балансування.

Розрахунок процесів у базових схемах взаємодії постійного та змінного струму, включаючи різну кількість генераторів та навантажень, дозволяє адаптувати будь-яку реальну систему Microgrid-Nanogrid до базової схеми і забезпечити точні розрахунки процесів. Аналіз миттєвих характеристик та енергетичних показників системи, моделювання режимів роботи та побудова графіків дає можливість

визначити ключові напрями покращення балансування, підвищуючи ефективність та стабільність роботи.

Розроблена методика оцінки рівня балансування, що включає аналіз миттєвих та інтегральних характеристик, оцінку величини небалансу та впровадження заходів балансування, дозволяє ефективно оцінювати та коригувати процеси в системі, забезпечуючи їх стабільну та ефективну роботу. Використання систематичного підходу на основі розрахунку енергетичних характеристик сприяє зниженню витрат на обслуговування та підвищенню якості електропостачання, що має важливе практичне значення для оптимізації локальних електроенергетичних систем.

Апробація результатів дисертації. Результати магістерської дисертації були оприлюднені:

OPTIMIZATION OF THE LOCAL MARINE ENERGY SYSTEM WITH DIESEL-GENERATORS. – International Competition of Student Scientific Works “Black Sea Science 2023”

Ключові слова: Microgrid, Nanogrid, балансування, енергетичних роутер, базова модель ваємодії, математичне моделювання режиму, миттєві характеристики, енергетичні характеристики, обмінна потужність, потужність Фризе.

ABSTRACT

Structure and scope of the dissertation: The master's thesis on the topic: “Evaluation of the efficiency of balancing local electric power systems Microgrid DC and AC” is set out on XXX pages and consists of INTRODUCTION, X chapters and CONCLUSIONS, contains XX figures, XX tables, XX bibliographic references.

Actuality of theme: The electric power industry is in a state of active development, which is caused by the rapid decline in the cost of renewable energy sources, and as a result, the growth of electricity generation by these sources, including PV systems, electric vehicles, energy storage and bidirectional intelligent energy management systems. The presence of such components in the grid poses serious challenges to the power system due to the inconsistency of electricity generation by sources such as solar panels and wind turbines, whose generation schedule is quite variable and depends primarily on geographic location and weather conditions. These challenges can be overcome by creating Microgrid systems, but such systems, which may include different types of generation, require a new approach to balancing electricity generation and consumption. To effectively balance such systems, there is a need to develop new methods of analysis and evaluation

Objective: To evaluate balancing methods in DC and AC microgrid.

Objectives:

1. To analyze local DC and AC Microgrid power systems, provide a classification, consider the types of balances in local Microgrid power systems and balancing in Microgrid power systems with the help of electricity consumers.
2. Consider the balancing of electricity components in local power systems, the determination of reactive power in non-sinusoidal current circuits, the assessment of the efficiency of energy processes and the balance of capacities according to the Frisee concept.
3. To formulate and calculate processes in the basic schemes of interaction of direct and alternating current.
4. To make a balance in local power systems Microgrid-Nanogrid, to analyze and evaluate the instantaneous and energy characteristics of the basic interaction schemes.

5. To consider the features of the balancing level assessment and to formulate the methodology of “Balancing level assessment”.

Object of study: Local electric power systems Microgrid of direct and alternating current

Subject of research: Balancing of Microgrid DC and AC power systems.

Research methods: Complex calculus, mathematical modeling of operating modes for basic interaction schemes with different parameters of elements, comparison of instantaneous, energy characteristics, methods for assessing the level of balancing.

Scientific novelty of the work:

1. The features of Microgrid systems construction, their classification, structure and analysis of the main elements, features of the use of energy routers, types and types of energy balances, as well as balancing in market conditions are considered. A literature review and analysis of existing systems are conducted, real-life examples and data are used. A detailed structure is formed, the main components and principles of their balancing are determined.

2. The peculiarities of determining reactive power in non-sinusoidal current circuits are presented, the efficiency of energy processes and the balance of feeder capacities of the DC Microgrid according to the Frisee concept are evaluated. Theoretical foundations and analytical methods were used to evaluate various aspects of balancing. A deep understanding of the balancing processes in local systems is provided, which allows developing effective methods for their optimization.

3. The basic schemes of interaction between direct and alternating current, which include a different number of generators and loads, are formed, and the processes in the basic interaction schemes are calculated. The methods of complex calculus are used to calculate the processes in the basic AC interaction schemes. The results obtained allow us to bring any real Microgrid-Nanogrid system to the basic interaction scheme and calculate the processes.

4. The instantaneous characteristics of the systems and their influence on the operating mode are analyzed, the energy characteristics of the basic interaction schemes are evaluated and compared, the balance of generation and consumption of electricity on

direct and alternating current is considered by modeling the operating modes of the systems and building graphs and time diagrams. The key areas for improving the balancing are identified, which allows to increase the efficiency and stability of Microgrid-Nanogrid systems.

5. The methodology for assessing the level of balancing of local power systems Microgrid-Nanogrid, which includes the analysis of instantaneous and integral characteristics, assessment of the imbalance, development and implementation of balancing measures. A systematic approach based on the calculation of energy and integral characteristics is used. The methodology allows to effectively evaluate and adjust the processes taking place in the system, which makes it possible to ensure their stable and efficient operation.

The practical significance of the results obtained is the ability to optimize the operation of local electric power systems Microgrid and Nanogrid. Taking into account the peculiarities of construction, classification and analysis of the main elements, in particular the use of energy routers, allows us to form detailed structures and determine the basic principles of their balancing.

Calculation of processes in the basic schemes of AC and DC interaction, including a different number of generators and loads, allows you to adapt any real Microgrid-Nanogrid system to the basic scheme and provide accurate process calculations. The analysis of instantaneous characteristics and energy indicators of the system, modeling of operating modes and graphing makes it possible to identify key areas for improving balancing, increasing efficiency and stability of operation.

The developed methodology for assessing the level of balancing, including the analysis of instantaneous and integral characteristics, assessment of the imbalance value and implementation of balancing measures, allows to effectively assess and adjust the processes in the system, ensuring their stable and efficient operation. The use of a systematic approach based on the calculation of energy characteristics helps to reduce maintenance costs and improve the quality of power supply, which is of great practical importance for optimizing local power systems.

Approbation of dissertation results. The results of the master's thesis were published:

OPTIMIZATION OF THE LOCAL MARINE ENERGY SYSTEM WITH DIESEL-GENERATORS. - International Competition of Student Scientific Works “Black Sea Science 2023”

Keywords: Microgrid, Nanogrid, balancing, energy router, basic model of vayemodeling, mathematical modeling of the mode, instantaneous characteristics, energy characteristics, exchange power, Frisee power.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 MICROGRID ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1 Особливості побудови систем Microgrid.

1.2 Класифікація систем Microgrid

1.3 Будова та аналіз основних елементів системи Microgrid

1.4 Особливості використання енергетичних роутерів в ЛЕС

1.5 Види та типи балансів енергії в електроенергетичній системі Microgrid

1.6 Балансування в електричних мережах Microgrid за допомогою споживачів електричної енергії в ринкових умовах.

Висновки до розділу 1

РОЗДІЛ 2 БАЛАНСУВАННЯ СКЛАДОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

2.1 Балансування електроенергетичних систем

2.2 Реактивна потужність в колах несинусоїдального струму

2.3 Оцінка ефективності енергетичних процесів

2.4 Баланс фідерних потужностей Microgrid постійного струму за концепцією Фризе

Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ В БАЗОВИХ СХЕМАХ ВЗАЄМОДІЇ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1. Розрахунок процесів в системі 1 генератор 1 навантаження

3.1.1 Розрахунок процесів в системі 1 генератор 1 навантаження постійного струму

3.1.2 Розрахунок процесів в системі 1 генератор 1 навантаження змінного струму

3.2 Розрахунок процесів в системі 1 генератор 2 навантаження

3.2. Розрахунок процесів в системі 1 генератор 2 навантаження постійного струму

3.2.2 Розрахунок процесів в системі 1 генератор 2 навантаження змінного струму

3.3 Розрахунок процесів в системі 2 генератора 1 навантаження

3.3.1 Розрахунок процесів в системі 2 генератора 1 навантаження постійного струму

3.3.2 Розрахунок процесів в системі 2 генератора 1 навантаження змінного струму

3.4 Розрахунок процесів в системі 2 генератора 2 навантаження

3.4.1 Розрахунок процесів в системі 2 генератора 2 навантаження постійного струму

3.4.2 Розрахунок процесів в системі 2 генератора 2 навантаження змінного струму

Висновки до розділу 3

РОЗДІЛ 4 НАПРЯМКИ ПІДВЕДЕННЯ БАЛАНСУ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ MICROGRID-NANOGRID

4.1 Аналіз миттєвих характеристик та оцінка якісного впливу узгодженості та неузгодженості параметрів елементів на режим роботи системи

4.2 Оцінка та порівняння енергетичних характеристик базових схем взаємодії та підведення балансу

4.3 Баланс генерації електроенергії на стороні генерування

4.3.1 Баланс генерації електроенергії постійного струму

4.3.2 Баланс генерації електроенергії змінного струму

4.3.3 Баланс генерації електроенергії постійно-змінного струму

4.4 Баланс генерації електроенергії на стороні споживання

4.4.1 Баланс споживання електроенергії постійного струму

4.4.2 Баланс споживання електроенергії змінного струму

4.4.3 Баланс споживання електроенергії постійно-змінного струму

Висновки до розділу 4

РОЗДІЛ 5 МЕТОДИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ РІВНЯ БАЛАНСУВАННЯ

5.1 Особливості оцінки рівня балансування

5.2 Методика «Оцінка рівня балансування»

Висновки до розділу 5

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АС (alternating current) – змінний струм

DC (direct current) – постійний струм

DMS (Demand Side Management) – керування з боку попиту;

СЕП – система електропостачання;

ОСР – оператор системи розподілу

ОСП – оператор системи передачі

ЛЕП – лінія електропередач;

ККД – коефіцієнт корисної дії

ДРГ – джерела розосередженої генерації;

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;

ЕЕС – електроенергетична система;

ЛЕС – локальна електроенергетична система.

ВСТУП

Електроенергетична галузь перебуває у стані активного розвитку, який спричинений стрімким зниженням вартості ДРГ, та як наслідок зростанням обсягів генерування електроенергії цими джерелами, включаючи РВ системи, електромобілі, накопичувачі енергії та двонаправлені інтелектуальні системи управління енергією [1]. Наявність таких складових в мережах створює серйозні виклики перед енергосистемою, через непостійність генерування електроенергії такими джерелами як сонячні панелі та вітряки, графік генерування електроенергії яких є досить мінливим та залежить насамперед від географічного розташування та погодних умов. У [2] представлено три основні виклики, які спричиняє поява ВДЕ:

1) Надмірні коливання, які не можна збалансувати достатньо швидко.

Основним викликом при збільшенні інтеграції ВДЕ до енергетичної системи є короточасні коливання навантаження, викликані погодними явищами.

Короточасні коливання що виникають в мережах, що містять ВДЕ, котрі залежать від погодних умов призводять або до підвищення, або до зниження обсягів генерації електроенергії, що за інших рівних умов спричиняє дисбаланс між попитом та пропозицією. Підвищення потужностей ВДЕ та, разом з цим, обсягу генерації електроенергії, може призвести до дисбалансу попиту та пропозиції електроенергії, що в свою чергу є істотним викликом для енергетичної системи.

2) Надлишок електроенергії в разі низьких обсягів споживання та високих обсягів генерування. Надлишок електроенергії виникає в тому разі, якщо обсяг генерування на поточний момент перевищує обсяг попиту. Ймовірність таких ситуацій підвищується, коли встановлено велика кількість генеруючих потужностей з ВДЕ. В разі сприятливих погодних умов, за яких працює ВЕС та СЕС, необхідно підтримувати роботу атомних електростанцій, коли попит є низьким. Це є проблемою, оскільки надлишок генерування в мережу викликає дисбаланс, через що зростає частота в мережі змінного струму.

3) Дефіцит електроенергії в разі високих обсягів споживання та низьких обсягів генерування. На відміну від надлишку електроенергії, дефіцит виникає в тих випадках, коли попит на електроенергію перевищує пропозицію. Як правило, такі

ситуації виникають, якщо, з одного боку, обсяг генерації електроенергії з відновлюваних джерел низький, а з іншого – попит домогосподарств та промислових підприємств залишається високим. Така ситуація може виникнути, коли на заміну все більшій кількості традиційних електростанцій приходять відновлювані джерела енергії, причому дефіцит може викликати падіння частоти в мережі змінного струму.

Таблиця 1 – Зв'язок з викликами варіантів балансування

Варіант балансування	Виклик 1 Колив. ВДЕ	Виклик 2 Надл. електроен.	Виклик 3 Брак електрэнерг.
Оптимізація поєднання вітрової та сонячної генерації	++	++	++
Оптимізація розміщення потужностей ВДЕ	++	+	+
Оптимізоване використання традиційних та біогаз. потужностей	+++	++	++
Зберігання електроенергії за допомогою гідроакумулювання	+++	+++	++
Скорочення електроенергії, отриманої за рахунок ВДЕ		+++	
Експорт надлишкової електроенергії	+	+++	+
Додаткові варіанти балансування			
Регулювання попиту	++	+++	+++
Покращене прогнозування погоди	+++	++	++
Інші технології зберігання (P-t-X, батареї, CAS)	+++	+++	+++

Інтеграція та подальше збільшення ВДЕ викликає потребу у швидкому відновленні співвідношення між попитом та пропозицією в електроенергетичних системах, що реалізується за рахунок використання балансуючих потужностей, до яких, узагальнюючи можна віднести:

- швидкоманеврені потужності;
- потужності акумулювання електричної енергії [2].

Впоратись з даними викликами можна за рахунок формування систем Microgrid, проте такі системи, до складу яких може входити різнотипна генерація, потребують нового підходу до балансування генерації та споживання електроенергії. Для ефективного балансування таких систем виникає потреба в створенні нових методів методах аналізу та оцінки.

Метою роботи є оцінка методів балансування в Microgrid постійного та змінного струму.

Для досягнення поставленої мети виконано:

1. Розглянуто особливості побудови систем Microgrid, їх класифікацію, будову та аналіз основних елементів, особливості використання енергетичних роутерів, види та типи балансів енергії, а також балансування в ринкових умовах. Проведено огляд літератури та аналіз існуючих систем, використано реальні приклади та дані. Сформовано детальну структуру, визначено основні компоненти та принципи їх балансування.
2. Наведено особливості визначення реактивної потужності в колах несинусоїдального струму, проведено оцінку ефективності енергетичних процесів та баланс фідерних потужностей Microgrid постійного струму за концепцією Фризе. Використано теоретичні основи та аналітичні методи для оцінки різних аспектів балансування. Забезпечено глибоке розуміння процесів балансування в локальних системах, що дозволяє розробити ефективні методи для їх оптимізації.
3. Сформовано базові схеми взаємодії постійного та змінного струму, до складу яких входить різна кількість генераторів та навантажень, проведено розрахунки процесів в базових схемах взаємодії. Застосовано методи комплексного числення для розрахунку процесів в базових схемах взаємодії змінного струму. Отримані результати дозволяють підвести будь-яку реальну систему Microgrid-Nanogrid до базової схеми взаємодії та розрахувати процеси.
4. Проаналізовано миттєві характеристики систем та їх вплив на режим роботи, оцінено та порівняно енергетичні характеристики базових схем взаємодії, розглянуто баланс генерації та споживання електроенергії на постійному та змінному струмі за рахунок моделювання режимів роботи систем та побудови графіків та часових діаграм. Визначено ключові напрями для покращення балансування, що дозволяє підвищити ефективність та стабільність роботи систем Microgrid-Nanogrid.
5. Розроблено методику оцінки рівня балансування локальних електроенергетичних систем Microgrid-Nanogrid, яка включає аналіз миттєвих та інтегральних характеристик, оцінку величини небалансу, розробку та впровадження заходів балансування. Використано систематичний підхід, який базується на розрахунку

енергетичних та інтегральних характеристик. Методика дозволяє ефективно оцінювати та коригувати процеси що протікають в системі, що дає змогу забезпечити їх стабільну та ефективну роботу.

РОЗДІЛ 1 MICROGRID ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1 Особливості побудови систем Microgrid.

На сьогоднішній день електроенергетична галузь перебуває у стані активного розвитку, який спричинений стрімким зниженням вартості джерел розосередженої генерації, та як наслідок зростанням обсягів генерування електроенергії цими джерелами, включаючи PV системи, що використовуються як в приватних домогосподарствах так і в комерційних цілях, електромобілі, накопичувачі енергії та двонаправлені інтелектуальні системи управління енергією [1]. Наявність перерахованих елементів в мережах створює серйозні виклики перед енергосистемою, через непостійність генерування електроенергії таким джерелами як сонячні панелі та вітряки, графік генерування електроенергії яких залежить від погодних умов. Впоратись з даними викликами можна за рахунок формування систем Microgrid, які дозволять усунути низку проблем та забезпечити:

- **надійність:** надійне електропостачання електроенергії незалежно від стану зовнішньої мережі, що досягається за рахунок переходу системи в ізолюваний (острівний) режим роботи;
- **стабільність ціни:** відносна стабільність ціни на електроенергію дає можливість захиститись від небажаних коливань цін на ринку електроенергії за рахунок власної генерації та накопичувачів;
- **енергоефективність:** розміщення генераторів та накопичувачів електроенергії поблизу місць її споживання дозволяє скоротити протяжність ЛЕП, з чого слідує зменшення втрат електроенергії при її передачі, в результаті чого збільшується ККД системи;
- **охорону навколишнього середовища** за рахунок використання ВДЕ та екологічно чистої енергії;
- **масштабованість:** можливість пропорційно збільшувати пропозицію відповідно до росту попиту за рахунок встановлення додаткових генераторів/накопичувачів. Якщо зобразити масштабованість на графіку, це мало вигляд по горизонталі (зростання населення) по вертикалі [2].

Найбільш вдалим та відомим широкому загалу визначення системи Microgrid, запропоноване Департаментом енергетики США визначає такі системи наступним чином:

Microgrid – група взаємопов'язаних навантажень та розосереджених енергетичних ресурсів у рамках встановлених електричних межах, що діє як єдиний керований об'єкт мережі та може підключатись та відключатись від мережі, щоб забезпечити її можливість працювати як у підключеному, так і в підключеному (острівному) режимі [4].

Отже, будь-яку СЕП (промислового підприємства, невеликого міста або його частини, с/г району) або її частину (лінію, фідер, відгалуження), що може відключитись комутаційним апаратом в точці приєднання до зовнішньої мережі (ОСП чи ОСР... тощо) та працювати автономно, покриваючи тривалий час потребу в попиті з боку споживання на заданому рівні за рахунок власної генерації можна розцінювати як систему Microgrid.

Повноцінна система Microgrid, яка за своїм характером є інтегрованою електроенергетичною системою складається 5 основних компонентів:

- 1) джерела розосередженої генерації;
- 2) гнучкі навантаження;
- 3) розосереджені накопичувачі енергії;
- 4) системи керування;

5) точки загального підключення компонентів, за рахунок чого система працює в узгодженому та керованому режимі як при підключеному до зовнішньої мережі (паралельному) стані, так і у відключеному (ізолюваному).

1.2 Класифікація систем Microgrid

Будь яку електроенергетичну систему Microgrid можна класифікувати за трьома критеріями, якими є переважаючий рід струму, рівень генерації та номінальний рівень напруги в системі.

Першим критерієм за яким можна класифікувати системи Microgrid є рід струму, який є переважаючим в системі, що може мати наступне виконання:

- Microgrid постійного струму (DC Microgrid);

- Microgrid змінного струму (AC Microgrid);
- Microgrid комбінованого струму (AC/DC Microgrid).

Другим критерієм є рівень генерації у системі – що включає потужність яка генерується у системі за рахунок ДРГ та віддається накопичувачами, рівень якої може підтримуватись у системі певному тривалому періоді (табл. 1).

Третім критерієм є рівень напруги, який є базовим у системі Microgrid, що залежить насамперед від архітектури системи, щільності навантажень та відстаней між генераторами та споживачами. Адаптуємо запропоновану в [3] класифікацію Microgrid за рівнем генерації, у відповідності до найближчих лінійних значень напруги (табл. 1.1), які широко використовуються в електричних мережах змінного струму в Україні. Звичайно, що Microgrid можуть працювати на будь-яких номіналах, проте у випадку паралельної роботи з зовнішньою електромережою чи при безпосередньому живленні від неї використання стандартних рівнів напруги не ускладнюватиме ці процеси.

Таблиця 1.1

Класифікація систем Microgrid за рівнем генерації електроенергії [3]

№ з/п	Назва	Рівень генерації	Приклад використання розосередженої генерації	Номінальне значення напруги в системі	Типова площа, км ²
1	Системи електрифікації сільських районів	Понад 100 МВт	Системи генерації сільської місцевості у віддалених географічних районах	35 кВ	15-90
2	Підстанція	5-20 МВт, > 20 МВт	Районні підстанції енергосистем з дизельними станціями	10 кВ	5-30
3	Об'єкт що має декілька навантажень	< 2 МВт, 2-5 МВт	Підстанції в лікарнях, школах, готельних комплексах	6 кВ	1-10
4	Енергетичний вузол розосередженої генерації	До 100 кВт	Підстанції в окремих приватних будинках населених пунктів	0,4 кВ	< 0,1

1.3 Будова та аналіз основних елементів системи Microgrid

Проаналізуємо складові частини системи Microgrid на прикладі комбінованої моделі ЕЕС AC/DC Microgrid, що наведена на рис. 1.1, на якій всі складові під'єднано до центрального контролеру.

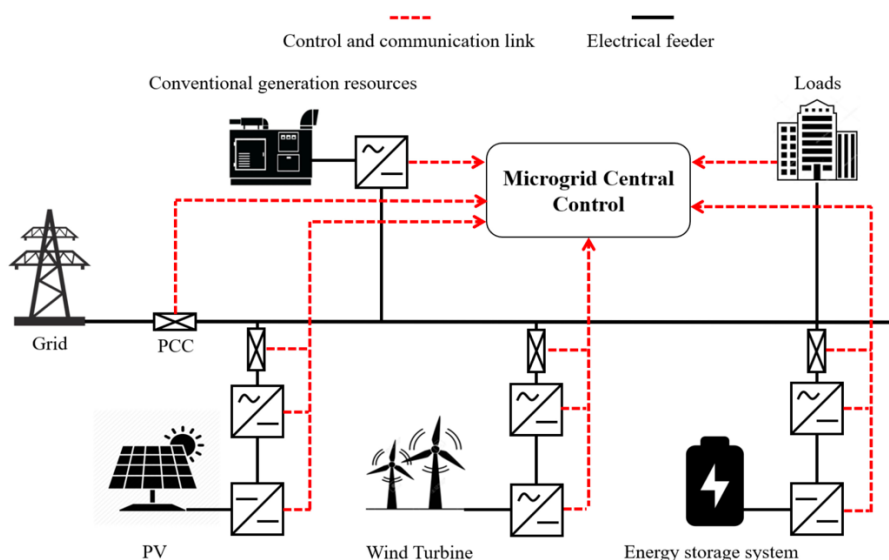
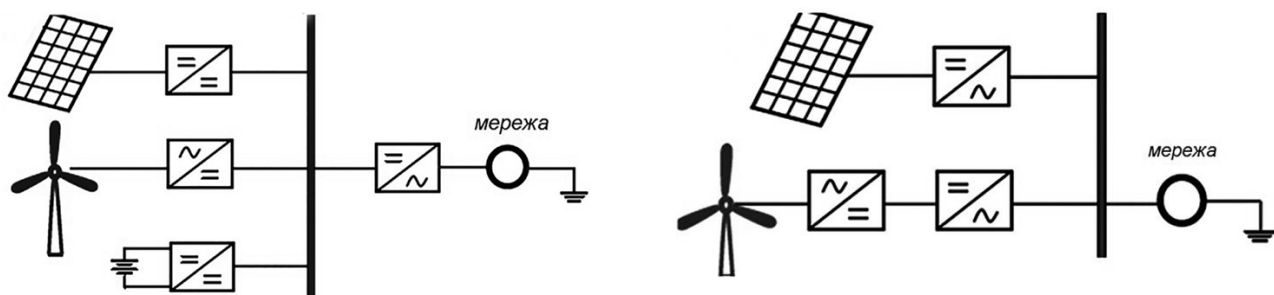


Рисунок 1.1 – Модель ЕЕС AC/DC Microgrid [5]

Комбіновані Microgrid можуть мати спільну шину постійного струму (рис.2.2. а), або спільну шину змінного струму (рис. 2.2. б).



а) зі спільною шиною постійного струму

б) зі спільною шиною змінного струму;

Рисунок 1.2 – Комбінована ЕЕС Microgrid [6]

Наведена на рис. 1.1 модель AC/DC Microgrid складається з 5 основних компонентів, які перераховано в пункті 1.1. Проаналізуємо кожен з них відповідно до наведеного порядку.

Джерела розосередженої генерації.

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) визначає розподілену генерацію як «Виробництво електроенергії на об'єктах, які є достатньо меншими за центральні електростанції, для забезпечення взаємозв'язку майже в будь-якій точці енергосистеми» [7]. Джерела розосередженої генерації можуть бути диспетчеризованими, тобто таким, що потребують оперативного контролю та втручання в процеси генерації та недиспетчеризованими.

До диспетчеризованих джерел можна віднести генератори на базі двигуна внутрішнього згорання та паливні елементи, до недиспетчеризованих PV системи, вітрогенератори, які встановлюються зазвичай в місцях споживання електроенергії. Порівняльна характеристика ДРГ, що застосовуються в системах Microgrid наведено в **табл. 1.2**. Наведені види характеризуються низькою вартістю експлуатації, високою ефективністю при широкому діапазоні зміни навантаження, зовнішніми характеристиками, що регулюються, високою надійністю та стійкістю до провалів напруги, що є дуже актуальним для систем Microgrid.

Таблиця 1.2

Тип	Елемент	Тип вихідного сигналу	Потужність/Ємність	Вартість генерації	Переваги	Недоліки
Диспетчеризовані	Когенераційні установки	АС	20 кВт – 10 МВт	–	- тривале постачання енергії; - швидкий запуск; - варіативність палива.	- викиди парникових газів; - шум.
	Дизель-генератор	АС	20 кВт – 10 МВт	125-300		
	Газові турбіни	АС	50 кВт – 5 МВт	250-600		
	Паливні комірки	АС	50 кВт – 1 МВт	1500-3000		
	Мікротурбіни	АС	25 – 100 кВт	350-750		
Недиспетчеризовані	PV панелі	DC	10 кВт – 300 МВт	–	- чиста енергія; - не потребує первинного палива.	- нетривале постачання енергії; - високі капітальні витрати на спорудження; - залежність від географічного розташування.
	ГАЕС	АС	50 кВт – 30 МВт	–		
	Вітрові турбіни	АС	10 кВт – 300 МВт	–		
	Енергія припливів та відпливів	АС	50 кВт – 200 МВт	–		

Застосування цих генераторів стає все більш популярним з огляду на їх роль у задоволенні попиту споживачів. Ці установки розгортаються для покращення ефективності та чистоти виробництва електроенергії за рахунок використання ресурсів ВДЕ.

Розгортання РГ може підвищити стійкість енергосистеми, підтримуючи зростання різних ресурсів для часткового розподілу електроенергії; наприклад, стихійне лихо або обстріл енергетичної інфраструктури, якій переживає Україна може призвести до великомасштабних відключень, а використання різноманітних РГ гарантує, що енергосистема не знеструмиться від таких явищ.

Крім того, інтеграція ДРГ в розподільчу мережу покращує профіль напруги, зменшує втрати в лініях та знижує витрати на виробництво електроенергії. Такі РГ можуть виробляти електроенергію змінного струму, наприклад, на теплоелектроцентралях (ТЕЦ), паливних елементах та газових турбінах, або постійного струму, наприклад, на вітрових турбінах або фотоелектричних установках. Таким чином, ДГ складаються з інверторів, які перетворюють свою потужність відповідно до специфікацій енергосистеми [8].

Гнучкі навантаження

Класифікувати навантаження в Microgrid можна на критичне та некритичне, з яких останнє не вимагає підключення до їх шин або місцевих генераторів. Ці навантаження повинні мати потенціал для відключення в аварійних випадках для збереження балансу в енергосистемі. Водночас, критичні навантаження є дуже важливими та пріоритетними; деякі з них, включаючи комерційні та промислові навантаження, мають постачатися безперервно, тоді як інші можуть бути підключені до ДРГ індивідуально [9].

Для ефективної інтеграції ВДЕ в існуючу енергосистему необхідна гнучкість, яка відіграє вирішальну роль, в разі якщо ми хочемо генерувати понад 25% електронергії з ВДЕ.

Гнучкість електроенергетичної системи – здатність змінювати рівень виробництва та/або споживання електроенергії, у відповідь на інструкції або певні керуючі сигнали. Концепція гнучкості передбачає здатність системи підтримувати баланс між попитом та пропозицією в умовах невизначеності. (Demand Side Management - DMS), при цьому такі програми повинні бути ретельно розроблені для стимулювання кінцевих користувачів.

Відповідно до визначення ІЕА [10] гнучкість енергосистеми означає «ступінь, до якої енергосистема може змінити виробництво або споживання електроенергії у відповідь на очікувано чи іншу мінливість», або як «модифікація моделі генерації та/або споживання у відповідь на зовнішній сигнал (ціновий сигнал або активація) з наданням послуг в енергетичній системі».

Гнучкість характеризується двома параметрами:

1) **час відгуку** – за скільки секунд, хвилин, годин.

2) **тривалість** – протягом якого часу динамічні характеристики залишаються стійкими (хвилин, годин, днів).

В даному контексті яскравим прикладом гнучкого навантаження є споживачі регулятори, робота яких в години мінімальних/максимальних навантажень дає змогу скорегувати (вирівняти) графік навантаження в електроенергетичній системі.

Споживачі-регулятори – це споживачі електричної енергії, режим роботи яких передбачає можливість обмеження або збільшення електроспоживання в періоди небалансу активних потужностей та поточних відхилень частоти в нормальному режимі роботи енергосистеми з метою відновлення вихідного значення частоти. Найефективнішими споживачами регуляторів є нагрівальні елементи, наприклад бойлери, увімкненням чи вимкненням яких можна певною мірою балансувати систему.

Розосереджені накопичувачі електроенергії.

Microgrid має незначну генеруючу здатність, враховуючи що такі ресурси як ВДЕ, можуть змінювати вихідну потужність і створювати технічні проблеми [11]. Тому Microgrid потребують системи накопичення енергії, щоб вирішити проблеми невідповідності та відповідати вимогам енергосистеми. Накопичувачі можуть зберігати та надавати надлишкову енергію, коли це необхідно. Ці системи також можуть сприяти підвищенню надійності енергосистеми, покращенню продуктивності системи Microgrid, досягненню балансу потужності між кінцевими споживачами та зменшенню пікового попиту. Пристрої накопичення також задовольняють невідповідні потреби в енергії для забезпечення безперервного енергопостачання [12]. Співставна характеристика накопичувачів, що можуть використовуватись в системах Microgrid наведено в таблиці 1.3

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики накопичувачів електроенергії [13]

Системи	Потужність та час розряду		Тривалість зберігання		Капітальна вартість	
	Номінальна потужність	Час розряду	Самостійна розрядка в день	Відповідна тривалість зберігання	\$/кВт	\$/кВтго д
ГАЕС	100–5000 МВт	1–24 г+	Дуже мала	Години – місяці	600–2000	5–100
CAES	5–300 МВт	1–24 г+	Мало	Години – місяці	400–800	2–50

Продовження таблиці 1.3

Свинцево-кислотні акумулятори	0–20 МВт	Секунди-години	0.1–0.3 %	Хвилини – дні	300–600	200–400
NiCd	0–40 МВт	Секунди-години	0.2–0.6 %	Хвилини – дні	500–1500	800–1500
NaS	50 кВт–8 МВт	Секунди-години	~20 %	Секунди-години	1000–3000	300–500
Літій-іонні акумулятори	0–100 кВт	Хвилини-години	0.1–0.3 %	Хвилини – дні	1200	600–2500
Паливні елементи	0–50 МВт	Секунди – 24 год+	Майже нуль	Години – місяці	10,000+	
Аморфні метали	0–10 кВт	Секунди – 24 год+	Дуже мала	Години – місяці	100–250	10–60
SMES	100 кВт–10 МВт	Мілісекунди – 8с	10–15 %	Хвилини – години	200–300	1000–10,000
Маховики	0 – 250 кВт	Мілісекунди	100 %	Секунди – хвилини	250–350	1000–5000

Технології накопичувачів мають перспективне застосування у розгортанні Microgrid. Використання водню для виробництва і зберігання, враховуючи, що потужність, вироблена з ВДЕ, перевищує попит на електроенергію.

1.4 Особливості використання енергетичних роутерів в ЛЕС

Впровадження великої кількості ВДЕ що входять до складу ЛЕС відповідно до концепції Smart Grid, докорінно змінює парадигму керування енергією. Ефективне балансування, що має на меті керування попитом і пропозицією електроенергії в мережі вимагає енергетичних роутерів, які можуть динамічно регулювати розподіл енергії, що відповідає концепції Енергетичний Інтернет.

Енергетичний Інтернет визначається як інноваційний підхід до керування електроенергією, заснований на використанні інтелектуальних електричних мереж, які інтегрують виробництво, передачу, зберігання, споживання та ринки електроенергії.

Основні характеристики Енергетичного Інтернету

До основних характеристик Енергетичного Інтернету можна віднести [14]:

Відкритий доступ: Енергетичний Інтернет забезпечує платформу відкритого доступу до різних видів енергії. Зберігання та використання розосереджених енергетичних ресурсів і пристроїв може здійснюватися локально, при чому торгові платформи та ринки електроенергії в ньому є відкритими.

Можливість взаємодії з різними енергетичними мережами: Енергетичний Інтернет використовує електричну енергію як основне джерело, але також інтегрує

інші види енергії, зокрема хімічну та теплову. Різні електроенергетичні мережі можуть бути поєднані в мережу Енергетичного Інтернету для забезпечення диверсифікованого споживання енергії.

Розподіленість: Енергетичний Інтернет характеризується широкомасштабною децентралізацією розосереджених енергетичних ресурсів і пристроїв зберігання енергії, які інтегруються в систему попиту, що вимагає застосування технологій розподіленого контролю та оптимального керування енергією.

Еквівалентність: Енергетичний Інтернет дозволяє виробникам і споживачам електроенергії взаємодіяти між собою без обмежень, оскільки виробництво та споживання енергії можуть бути багатосторонніми чи двонаправленими.

Можливість спільного використання: Енергетичний Інтернет забезпечує швидкий і точний обмін інформацією в режимі реального часу за допомогою передових технологій комунікації.

Функції та переваги енергетичних роутерів

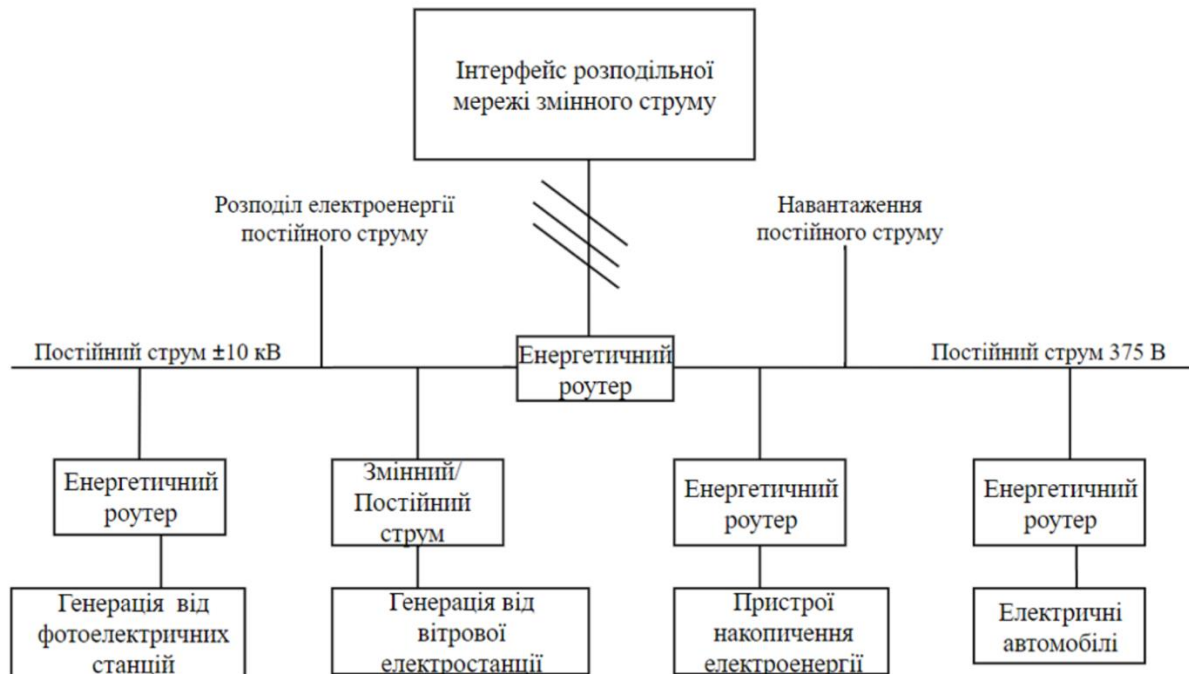


Рисунок 1.3 – Застосування енергетичного роутера [14]

Енергетичний роутер є ключовим технологічним компонентом інтелектуальної мережі, який допомагає забезпечити її роботу. Основні функції енергетичного роутера включають:

- керування потоками електроенергії розподільних електричних в мережах 10, 20 кВ у мережу 0,4 кВ;
- керування потоками електроенергії в мережі 0,4 кВ (зі споживачами, розосередженою генерацією та пристроями накопичення);
- зв'язок з іншими енергорутерами для об'єднання ЛЕС у Smart Grid;
- передачу надлишків електроенергії з мережі 0,4 кВ із ДРГ у розподільні електромережі 10, 20 кВ.

Ефекти від впровадження енергорутерів

Впровадження енергетичного роутера надає наступні позитивні ефекти:

- 1) зниження пікових навантажень у електричних мережах;
- 2) отримання надлишку потужності для підключення нових споживачів у випадках дефіциту енергії;
- 3) впорядкування процесів передачі, розподілу та споживання електроенергії для споживачів зі «складною» структурою мереж низької напруги.
- 4) підвищення надійності електропостачання та якості електроенергії у мегаполісах.

Енергетичні роутери забезпечують підключення різних гібридних джерел живлення змінного/постійного струму з різними рівнями напруги. Вони можуть доповнювати один одного на основі типу порту та потужності, що може спростити структуру та зменшити розмір окремого пристрою енергетичного роутера. Основні переваги енергетичних роутерів включають ізоляцію несправностей та збоїв, підключення розосередженої генерації до централізованої шини постійного струму та вирішення проблем відстеження та керування мережею.

Використання енергетичного роутера в Енергетичному Інтернеті відіграє ключову роль та дозволяє ефективно керувати, а отже і балансувати електроенергію в системі Microgrid. Розробка цього пристрою потребує інтеграції технологій силової електроніки, передачі даних та автоматизації.

1.5 Види та типи балансів енергії в електроенергетичній системі Microgrid

Можна виділити наступні види балансів:

- баланс матеріально-технічний;
- баланс паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР);
- баланс виробництва енергії (електричної та теплової) в ОЕС України;
- баланс електроенергії в електромережах передачі електроенергії;
- баланс електроенергії в мережах розподілу електроенергії;
- баланс енергії в локальних електроенергетичних системах (Microgrid);
- баланс електроенергії в локальних електротехнічних системах (Microgrid – Nanogrid).

Коротко розглянемо кожен баланс з перелічених.

Баланс матеріально-технічний - цей баланс відображає співвідношення між наявними матеріально-технічними ресурсами та потребами в них на виробничих та інших підприємствах. Він враховує кількість матеріалів, обладнання та запасних частин, необхідних для нормальної роботи енергосистеми.

Баланс паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) - баланс паливно-енергетичних ресурсів включає облік і розподіл всіх видів палива (вугілля, нафта, газ) та енергії (електричної, теплової), необхідних для забезпечення безперервної роботи енергосистеми. Цей баланс є ключовим для стратегічного планування та стабільності енергопостачання країни.

Баланс виробництва енергії (електричної та теплової) в ОЕС України - цей баланс показує виробництво електричної та теплової енергії в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України. Він враховує всі генератори та теплові станції, визначаючи сумарну вироблену енергію та її розподіл.

Баланс електроенергії в електромережах передачі електроенергії – баланс електроенергії в мережах передачі відображає надходження і втрати електроенергії в основних магістральних лініях електропередач. Це включає облік втрат на опір проводів, трансформаторів та інших елементів мережі.

Баланс електроенергії в мережах розподілу електроенергії – баланс розглядає електроенергію на рівні локальних мереж, які доставляють електроенергію

від основних ліній передачі до кінцевих споживачів. Включає втрати, що виникають в процесі розподілу, та визначає кількість енергії, яка фактично доходить до споживачів.

Баланс енергії в локальних електроенергетичних системах (Microgrid) – баланс стосується мікромереж, які можуть працювати як в автономному режимі, так і бути підключеними до загальної мережі. Баланс враховує генерацію енергії від місцевих джерел (сонячні панелі, вітрові турбіни), споживання, та накопичення енергії.

Баланс електроенергії в локальних електротехнічних системах (Microgrid – Nanogrid) – цей баланс подібний до попереднього, але на ще менших рівнях - наномережах, які об'єднують невеликі генератори та споживачі (наприклад, окремі будинки чи групи будівель). Він відображає детальний розподіл та облік енергії на найнижчих рівнях споживання.

1.6 Балансування в електричних мережах Microgrid за допомогою споживачів електричної енергії в ринкових умовах.

Функціонування Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України у 2024 році відбувається в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та розвитку ринкових відносин. Військові дії та руйнування електроенергетичної інфраструктури створюють значні системні та мережеві обмеження, що ускладнює балансування енергосистеми. В цих умовах, пошук нових шляхів підвищення ефективності балансування ОЕС України є критично необхідним, зокрема за рахунок залучення споживачів електроенергії та використання сучасних технологій «розумних мереж».

До 2022 року графік споживання електроенергії в ОЕС України демонстрував тенденцію до вирівнювання в денний період. Максимальні навантаження іноді спостерігалися навіть у ранкові години. Водночас, енергосистема мала наступні особливості:

Надлишок базових потужностей на атомних електростанціях (АЕС).
Надлишок негарантованої генерації від ВДЕ, особливо у денний період, через неконтрольоване будівництво протягом 2018-2021 рр. Обмеженість маневрової

генерації через зношеність обладнання теплових електростанцій (ТЕС) та теплоелектроцентралей (ТЕЦ).

Водогосподарські обмеження на гідроелектростанціях (ГЕС) та гідроакumuлюючих електростанціях (ГАЕС).

Механізми балансування в європейських країнах

Європейські енергосистеми компенсують нерівномірність графіку споживання електроенергії шляхом створення достатніх резервів потужності на маневрених агрегатах та енергоблоках. Проте, резерви потужності не є нескінченними і вимагають додаткових витрат від виробників електроенергії. Тому ринкові механізми, які регулюють обсяги споживання електроенергії залежно від балансу потужності, стають важливими. Ці механізми створюють стимули для споживачів переносити обсяги споживання на дешевші години.

Управління попитом (Demand Side Management)

Управління попитом на електроенергію (demand side management) включає вплив на обсяги або моделі споживання електроенергії кінцевими споживачами. Реагування на попит (demand response) полягає у змінах в споживанні електроенергії у відповідь на зміни умов постачання електроенергії, зокрема через економічні стимули або загрози надійності функціонування системи. Управління попитом стало актуальним під час проходження осінньо-зимового періоду 2022/2023.

Вплив війни на енергосистему

З початком повномасштабних бойових дій значна частина промислового споживання була втрачена. Графік споживання знову став двогорбим з чітко вираженими ранковими та вечірніми піками, спричиненими побутовими споживачами та електротранспортом. Збільшення коефіцієнту нерівномірності графіку споживання та дефіцит маневрових потужностей після руйнації ТЕС та ТЕЦ ускладнювали балансування.

Часткове відновлення зруйнованого обладнання та збільшення імпорту електроенергії дозволили припинити примусове обмеження споживання. Будівництво розподіленої генерації (газопоршневих та газотурбінних установок) за допомоги закордонних донорів має потенціал для покращення ситуації. Проте

бюрократичні бар'єри ускладнюють процес введення в експлуатацію нових електроустановок. Основне навантаження щодо балансування у пікові години покладається на ГЕС/ГАЕС та ТЕС, що призводить до значних витрат та зносу обладнання.

Необхідність ринкових механізмів

Ціноутворення на ринку електроенергії не відображає реальних ринкових коливань через ринкову владу окремих учасників та вплив цінових обмежень. Механізм покладання спеціальних обов'язків (ПСО) щодо забезпечення доступною електроенергією населення призводить до нерівномірного споживання та нарощування боргів. Це створює додаткові складнощі для балансування потужностей.

З метою підтримання балансу потужностей в ОЕС України, рекомендується добровільне зменшення споживання у пікові години та регулювання за допомогою цінових сигналів. Запропоновано виокремити соціально незахищених споживачів, фіксувати для них тарифи на певний період та поетапно скасувати субсидування для інших споживачів. Також рекомендується збільшити контрольованість та керованість споживання електроенергії протягом доби.

Запровадження багатозонних «розумних» лічильників та «розумних» розеток може сприяти економії коштів споживачів та балансуванню енергосистеми. Участь соціально незахищених верств населення в таких проектах потребує залучення донорської допомоги. Приклад пілотного проекту демонструє можливість зниження навантаження у пікові години та покращення прогнозованості споживання.

Висновки до розділу 1

У розділі розглянуто особливості побудови систем Microgrid, які можуть працювати як автономно, так і у зв'язку з центральною мережею, забезпечуючи високу надійність і гнучкість використання енергоресурсів. Класифікація таких систем може бути здійснена за різними ознаками, включаючи джерела енергії, тип струму, режим роботи та функціональне призначення. Основні елементи Microgrid включають генератори, накопичувачі енергії, інвертори, системи управління та

контролю, а також навантаження, кожен з яких має важливу роль у забезпеченні стабільної роботи системи. Енергетичні роутери використовуються для управління потоками енергії між джерелами та споживачами, забезпечуючи інтеграцію різних видів генерації та балансування навантаження. Види балансування енергії в системах Microgrid охоплюють постійний, змінний струм і змішане DC-AC балансування. У ринкових умовах споживачі електроенергії активно сприяють балансуванню системи, використовуючи динамічне тарифоутворення та системи управління попитом для підвищення ефективності та гнучкості Microgrid.

РОЗДІЛ 2 БАЛАНСУВАННЯ СКЛАДОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

2.1 Балансування електроенергетичних систем

Балансування ЛЕС є ключовим завданням для забезпечення стабільної, надійної та ефективної роботи енергетичних мереж. Це завдання стає особливо важливим в умовах зростаючого впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні та вітрові електростанції, які мають мінливе генерування, що залежить насамперед від погодних умов. Основні задачі та особливості балансування в ЛЕС включають наступні аспекти:

1. Управління генерацією та споживанням енергії включає забезпечення відповідності між виробництвом і споживанням енергії: це включає коригування виробництва енергії з розосереджених джерел та управління споживанням, щоб уникнути дисбалансу та інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВДЕ): включає управління змінною генерацією ВДЕ та їх інтеграцію в загальну мережу.
2. Контроль за якістю електроенергії;
3. Регулювання напруги та частоти: підтримка стабільних значень напруги та частоти в межах допустимих норм для забезпечення надійної роботи електрообладнання;
4. Компенсація реактивної потужності: забезпечення балансу активної та реактивної потужності для підтримки стабільної роботи мережі.
5. Оптимізація роботи мережі
 - мінімізація втрат енергії: зменшення втрат при передачі та розподілі електроенергії шляхом оптимізації маршрутів передачі.
 - максимізація використання місцевих ресурсів: використання місцевих джерел енергії та накопичувачів для зменшення залежності від центральних мереж.
6. Забезпечення надійності та стійкості системи:
 - кезервування та аварійне управління: забезпечення наявності резервних потужностей та швидке реагування на аварійні ситуації.

- кібербезпека: захист системи управління та комунікацій від кіберзагроз.

Дотримання балансу між генерацією та споживанням електроенергії є найголовнішою умовою стабільної роботи електроенергетичної системи. Постійно зростаюча частка ВДЕ в загальному балансі генерації, що має мінливий графік генерування, зумовлює використовувати нові підходи стосовно балансування попиту та пропозиції електричної енергії, потребуючи при цьому більш оперативно реагувати на зміни в попиту та пропозиції.

В електроенергетичних системах змінного струму небаланс генерації та споживання впливає на частоту в системі:

- частота падає, якщо споживання починає переважати над генерацією;
- частота зростає, якщо генерація починає переважати на споживанням

Стійкість вузла розосередженої генерації.

Дослідження стійкості системи, що містить ВДЕ має ряд особливостей:

- 1) робота джерел енергії на спільне навантаження з додаванням енергії в загальному вузлі постійного струму з підсумовуванням енергій джерел напруги, струму або постійної потужності.
- 2) багатоконтурність системи;
- 3) відмінність між постійними часу перехідних процесів джерел у декілька порядків.

Дані особливості дають змогу спростити процес аналізу та дослідження умов стійкості системи як в цілому, та і у випадку аналізу її окремих частин.

Фізично обґрунтований баланс електроенергії повинен базуватись на розрахунку енергетичних характеристик та показників, енергетичних функцій як на довільному інтервалі часу, та і на всьому періоді роботи системи [3.1]. Баланс складових електричної енергії може бути визначено основі миттєвих процесів, обмінних процесів... Будь-яку електроенергетичну систему можна представити як модель, з множиною підключених генераторів та навантажень $\{G\}$ та $\{N\}$.

Різкі зміни активної потужності можуть також призвести до небалансу між навантаженням і генерацією та спричинити флуктуації частоти змінного струму в

мережі. Зважаючи на ці фактори, важливо розробити **контури управління потужністю** і контролю частоти для усунення проблем якості [2.2].

Можливим шляхом забезпечення надійності є, наприклад, використання гарячого резерву, який за короткі проміжки часу дозволить перекрити переважаюче споживання над існуючим виробітком електроенергії (що можливо реалізувати за допомогою дизель-генератора). Для автономних джерел енергії серйозною економічною проблемою є вартість зберігання енергії; об'єднання сонячної й вітрової генерації в комбіновану енергосистему може зменшити потребу в акумулювальних потужностях і в кінцевому рахунку зменшити загальну вартість системи. [2.2]. електроенергії. Так, засобами вирішення проблеми флуктуації напруги при варіюванні швидкості вітру та сонячної радіації є шунтувальні фільтри, силові компенсатори, менш чутливе до дисбалансу потужності устаткування. Для передбачення імовірних режимів генерування та їх впливу на безпеку експлуатації застосовують регресійний аналіз й інші алгоритми прогнозу погоди, що дозволяють планувати роботу енергосистеми. Важливим засобом є регулювання потужності генерації системним оператором для усунення дефіциту чи профіциту, застосування засобів управління зі швидким реагуванням.

Основні джерела технологічних втрат електроенергії в електричних мережах: втрати, пов'язані з переносом навантаження через провідники ліній електропередачі (ЛЕП) та обмотки силових трансформаторів підстанцій; енергетичні втрати у залізі осердь трансформаторів у режимі холостого ходу; втрати, що виникають через випромінювання корони провідників ЛЕП; втрати енергії в компенсаційних пристроях (компенсатори на основі конденсаторних батарей, синхронні компенсатори, статичні тиристорні компенсатори тощо).

Ефективний спосіб досягнення низьких втрат при передачі у системі може включати в себе розміщення генеруючих потужностей поблизу центрів навантаження. При цьому зазначимо, що у сьогоdnішніх реаліях в Україні набуває розвитку зміна концепції оцінки електроенергії: перехід від опису в двомірній системі (кількість $\times$ вартість) до опису в тримірній системі [2.3].

Таблиця 2.1

№ з/п	Тип балансу	Складові балансу	Регулювання
1	Баланс ПЕР	Види паливно-енергетичних ресурсів (вугілля нафта, газ, НВДЕ тощо)	Регулювання видобутку, зберігання, використання, експортно-імпортних операцій
2	Баланс виробництва енергії (електричної та теплової) в ОЕС України	Виробництво електричної та теплової енергії; генерація ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС, ТЕЦ, ВДЕ	Регулювання обсягів генерації, регулювання добових графіків генерації
3	Баланс електроенергії в електромережах передачі електроенергії	Баланс активної P_1 та реактивної Q_1 потужності за першою гармонікою; виконання балансу $S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2$	Регулювання активної P_1 потужності регулюючими трансформаторами та реконфігурацією мережі; реактивної Q_1 потужності компенсаторами поздовжньої та поперечної компенсації; використання систем FACTS. Використання загальносистемних установок зберігання енергії
4	Баланс електроенергії в мережах розподілу електроенергії	Баланс активної P_1 та реактивної Q_1 потужності за першою гармонікою; виконання балансу $S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2$; врахування при необхідності потужності спотворення D , потужності Фризе Q_Φ та повного балансу: $S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D^2$; $S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + Q_\Phi^2$	Регулювання активної P_1 потужності регулюючими трансформаторами; реактивної Q_1 потужності компенсаторами поперечної компенсації; використання систем активних фільтрів для компенсації вищих гармонік та систем симетрування напруги. Використання

			установок зберігання енергії, спроможностей активних споживачів та механізмів керування попитом.
5	Баланс енергії в локальних електроенергетичних системах (Microgrid)	Баланс активної P_1 та реактивної Q_1 потужності за першою гармонікою; виконання балансу $S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2$; врахування потужності спотворення D , потужності Фризе Q_Φ , обмінних потужностей $Q_{\text{об}}$ та повного балансу: $S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D^2$; $S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + Q_\Phi^2$; баланс складових енергії на виділених інтервалах сталості структури (енергетично незмінних станах)	Регулювання активної P_1 потужності регулюючими трансформаторами; реактивної Q_1 потужності компенсаторами поперечної компенсації; використання систем активних фільтрів для компенсації вищих гармонік та систем симетрування напруги. Використання накопичувачів енергії, спроможностей активних споживачів та механізмів керування попитом.
6	Баланс електроенергії в локальних електротехнічних системах (Microgrid – Nanogrid)	Баланс за миттєвими $i(t)$, $u(t)$, $p(t)$ та інтегральними характеристиками, зокрема: активної P_1 та реактивної Q_1 потужності за першою гармонікою; виконання балансу $S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2$; врахування потужності спотворення D , потужності Фризе Q_Φ , обмінних потужностей $Q_{\text{об}}$ та повного балансу: $S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D^2$; $S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + Q_\Phi^2$; баланс складових енергії на виділених інтервалах сталості	Регулювання активної P_1 потужності регулюючими трансформаторами; реактивної Q_1 потужності компенсаторами поперечної компенсації; використання систем активних фільтрів для компенсації вищих гармонік та систем симетрування напруги. Використання накопичувачів електроенергії, алгоритмів керування попитом та пропозицією на

		структури (енергетично незмінних станах). Врахування 1-го та 2-го законів Кірхгофа.	загальносистемному рівні.
--	--	--	---------------------------

2.2 Реактивна потужність в колах несинусоїдального струму

Реактивна потужність є важливим параметром в електроенергетичних системах, який впливає на ефективність передачі та споживання електроенергії. У колах несинусоїдального струму, де форма струму і напруги відрізняється від синусоїдальної, виникають додаткові ускладнення в управлінні та компенсації реактивної потужності.

Особливості реактивної потужності в несинусоїдальних колах:

- 1. Форма сигналу:** У колах з несинусоїдальними сигналами наявність гармонік призводить до спотворення форми струму і напруги. Це ускладнює точний розрахунок реактивної потужності, оскільки класичні методи, розроблені для синусоїдальних сигналів, стають менш точними.
- 2. Гармонічний склад:** Несинусоїдальні сигнали можуть бути розкладені на ряд гармонік з різними частотами. Кожна гармоніка вносить свій вклад у загальну реактивну потужність системи, що потребує окремого аналізу та компенсації.
- 3. Компенсація реактивної потужності:** Традиційні методи компенсації реактивної потужності, такі як використання конденсаторів або індуктивностей, можуть бути недостатньо ефективними в умовах несинусоїдальних сигналів. Необхідно застосовувати спеціалізовані пристрої, такі як активні фільтри, які здатні компенсувати гармоніки та покращувати якість електроенергії.
- 4. Вплив на обладнання:** Несинусоїдальна реактивна потужність може спричиняти додаткові втрати та перегрівання обладнання, що знижує його ефективність та довговічність. Тому необхідно враховувати ці фактори при проектуванні та експлуатації електроенергетичних систем.

Методи аналізу реактивної потужності:

1. **Метод Фур'є:** Використовується для розкладу несинусоїдальних сигналів на гармонічні складові. Це дозволяє оцінити вплив кожної гармоніки на загальну реактивну потужність.
2. **Енергетичні методи:** Оцінюють баланс активної та реактивної потужності в системі, враховуючи всі гармонічні складові.
3. **Цифрове моделювання:** Використовується для точного аналізу та оптимізації системи в умовах наявності несинусоїдальних сигналів.

Узагальненням можна сказати, що управління реактивною потужністю в колах несинусоїдального струму є складним, але необхідним завданням для забезпечення стабільної та ефективної роботи електроенергетичних систем. Це вимагає використання сучасних методів аналізу та спеціалізованих компенсуючих пристроїв, які здатні працювати з гармонічними складовими струму і напруги.

2.3 Оцінка ефективності енергетичних процесів

Оцінка ефективності енергетичних процесів є ключовим аспектом управління енергетичними системами та підвищення їхньої продуктивності. Цей процес включає в себе ретельний аналіз різних параметрів та показників, що дозволяє визначити рівень використання ресурсів та визначити можливі шляхи оптимізації.

Основні аспекти оцінки ефективності енергетичних процесів включають:

1. **Енергетична продуктивність:** Оцінка виробництва енергії відносно витрат палива або інших енергетичних ресурсів. Цей показник дозволяє визначити ефективність конкретного процесу генерації енергії.
2. **Втрати енергії:** Аналіз втрат енергії під час транспортування, перетворення та використання енергії. Мінімізація цих втрат є ключовим завданням для підвищення ефективності енергетичних систем.
3. **Використання альтернативних джерел енергії:** Оцінка можливостей використання відновлювальних джерел енергії та їх впливу на загальну продуктивність системи.

4. **Ефективність використання енергії:** Аналіз рівня використання енергії у виробництві, транспортуванні та споживанні. Цей показник дозволяє визначити, наскільки ефективно використовуються енергетичні ресурси.
5. **Споживання та емісія:** Оцінка обсягів споживання ресурсів та викидів в атмосферу під час енергетичних процесів. Мінімізація споживання та емісії є важливим завданням для забезпечення сталого розвитку.

Оцінка ефективності енергетичних процесів дозволяє виявити слабкі місця та визначити можливі шляхи їх поліпшення. Цей процес є невід'ємною частиною стратегії управління енергетичними ресурсами та допомагає досягти більш ефективного використання енергії в масштабах як окремих підприємств, так і всієї енергетичної системи країни чи регіону

2.4 Баланс фідерних потужностей Microgrid постійного струму за концепцією Фризе

В рамках концепції Фризе для оцінки балансу фідерних потужностей Microgrid постійного струму використовується новий підхід до визначення реактивної потужності, що враховує несинусоїдальність електричних процесів та забезпечує істинність балансу енергетичних властивостей системи. Основні аспекти цього підходу включають:

1. **Функціональний характер викладення енергетичних властивостей:** Концепція Фризе дозволяє зберігати функціональний характер викладення енергетичних властивостей електричних кол у контексті як синусоїдних, так і несинусоїдних електричних процесів.
2. **Баланс енергії:** Цей підхід забезпечує правильний баланс між активною та реактивною потужностями за допомогою відповідних алгоритмів обчислення, що враховують несинусоїдальність фідерних напруг і струмів.
3. **Експериментальні результати:** Результати експериментальних досліджень на фідерних ділянках Придніпровської залізниці підтверджують переваги концепції Фризе порівняно з іншими підходами, зокрема з поглядами Будеану, що базуються на гармонічному розкладанні напруг і струмів.

Більш перспективною концепцію Фризе яка, поперше, направлена на збереження функціонального характеру викладення енергетичних властивостей електричних кіл при синусоїдних і несинусоїдних процесах і, подруге, забезпечує складання балансу:

$$S^2 = P^2 + Q_F^2$$

Таким чином, застосування концепції Фризе для оцінки і управління балансом фідерних потужностей Microgrid є перспективним напрямком, що сприяє підвищенню ефективності електроенергетичних систем і забезпеченню їх стабільності в умовах нестабільних електричних мереж.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі озглянуто ключові аспекти електроенергетичних систем, спеціалізованих на балансуванні енергії та оцінці ефективності процесів. Визначено, що у системах з несинусоїдальним струмом реактивна потужність грає важливу роль у забезпеченні стабільності мережі. Концепція Фризе виявляється перспективною для збалансування фідерних потужностей Microgrid, зокрема за умов нестабільних електричних мереж. Використання цієї концепції сприяє збереженню функціонального характеру властивостей електричних кіл і забезпечує істинність балансу енергетичних компонентів.

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ В БАЗОВИХ СХЕМАХ ВЗАЄМОДІЇ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

В даному розділі сформовано та розглянуто типові моделі взаємодії для систем 1Г-1Н, 1Г-2Н, 2Г-1Н, 2Г-2Н постійного та змінного струму, з чисто активним та активно індуктивним характером навантаження, проведено розрахунок їх параметрів в загальному вигляді, змодельовано режими їх роботи як для ідеалізованих випадків, за яких параметри парних елементів за їх наявності ($E_{Г1}$ та $E_{Г2}$, R_1 та R_2 , L_1 та L_2 , $R_{Н1}$ та $R_{Н2}$, $L_{Н1}$ та $L_{Н2}$) рівні один відносно одного, так і для випадків, за яких виникає нерівність між цими параметрами, через що може виникати небаланс в системі та неоптимальний режим роботи. Продемонстровано якісний вплив зміни параметрів на режим роботи системи на графіках напруги, струму та потужності для моделей систем постійного струму та на часових діаграмах миттєвих напруг, струмів та повних потужностей для моделей систем змінного струму.

3.1 Розрахунок параметрів для моделей систем 1Г-1Н, 1Г-2Н, 2Г-1Н, 2Г-2Н постійного та змінного струму

Для всіх моделей систем постійного струму (1Г-1Н, 1Г-2Н, 2Г-1Н, 2Г-2Н) індуктивними елементами, що входять до складу ліній та навантажень будемо нехтувати, так як розглядатимемо виключно ідеалізовані кола, в яких при проходженні постійного струму в усталених режимах роботи напруга на індуктивних елементах відсутня, опору такі елементи не чинять та є по суті звичайними провідниками.

3.1.1 Система 1 генератор 1 навантаження

Розглянемо систему, яка складається одного однофазного генератора та одного навантаження (1Г-1Н), в якій всі елементи, як показано на структурній схемі (рис. 3.1) з'єднані послідовно. Виділимо перетин А-А та розрахуємо параметри для моделей систем постійного та змінного струму.

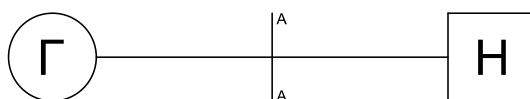


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи 1Г-1Н

Система 1 генератор 1 навантаження постійного струму

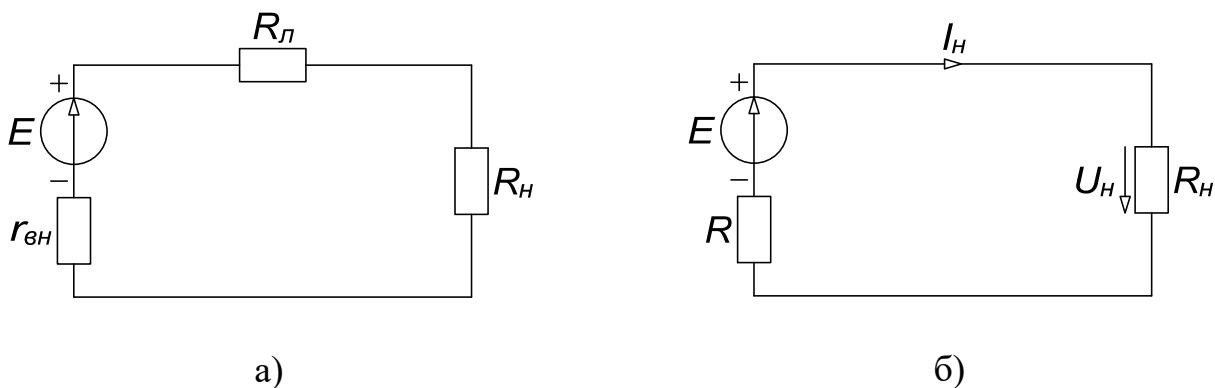


Рисунок 3.2 – Схема заміщення системи 1Г-1Н DC

Схема заміщення **рис. 3.2 а)** являє замкнутий контур, що містить еквівалентну схему джерела енергії, параметрами якого є ЕРС E та внутрішній опір джерела $r_{\text{вн}}$, опір лінії $R_{\text{л}}$ та навантаження з опором $R_{\text{н}}$. Окрім параметрів E та $r_{\text{вн}}$, джерело енергії також можна охарактеризувати й іншими парами параметрів: E та $I_{\text{КЗ}}$ або $I_{\text{КЗ}}$ та $r_{\text{вн}}$.

Параметри джерела в загальному випадку можна визначити експериментально за режимами неробочого ходу (НХ) та короткого замикання (КЗ) або за двома іншими режимами, якщо зазначені режими є неприпустимими для джерела. Для простішого представлення знехтуємо опором ліній та розглянемо ці режими.

1. Режим НХ, при якому $R_{\text{н}} = \infty$; $I_{\text{н}} = 0$; $U_{\text{НХ}} = E$. В даному режимі напруга НХ $U_{\text{НХ}}$ збігається з ЕРС джерела E .
2. Режим КЗ, при якому $R_{\text{н}} = 0$; $I_{\text{н}} = I_{\text{КЗ}}$; $U_{\text{н}} = 0$. В даному режимі внутрішній опір джерела визначається за струмом КЗ: $r_{\text{вн}} = E/I_{\text{КЗ}}$
3. Режим, близький до НХ, при якому $R_{\text{н}} \gg r_{\text{вн}}$;

$$E = U_{\text{н}} + I_{\text{н}} r_{\text{вн}} = I_{\text{н}} R_{\text{н}} + I_{\text{н}} r_{\text{вн}}.$$

Оскільки $I_{\text{н}} R_{\text{н}} \gg I_{\text{н}} r_{\text{вн}}$, то $E \approx U_{\text{н}} = I_{\text{н}} R_{\text{н}} = \text{const.}$

За таких умов у разі зміни опоры та струму навантаження напруга джерела енергії практично не змінюється, через що його зручно розглядати як джерело напруги (джерело ЕРС) (**рис. 3.3 а**).

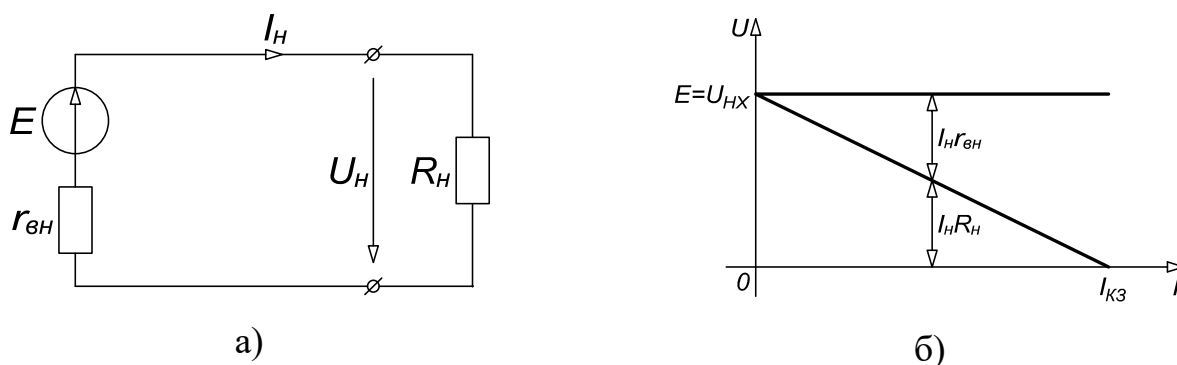


Рисунок 3.3 – Джерело напруги (ЕРС)

а) – еквівалентна схема джерела ЕРС; б) – ВАХ ідеального та реального джерел ЕРС

Якщо $r_{\text{вн}} = 0$, тоді $E = U_H$ за будь-якого струму, то джерело енергії буде ідеальним джерелом ЕРС.

Ідеальне джерело ЕРС – це джерело енергії, напруга якого не залежить від значення струму, що проходить через нього.

Струм КЗ ідеального джерела ЕРС: $I_{\text{КЗ}} = E/r_{\text{вн}} \rightarrow \infty$, тому режим КЗ є неприпустимим для ідеального джерела напруги (ЕРС).

Реальне джерело енергії для будь-якого режиму можна подати у вигляді ідеального джерела ЕРС, до якого послідовно підключений внутрішній опір $r_{\text{вн}}$:

$$U_H = E - I r_{\text{вн}}$$

4. Режим, близький до КЗ, при якому $R_H \ll r_{\text{вн}}$:

$$I_H = \frac{E}{R_H + r_{\text{вн}}} = \frac{I_{\text{КЗ}}}{1 + R_H/r_{\text{вн}}} \approx I_{\text{КЗ}} = \text{const}$$

За таких умов при зміні внутрішнього опору генератора $r_{\text{вн}}$ струм у колі практично не змінюється на відміну від напруги, яка змінюється в широких межах, через що в такому випадку джерело енергії зручно розглядати як джерело струму (рис. 3.4 а).

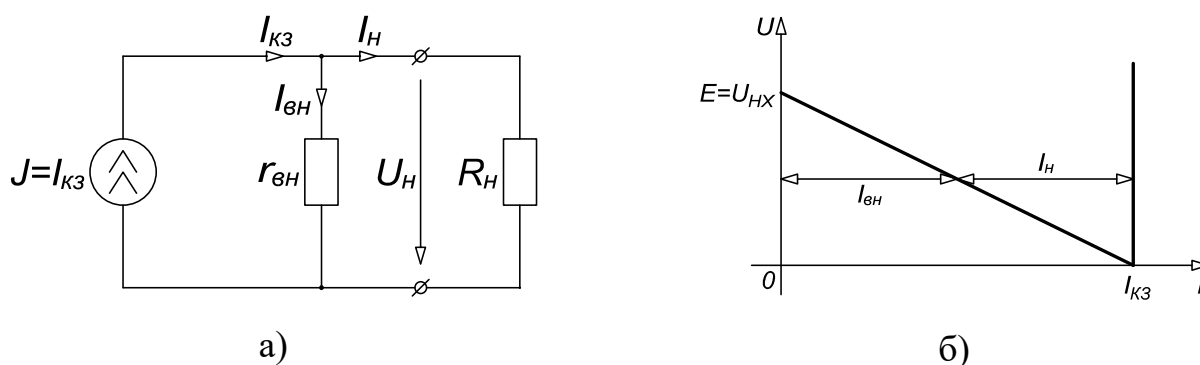


Рисунок 3.4 – Джерело струму

а) – схема заміщення джерела струму; б) – ВАХ ідеального та реального джерел ЕРС

Якщо $r_{\text{вн}} \rightarrow \infty$, то $I_{\text{н}} = I_{\text{кз}} = J$ за будь-якої напруги, то джерело енергії можна вважати ідеальним джерелом струму.

Ідеальне джерело струму – це джерело енергії, струм J якого не залежить від значення напруги на його затискачах.

Режим НХ є неприпустимим для ідеального джерела струму.

Для реального джерела енергії: $E = U_{\text{н}} + I_{\text{н}} r_{\text{вн}}$, звідси:

$$\frac{E}{r_{\text{вн}}} = \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{вн}}} + I_{\text{н}}; \quad J = I_{\text{вн}} + I_{\text{н}}; \quad I_{\text{н}} = J \frac{r_{\text{вн}}}{r_{\text{вн}} + R_{\text{н}}} = J \frac{G_{\text{н}}}{G_{\text{вн}} + G_{\text{н}}}$$

Узагальнюючи вищеописане, маємо:

Ідеальне джерело напруги віддає в електричне коло потужність $P = U_{\text{н}} I_{\text{н}}$, причому внутрішні втрати на ньому відсутні, на відміну від реального джерела, при якому внутрішні втрати потужності становлять $P_{\text{внДН}} = I_{\text{н}}^2 r_{\text{вн}}$, а потужність, яка віддається в коло $P = I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}}$.

Ідеальне джерело струму відає в електричне коло потужність $P = U_{\text{н}} J$.

У реальному джерелі струму внутрішні втрати потужності становлять:

$$P_{\text{внДС}} = U_{\text{н}}^2 / r_{\text{вн}} = U_{\text{н}}^2 G_{\text{вн}},$$

Отже, якщо узагальнити, маємо:

- будь-яке джерело енергії можна подати як реальне джерело напруги (рис. 3.3 а) або як реальне джерело струму (рис. 3.4 а);
- еквівалентність математичних моделей реального джерела енергії встановлюється тотожністю умов роботи навантаження за співвідношенням (3.1):

$$E = J r_{\text{вн}}; \quad J = E G_{\text{вн}}; \quad G_{\text{вн}} = 1 / r_{\text{вн}} \quad (3.1)$$

- втрати енергії на внутрішніх опорах схем джерела напруги та джерела струму різні.

Розглянемо умову, при якій відбувається передача максимальної енергії споживачу, яка слідує з теореми потужності для схеми реального джерела напруги (рис. 3.3 а).

$$P_H = U_H I_H = I_H^2 R_H = \left(\frac{E}{R_H + r_{BH}} \right)^2 R_H = \frac{E^2}{r_{BH}^2 / R_H + 2r_{BH} + R_H}$$

Умова передачі максимальної потужності:

$$\frac{d}{dR_H} \left(\frac{r_{BH}^2}{R_H} + 2r_{BH} + R_H \right) = 0$$

$$-\frac{r_{BH}^2}{R_H^2} + 1 = 0 \text{ або } r_{BH} = R_H$$

Значення цієї потужності $P_{H_max} = E^2 / 4r_{BH}$. Струм та потужність, яку генерує джерело, а також ККД для цих умов матимуть наступний вигляд:

$$I_H = \frac{E}{2r_{BH}} = \frac{J}{2}; \quad P_{дж} = EI_H = \frac{E^2}{2r_{BH}}; \quad \eta = \frac{P_H}{P_{дж}}$$

Розрахуємо параметри елементів для системи 1Г-1Н постійного струму, (рис. 3.2 б), при цьому в подальшому джерело енергії (генератор) будемо подавати як реальне джерело напруги. Послідовне з'єднання внутрішнього опору r_{BH} та опору лінії R_L подано як один опір R (3.2), як показано на рис. 3.2 б:

$$R = r_{BH} + R_L \quad (3.2)$$

Результати розрахунку параметрів елементів системи 1Г-1Н постійного струму наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

№ з/п	Розрахунок параметрів елементів
1.	Розрахунок струму навантаження в перетині А-А
	$I_{A-A} = \frac{E}{R + R_H}$
2.	Розрахунок напруги елементів системи
	$U_\Gamma = E_\Gamma \qquad U_H = E_\Gamma - I_{A-A}R = I_{A-A}R_H$
3.	Розрахунок потужностей елементів системи
	$P_\Gamma = E_\Gamma I_{A-A} \qquad P_H = I_{A-A}^2 R_H = U_H I_{A-A}$

Система 1Г-1Н змінного струму

Загальна схема заміщення для системи 1Г-1Н представлена на рис. 3.6 а, при цьому розглянемо два випадки: в першому випадку знехтуємо індуктивністю $L_H = 0$ та розглянемо чисто активний характер навантаження (рис. 3.6 б), в другому випадку активно-індуктивний характер навантаження (рис. 3.6 в)

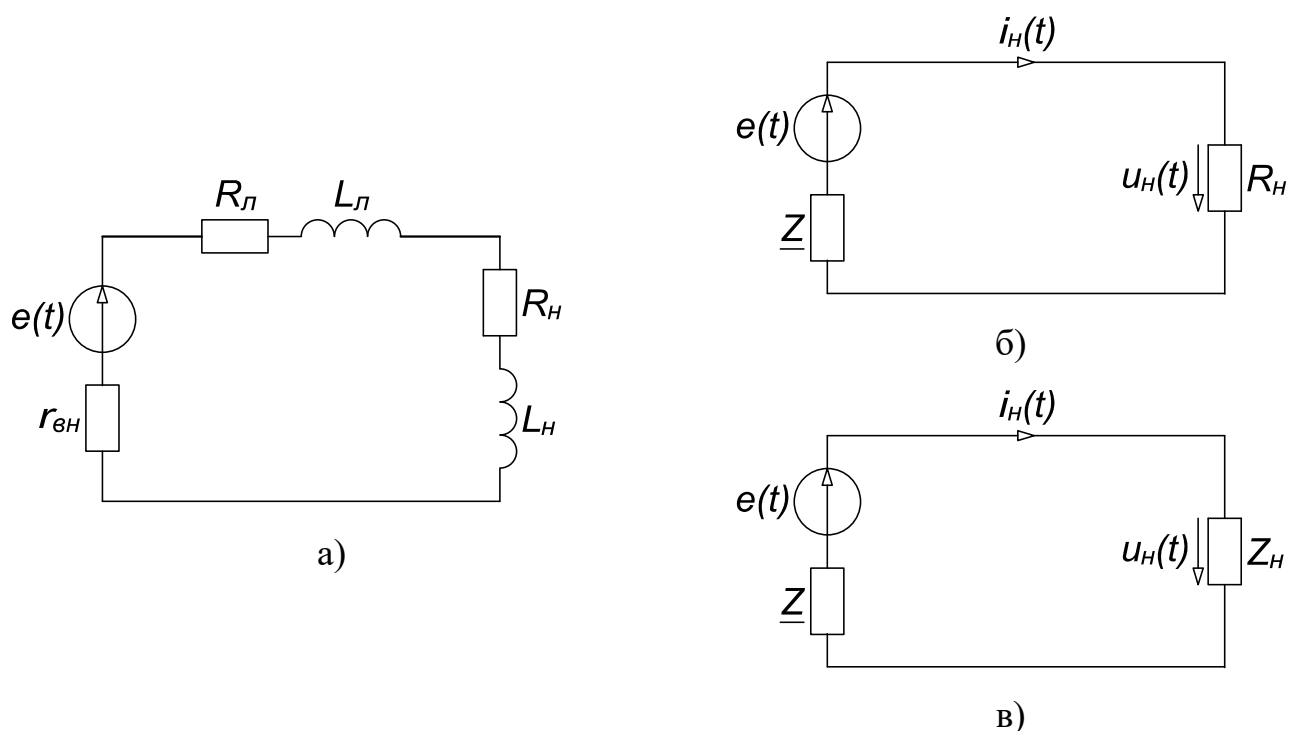


Рисунок 3.6 – Схеми заміщення системи 1Г-1Н АС

Розрахуємо параметри елементів системи окремо для випадку з активного та активно-індуктивного навантаженням, результати розрахунків занесемо в табл. 3.2.

Синусоїдна ЕРС генератора, (3.3):

$$e_r(t) = E_{mГ} \sin(\omega t + \psi) = \sqrt{2}E_r \sin(\omega t + \psi) \quad (3.3)$$

де: E_r – діюче значення ЕРС генератора;

$\sin(\omega t + \psi)$ – фаза сигналу;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота генератора, (рад/с); де f – частота генератора, (Гц);

ψ – початкова фаза коливання, (рад).

Запишемо ЕРС $e_r(t)$ в показниковій та тригонометричній формах, (3.4):

$$\dot{E}_r = E_r e^{j\psi} = E_r (\cos \psi + j \sin \psi) \quad (3.4)$$

Запишемо комплексні опори всіх елементів системи:

- комплексний опір лінії та внутрішній опір генератора, (3.5):

$$\underline{Z} = R_{л} + r_{вн} + j\omega L_{л} = R_{л} + r_{вн} + jX_{л} = R + jX \quad (3.5)$$

- комплексний опір навантаження (активний характер), (3.6):

$$\underline{Z}_H = R_H \quad (3.6)$$

- комплексний опір навантаження (активно-індуктивний характер), (3.7):

$$\underline{Z}_H = R_H + \omega L_H = R_H + jX_H \quad (3.7)$$

Розрахуємо струм, що протікає через перетин А-А, у разі активного (3.8) та активно-індуктивного характеру навантаження (3.9):

$$i_{A-A} = \frac{\dot{E}_r}{\underline{Z} + R_H} \quad (3.8)$$

$$i_{A-A} = \frac{\dot{E}_r}{\underline{Z} + \underline{Z}_H} \quad (3.9)$$

Миттєві напруги елементів системи, (3.10):

$$\begin{aligned} u_r(t) &= e_r(t) = \sqrt{2}E_r \sin(\omega t + \psi) = \sqrt{2}|\dot{U}_r| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_r) \\ u_z(t) &= \sqrt{2}|i_{A-A}\underline{Z}| \sin(\omega t + \arg(i_{A-A}\underline{Z})) = \sqrt{2}\dot{U}_z \sin(\omega t + \arg \dot{U}_z) \\ u_H(t) &= \sqrt{2}|i_{A-A}R_H| \sin(\omega t + \arg(i_{A-A}R_H)) = \sqrt{2}\dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) \\ u_H(t) &= \sqrt{2}|i_{A-A}\underline{Z}_H| \sin(\omega t + \arg(i_{A-A}\underline{Z}_H)) = \sqrt{2}\dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Визначимо повні миттєві потужності генератора (3.11), навантаження з активним та активно-індуктивним характером, формула для яких є однаковою (3.13):

$$\begin{aligned} s_r(t) &= i_{A-A}(t)e_r(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t + \arg i_{A-A}) \cdot \sqrt{2}E_r \sin(\omega t + \psi) = \\ &= \frac{\sqrt{2}\sqrt{2}|i_{A-A}|E_r}{2} [\cos(\arg i_{A-A} - \psi) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \psi)] = \\ &= |i_{A-A}|E_r [\cos(\arg i_{A-A} - \psi) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \psi)] \end{aligned} \quad (3.11)$$

де: $i_{A-A} = |i_{A-A}|e^{j\arg i_{A-A}} = |i_{A-A}| \cos(\arg i_{A-A}) + j|i_{A-A}| \sin(\arg i_{A-A}) = \operatorname{Re}(i_{A-A}) + j\operatorname{Im}(i_{A-A})$;

$|i_{A-A}| = \sqrt{\operatorname{Re}(i_{A-A})^2 + \operatorname{Im}(i_{A-A})^2}$ – модуль вектора комплексного числа;

$\arg(i_{A-A}) = \arctg \left[\frac{\operatorname{Im}(i_{A-A})}{\operatorname{Re}(i_{A-A})} \right]$ – аргумент комплексного числа;

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)}{2}$$

$$\begin{aligned} s_H(t) &= i_{A-A}(t) \cdot u_H(t) = \\ &= \sqrt{2}|i_{A-A}| \sin(\omega t + \arg i_{A-A}) \sqrt{2}|\dot{U}_H| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) = \\ &= \frac{\sqrt{2}\sqrt{2}|i_{A-A}\dot{U}_H|}{2} [\cos(\arg i_{A-A} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \arg \dot{U}_H)] \end{aligned} \quad (3.12)$$

Таблиця 3.2

№ з/п	Характер навантаження	
	Активне	Активно-індуктивне

1.	Розрахунок струму навантаження через перетини А-А	
	$i_{A-A} = \frac{\dot{E}_r}{\underline{Z} + R_H}$	$i_{A-A} = \frac{\dot{E}_r}{\underline{Z} + \underline{Z}_H}$
2.	Розрахунок напруги елементів системи	
	$\dot{U}_H = \dot{E}_r - i_{A-A} \underline{Z} = i_H R_H$	$\dot{U}_H = \dot{E}_r - i_{A-A} \underline{Z} = i_{A-A} \underline{Z}_H$
3.	Розрахунок активних та реактивних потужностей елементів системи	
	$P_r = \operatorname{Re}(I_{A-A}^* \dot{E}_r)$ $Q_{r1} = \operatorname{Im}(I_{A-A}^* \dot{E}_r)$ де: I_{A-A}^* - комплекс, спряжений з комплексом i_{A-A}	$P_H = i_{A-A} ^2 R_H$
	$Q_H = 0$	$Q_H = i_{A-A} ^2 X_H$
4.	Миттєві напруги, струм, повні потужності елементів системи в перетині А-А	
	$u_r(t) = e_r(t) = \sqrt{2} E_r \sin(\omega t + \psi) \quad u_z(t) = \sqrt{2} U_z \sin(\omega t + \arg \dot{U}_z) \quad u_H(t) = \sqrt{2} \dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H)$ $i_{A-A}(t) = \sqrt{2} i_{A-A} \sin(\omega t + \arg i_{A-A})$ $s_r(t) = i_{A-A} \dot{E}_r [\cos(\arg(i_{A-A} - \psi)) - \cos(2\omega t + \arg(i_{A-A} + \psi))]$ $s_H(t) = i_{A-A} \dot{U}_H [\cos(\arg i_{A-A} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \arg \dot{U}_H)]$	

3.1.2 Система 1 генератор 2 навантаження

Розглянемо систему, яка складається з одного однофазного генератора та двох навантажень (1Г-2Н), в якій всі елементи, як показано на структурній схемі (рис. 3.7) підключено паралельно. Виділимо перетини А-А, В-В та С-С та розрахуємо параметри для моделей систем постійного та змінного струму.

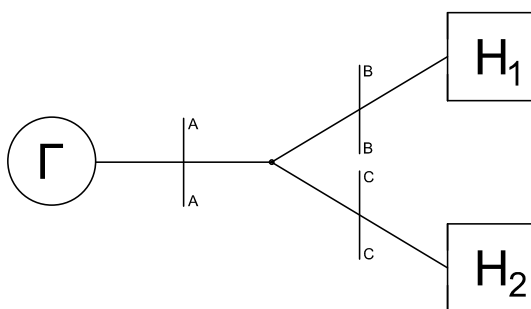


Рисунок 3.7 – Структурна схема системи 1Г-2Н

Система 1 генератора 2 навантаження постійного струму

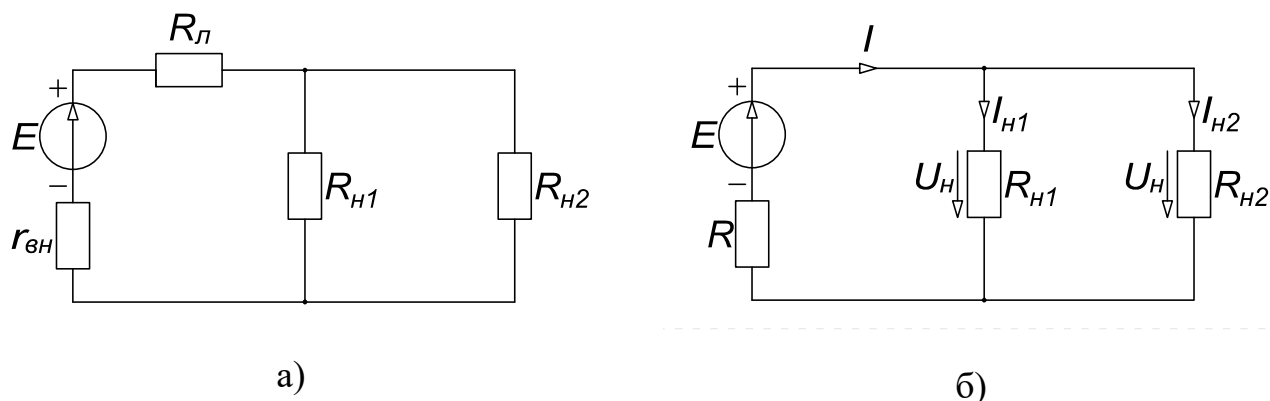


Рисунок 3.8 – Схема заміщення системи 1Г-2Н DC

Розрахуємо параметри системи 1Г-2Н постійного струму в загальному вигляді. Причому, послідовно з'єднані внутрішній опір $r_{\text{вн}}$ та опір лінії $R_{\text{л}}$ в перетині генератора А-А подаємо як один опір R (рис. 3.8 б), (3.13):

$$R = r_{\text{вн}} + R_{\text{л}} \quad (3.13)$$

Знайдемо струм, що проходить через перетин генератора А-А (3.14), на основі чого виконаємо розрахунок інших параметрів системи, які наведемо в табл. 3.3.

$$I_{\text{А-А}} = \frac{E_{\text{Г}}}{R + \frac{R_{\text{H1}}R_{\text{H2}}}{R_{\text{H1}} + R_{\text{H2}}}} = \frac{R_{\text{H1}} + R_{\text{H2}}}{R(R_{\text{H1}} + R_{\text{H2}}) + R_{\text{H1}}R_{\text{H2}}} \quad (3.14)$$

Таблиця 3.3

№ з/п	Розрахунок параметрів елементів
1.	Розрахунок струмів у перетинах А-А, В-В та С-С $I_{\text{А-А}} = \frac{E_{\text{Г}}(R_{\text{H1}} + R_{\text{H2}})}{R(R_{\text{H1}} + R_{\text{H2}}) + R_{\text{H1}}R_{\text{H2}}} \quad I_{\text{В-В}} = \frac{E_{\text{Г}}R_{\text{H2}}}{R(R_{\text{H1}} + R_{\text{H2}}) + R_{\text{H1}}R_{\text{H2}}} \quad I_{\text{С-С}} = \frac{E_{\text{Г}}R_{\text{H1}}}{R(R_{\text{H1}} + R_{\text{H2}}) + R_{\text{H1}}R_{\text{H2}}}$
2.	Розрахунок напруги елементів системи $U_{\text{Г}} = E_{\text{Г}}$ $U_{\text{H}} = U_{\text{H1}} = U_{\text{H2}} = E_{\text{Г}} - I_{\text{А-А}}R = I_{\text{В-В}}R_{\text{H1}} = I_{\text{С-С}}R_{\text{H2}}$
3.	Розрахунок потужностей елементів системи $P_{\text{Г}} = E_{\text{Г}}I_{\text{А-А}} \quad P_{\text{H1}} = I_{\text{В-В}}^2 R_{\text{H1}} \quad P_{\text{H2}} = I_{\text{С-С}}^2 R_{\text{H2}}$

Система 1 генератора 2 навантаження постійного струму

Загальна схема заміщення для системи 1Г-2Н змінного струму представлена на рис. 3.9 а), при цьому розглянемо два випадки: в першому випадку знехтуємо індуктивністю $L_{\text{H}} = 0$ та розглянемо чисто активний характер навантаження рис. 3.9 б), в другому випадку активно-індуктивний характер навантаження рис. 3.9 в).

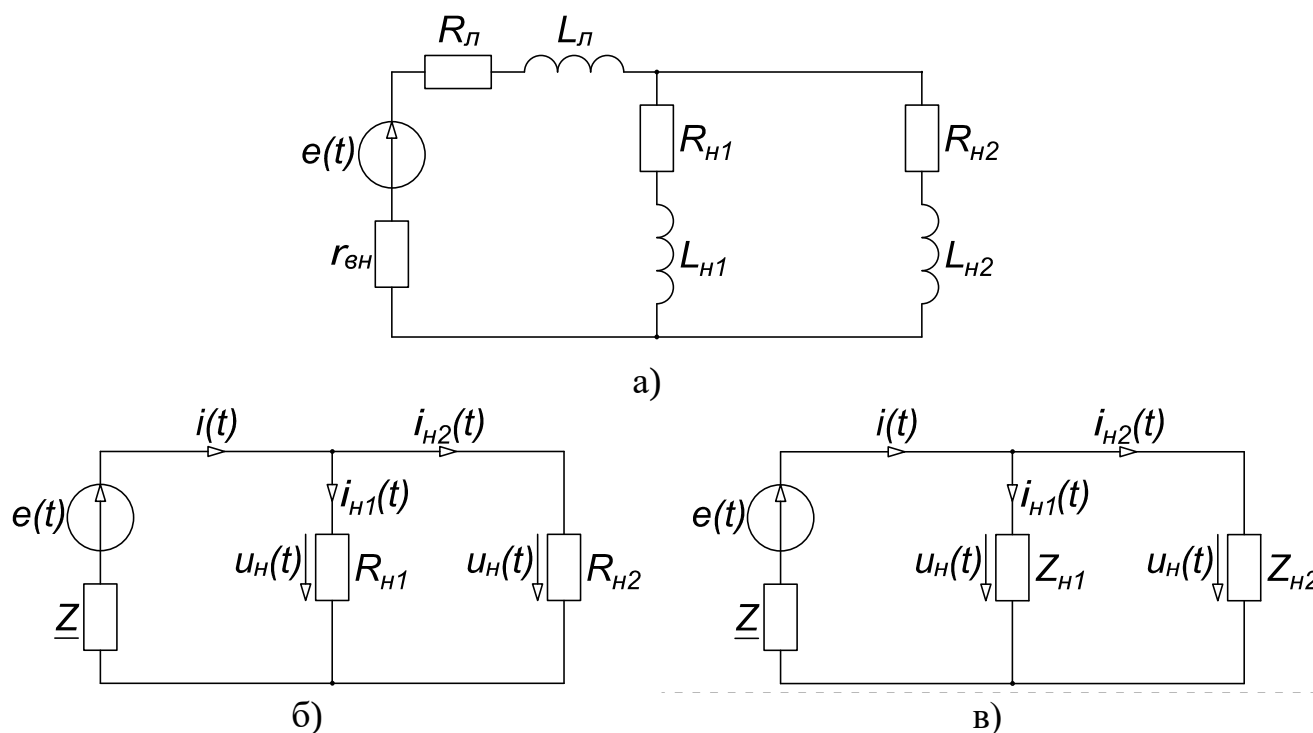


Рисунок 3.9 – Схеми заміщення системи 1Γ-2Н АС

Розрахуємо значення параметрів системи 2Γ-1Н змінного струму окремо для випадку з активним та активно-індуктивним характером навантаженням, результати розрахунків занесемо в **табл. 3.4**.

Синусоїдна ЕРС генератора, (2):

$$e_{\Gamma}(t) = E_{m\Gamma} \sin(\omega t + \psi) = \sqrt{2} E_{\Gamma} \sin(\omega t + \psi) \quad (3.15)$$

Запишемо комплексні опори всіх елементів системи:

- комплексний опір лінії та внутрішній опір генератора в перетині А-А, (3.16):

$$\underline{Z} = R_{\Gamma} + r_{\text{вн}} + \omega L_{\Gamma} = R_{\Gamma} + r_{\text{вн}} + jX_{\Gamma} = R + jX \quad (3.16)$$

- комплексний опір навантажень (активний характер) в перетинах В-В та С-С, (3.6):

$$\underline{Z}_{\text{н1}} = R_{\text{н1}}; \quad \underline{Z}_{\text{н2}} = R_{\text{н2}} \quad (3.17)$$

- комплексний опір навантаження (активно-індуктивний характер) в перетинах В-В та С-С, (3.18):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{н1}} &= R_{\text{н1}} + \omega L_{\text{н1}} = R_{\text{н1}} + jX_{\text{н1}} \\ \underline{Z}_{\text{н2}} &= R_{\text{н2}} + \omega L_{\text{н2}} = R_{\text{н2}} + jX_{\text{н2}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Розрахуємо струм, що протікає через перетин А-А, у разі активного (3.19) та активно-індуктивного характеру навантаження (3.20), та на його основі проведемо розрахунок інших параметрів системи, :

$$i_{A-A} = \frac{\dot{E}_r}{\underline{Z} + \frac{R_{H1}R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}}} = \frac{\dot{E}_r(R_{H1} + R_{H2})}{\underline{Z}(R_{H1} + R_{H2}) + R_{H1}R_{H2}} \quad (3.19)$$

$$i_{A-A} = \frac{\dot{E}_r}{\underline{Z} + \frac{\underline{Z}_{H1}\underline{Z}_{H2}}{\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2}}} = \frac{\dot{E}_r(\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2})}{\underline{Z}(\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2}) + \underline{Z}_{H1}\underline{Z}_{H2}} \quad (3.20)$$

Миттєві напруги елементів системи в перетині генератора А-А, (3.21):

$$\begin{aligned} u_r(t) &= e_r(t) = \sqrt{2}E_r \sin(\omega t + \psi) = \sqrt{2}|\dot{U}_r| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_r) \\ u_z(t) &= \sqrt{2}|i_{A-A}\underline{Z}| \sin(\omega t + \arg(i_{A-A}\underline{Z})) = \sqrt{2}\dot{U}_z \sin(\omega t + \arg \dot{U}_z) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Миттєві напруги навантажень в перетинах В-В та С-С у разі чисто активного характеру, (3.22):

$$\begin{aligned} u_H(t) &= u_{H1}(t) = u_{H2}(t) \\ u_{H1}(t) &= \sqrt{2}|i_{B-B}R_{H1}| \sin(\omega t + \arg(i_{B-B}R_{H1})) = \sqrt{2}\dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) \\ u_{H2}(t) &= \sqrt{2}|i_{C-C}R_{H2}| \sin(\omega t + \arg(i_{C-C}R_{H2})) = \sqrt{2}\dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Миттєві напруги навантажень в перетинах В-В та С-С у разі чисто активного характеру, (3.23):

$$\begin{aligned} u_H(t) &= u_{H1}(t) = u_{H2}(t) \\ u_{H1}(t) &= \sqrt{2}|i_{B-B}\underline{Z}_{H1}| \sin(\omega t + \arg(i_{B-B}\underline{Z}_{H1})) = \sqrt{2}\dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) \\ u_{H2}(t) &= \sqrt{2}|i_{C-C}\underline{Z}_{H2}| \sin(\omega t + \arg(i_{C-C}\underline{Z}_{H2})) = \sqrt{2}\dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Визначимо повні миттєві потужності генератора (3.24), навантажень з активним та активно-індуктивним характером, формула для яких є однаковою (3.25):

$$\begin{aligned} s_r(t) &= i_{A-A}(t)e_r(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t + \arg i_{A-A}) \cdot \sqrt{2}E_r \sin(\omega t + \psi) = \\ &= \frac{\sqrt{2}\sqrt{2}|i_{A-A}|E_r}{2} [\cos(\arg i_{A-A} - \psi) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \psi)] = \\ &= |i_{A-A}|E_r [\cos(\arg i_{A-A} - \psi) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \psi)] \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} s_{H1}(t) &= i_{B-B}(t) \cdot u_H(t) = \\ &= \sqrt{2}|i_{B-B}| \sin(\omega t + \arg i_{B-B}) \sqrt{2}|\dot{U}_H| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) = \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\sqrt{2}\sqrt{2}|i_{B-B}\dot{U}_H|}{2} [\cos(\arg i_{B-B} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{B-B} + \arg \dot{U}_{H1})] = \\
& = |i_{B-B}\dot{U}_H| [\cos(\arg i_{B-B} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{B-B} + \arg \dot{U}_H)] \\
& s_{H2}(t) = i_{C-C}(t) \cdot u_H(t) = \\
& = |i_{C-C}\dot{U}_H| [\cos(\arg i_{C-C} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{C-C} + \arg \dot{U}_H)]
\end{aligned}$$

Таблиця 3.4

№ з/п	Характер навантаження	
	Активне	Активно-індуктивне
1.	Розрахунок струмів через перетини А-А, В-В та С-С	
	$i_{A-A} = \frac{\dot{E}_r(R_{H1} + R_{H2})}{\underline{Z}(R_{H1} + R_{H2}) + R_{H1}R_{H2}}$ $i_{B-B} = \frac{\dot{E}_r(R_{H1} + R_{H2})}{\underline{Z}(R_{H1} + R_{H2}) + R_{H1}R_{H2}}$ $i_{C-C} = \frac{\dot{E}_r R_{H1}}{\underline{Z}(R_{H1} + R_{H2}) + R_{H1}R_{H2}}$	$i_{A-A} = \frac{\dot{E}_r(\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2})}{\underline{Z}(\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2}) + \underline{Z}_{H1}\underline{Z}_{H2}}$ $i_{B-B} = \frac{\dot{E}_r \underline{Z}_{H2}}{\underline{Z}(\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2}) + \underline{Z}_{H1}\underline{Z}_{H2}}$ $i_{C-C} = \frac{\dot{E}_r \underline{Z}_{H1}}{\underline{Z}(\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2}) + \underline{Z}_{H1}\underline{Z}_{H2}}$
2.	Розрахунок напруги в системі	
	$\dot{U}_H = \dot{E}_r - i_{A-A}\underline{Z} = i_{B-B}R_{H1} = i_{C-C}R_{H2}$	$\dot{U}_H = \dot{E}_r - i_{A-A}\underline{Z} = i_{B-B}\underline{Z}_{H1} = i_{C-C}\underline{Z}_{H2}$
3.	Розрахунок активних та реактивних потужностей елементів системи	
	$P_r = \operatorname{Re}(\dot{I}_{A-A}^* \dot{E}_r)$ $Q_r = \operatorname{Im}(\dot{I}_{A-A}^* \dot{E}_r)$ де: $\dot{I}_{A-A}^*$ - комплекс, спряжений з комплексом $\dot{I}_{A-A}$	$P_{H1} = i_{B-B} ^2 R_{H1}$ $P_{H2} = i_{H2} ^2 R_{H2}$
	$Q_{H1} = Q_{H2} = 0$	$Q_{H1} = i_{B-B} ^2 X_{H1}$ $Q_{H2} = i_{C-C} ^2 X_{H2}$
4.	Миттєві напруги, струми, повні потужності елементів системи	
	$u_r(t) = e_r(t) = \sqrt{2}E_r \sin(\omega t + \psi)$ $i_{A-A}(t) = \sqrt{2} i_{A-A} \sin(\omega t + \arg i_{A-A})$ $i_{C-C}(t) = \sqrt{2} i_{C-C} \sin(\omega t + \arg i_{C-C})$ $s_r(t) = i_{A-A}\dot{E} [\cos(\arg(i_{A-A} - \psi)) - \cos(2\omega t + \arg(i_{A-A} + \psi))]$ $s_{H1}(t) = i_{B-B}\dot{U}_H [\cos(\arg i_{B-B} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{B-B} + \arg \dot{U}_H)]$ $s_{H2}(t) = i_{C-C}\dot{U}_H [\cos(\arg i_{C-C} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{C-C} + \arg \dot{U}_H)]$	$u_H(t) = \sqrt{2} \dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H)$ $i_{B-B}(t) = \sqrt{2} i_{B-B} \sin(\omega t + \arg i_{B-B})$

3.1.3 Система 2 генератора 1 навантаження

Розглянемо систему, яка складається з двох однофазних генераторів та одного навантаження (2Г-1Н), в якій всі елементи підключено паралельно (рис. 3.10).

Виділимо перетини А-А, В-В та С-С та розрахуємо параметри для моделей систем постійного та змінного струму.

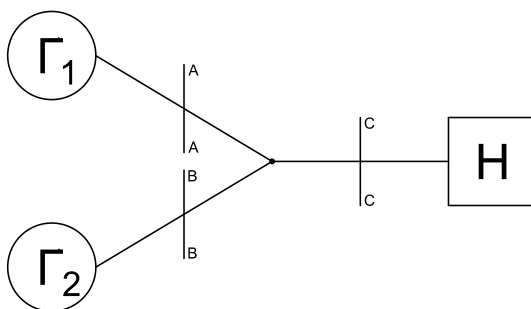


Рисунок 3.10 – Структурна схема системи 2Г-1Н

Система 2 генератора 1 навантаження постійного струму

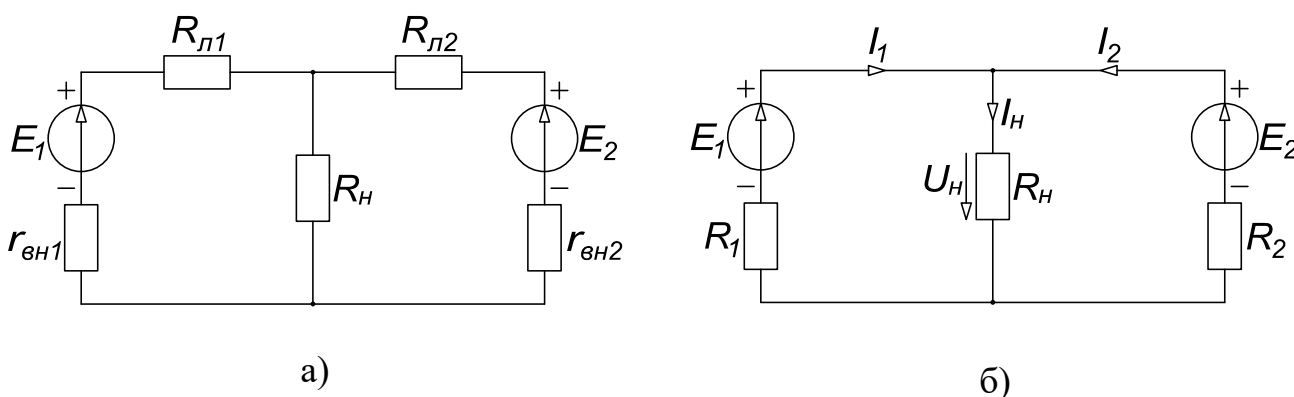


Рисунок 3.11 – Схема заміщення системи 2Г-1Н DC

Розрахуємо параметри системи 2Г-1Н постійного струму в загальному вигляді методом контурних струмів. Виберемо довільні напрямки струмів, які показано на рис. 3.11 б) та запишемо систему рівнянь, при цьому внутрішні опори генераторів та опори ліній подаємо як один, (3.26):

$$\begin{aligned} R_1 &= r_{\text{вн}1} + R_{\text{л}1} \\ R_2 &= r_{\text{вн}2} + R_{\text{л}2} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Система рівнянь для кожної вітки системи, які відповідають виділеним перетинам А-А, В-В та С-С на структурній схемі має наступний вигляд, (3.27):

$$\begin{cases} E_{\Gamma 1} = I_{A-A} R_1 + I_{C-C} R_H \\ E_{\Gamma 2} = I_{B-B} R_2 + I_{C-C} R_H \\ I_{C-C} = I_{A-A} + I_{B-B} \end{cases} \quad (3.27)$$

Розв'язок системи рівнянь, на основі якого виконано розрахунок інших параметрів елементів системи у загальному вигляді наведено у табл. 3.5

Таблица 3.5

№ з/п	Розрахунок параметрів елементів
1.	Розрахунок струмів через перетини А-А, В-В, С-С
	$I_{A-A} = \left(E_{r1} - \frac{(E_{r1}R_2 + E_{r2}R_1)R_H}{R_1R_2 + R_H(R_1 + R_2)} \right) \frac{1}{R_1}$ $I_{B-B} = \left(E_{r2} - \frac{(E_{r1}R_2 + E_{r2}R_1)R_H}{R_1R_2 + R_H(R_1 + R_2)} \right) \frac{1}{R_2}$ $I_{C-C} = \frac{E_{r1}R_2 + E_{r2}R_1}{R_1R_2 + R_H(R_1 + R_2)}$
2.	Розрахунок напруги в системі
	$U_H = E_{r1} - I_{A-A}R_1 = E_{r2} - I_{B-B}R_2 = I_{C-C}R_H$
3.	Розрахунок потужностей генераторів на навантаження в системі
	$P_{r1} = E_{r1}I_{A-A} \quad P_{r2} = E_{r2}I_{B-B} \quad P_H = I_{C-C}^2 R_H = U_H I_{C-C}$

Система 2 генератора 1 навантаження змінного струму

Загальна схема заміщення для системи 2Г-1Н змінного струму представлена на **рис. 3.12 а)** при цьому розглядаємо два випадки: в першому випадку знехтуємо індуктивною складовою навантаження $L_H = 0$ та розглянемо чисто активний характер навантаження **рис. 3.12 б)**, в другому випадку активно-індуктивний характер навантаження **рис. 3.12 в)**.

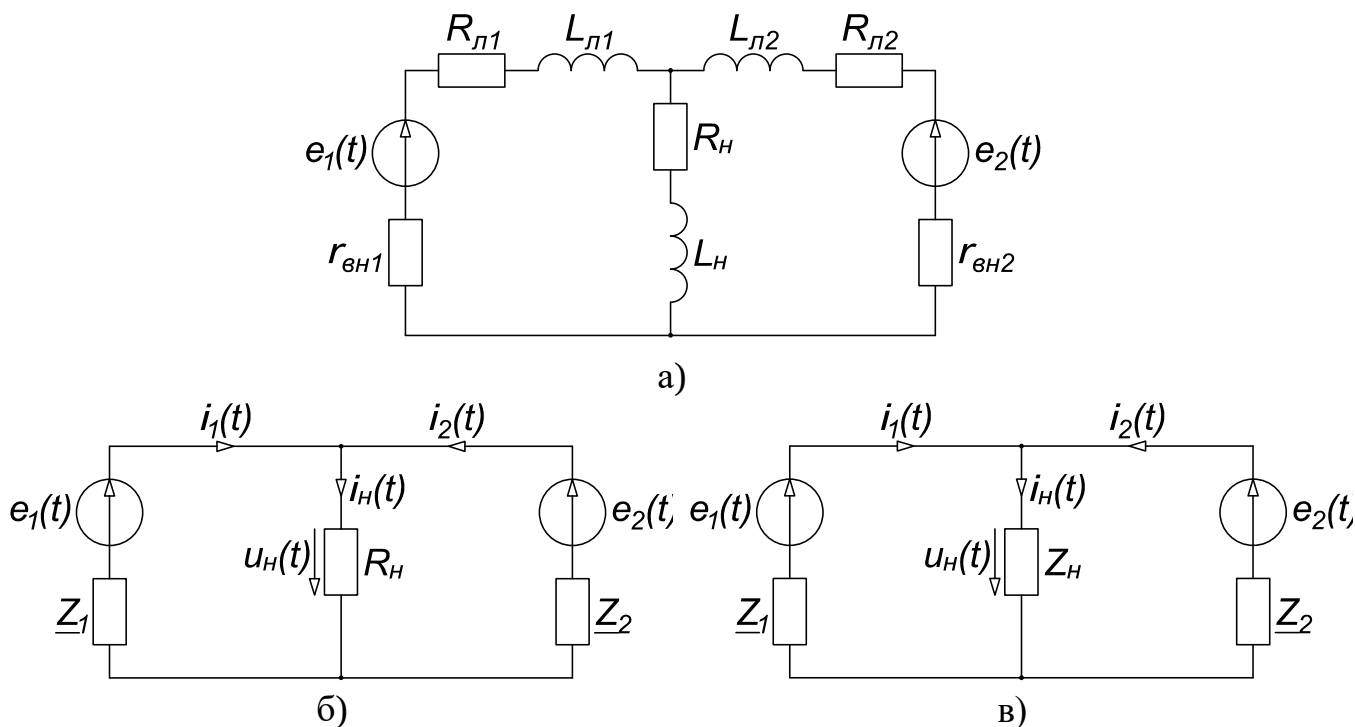


Рисунок 3.12 – Схема заміщення системи 2Г-1Н АС

Розрахуємо значення параметрів системи окремо для випадку з активним та активно-індуктивним навантаженням, результати розрахунків занесемо **табл. 3.6**.

Синусоїдні ЕРС генераторів (3.28):

$$\begin{aligned} e_{r1}(t) &= \sqrt{2}E_{r1} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \\ e_{r2}(t) &= \sqrt{2}E_{r2} \sin(\omega_2 t + \psi_2) \end{aligned} \quad (3.28)$$

де: E_{r1}, E_{r2} – діючі значення ЕРС генераторів Γ_1 та Γ_2 відповідно;

ω_{r1}, ω_{r2} – кутові частоти генераторів, (рад/с), $\omega = 2\pi f$; де f – частота генератора, (Гц);

ψ_1, ψ_2 – початкові фази коливання, (рад).

Запишемо миттєві ЕРС $e_{r1}(t)$ та $e_{r2}(t)$ показниковій та тригонометричній формах, (3.29):

$$\begin{aligned} \dot{E}_{r1} &= E_{r1} e^{j\psi_1} = E_{r1} (\cos \psi_1 + j \sin \psi_1) \\ \dot{E}_{r2} &= E_{r2} e^{j\psi_2} = E_{r2} (\cos \psi_2 + j \sin \psi_2) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Запишемо комплексні опори всіх елементів системи:

- комплексні опори ліній та внутрішні опори генератора для перетинів А-А та В-В, (3.30):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_{л1} + r_{вн1} + \omega L_{л1} = R_{л1} + r_{вн1} + jX_{л1} = R_1 + jX_1 \\ \underline{Z}_2 &= R_{л2} + r_{вн2} + \omega L_{л2} = R_{л2} + r_{вн2} + jX_{л2} = R_2 + jX_2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

- комплексний опір навантаження (активний характер) в перетині С-С, (3.31):

$$\underline{Z}_H = R_H \quad (3.31)$$

- комплексний опір навантаження (активно-індуктивний характер) в перетині С-С, (3.32):

$$\underline{Z}_H = R_H + \omega L_H = R_H + jX_H \quad (3.32)$$

Розрахуємо струми, що проходять через перетини методом контурних струмів, при цьому запишемо окремо систему рівнянь для чисто активного (3.33) та активно-індуктивного (3.34) характеру навантажень:

$$\begin{cases} \dot{I}_{C-C} = \dot{I}_{A-A} + \dot{I}_{B-B} \\ \dot{E}_{r1} = \dot{I}_{A-A} \underline{Z}_1 + \dot{I}_{C-C} R_H \\ \dot{E}_{r2} = \dot{I}_{B-B} \underline{Z}_2 + \dot{I}_{C-C} R_H \end{cases} \quad (3.33)$$

$$\begin{cases} i_{C-C} = i_{A-A} + i_{B-B} \\ \dot{E}_{r1} = i_{A-A} \underline{Z}_1 + i_{C-C} \underline{Z}_H \\ \dot{E}_{r2} = i_{B-B} \underline{Z}_2 + i_{C-C} \underline{Z}_H \end{cases} \quad (3.34)$$

Миттєві напруги елементів у перетинах генераторів А-А та В-В, (3.35):

$$\begin{aligned} u_{r1}(t) &= e_{r1}(t) = \sqrt{2} E_{r1} \sin(\omega t + \psi_1) = \sqrt{2} |\dot{U}_{r1}| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{r1}) \\ u_{r2}(t) &= e_{r2}(t) = \sqrt{2} E_{r2} \sin(\omega t + \psi_2) = \sqrt{2} |\dot{U}_{r2}| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{r2}) \\ u_{z1}(t) &= \sqrt{2} |i_{A-A} \underline{Z}_1| \sin(\omega t + \arg(i_{A-A} \underline{Z}_1)) = \sqrt{2} \dot{U}_{z1} \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{z1}) \\ u_{z2}(t) &= \sqrt{2} |i_{B-B} \underline{Z}_2| \sin(\omega t + \arg(i_{B-B} \underline{Z}_2)) = \sqrt{2} \dot{U}_{z2} \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{z2}) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Миттєва напруга навантаження у перетині С-С у разі чисто активного характеру, (3.36):

$$u_H(t) = \sqrt{2} |i_{C-C} R_H| \sin(\omega t + \arg(i_{C-C} R_H)) = \sqrt{2} \dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) \quad (3.36)$$

Миттєва напруга навантаження у перетині С-С у разі активно-індуктивного характеру, (3.37):

$$u_H(t) = \sqrt{2} |i_{C-C} \underline{Z}_H| \sin(\omega t + \arg(i_{C-C} \underline{Z}_H)) = \sqrt{2} \dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) \quad (3.37)$$

Визначимо повні миттєві потужності генераторів (3.38) та навантажень з активним та активно-індуктивним характером, формула для яких є однакова (3.39):

$$\begin{aligned} s_{r1}(t) &= i_{A-A}(t) e_{r1}(t) = \\ &= \sqrt{2} |i_{A-A}| \sin(\omega t + \arg i_{A-A}) \cdot \sqrt{2} E_{r1} \sin(\omega t + \psi_1) = \\ &= \frac{\sqrt{2} \sqrt{2} |i_{A-A}| E_{r1}}{2} [\cos(\arg i_{A-A} - \psi_1) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \psi_1)] = \\ &= |i_{A-A}| E_{r1} [\cos(\arg i_{A-A} - \psi_1) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \psi_1)] \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} s_{r2}(t) &= i_{B-B}(t) e_{r2}(t) = \\ &= \sqrt{2} |i_{B-B}| \sin(\omega t + \arg i_{B-B}) \cdot \sqrt{2} E_{r2} \sin(\omega t + \psi_2) = \\ &= \frac{\sqrt{2} \sqrt{2} |i_{B-B}| E_{r2}}{2} [\cos(\arg i_{B-B} - \psi_2) - \cos(2\omega t + \arg i_{B-B} + \psi_2)] = \\ &= |i_{B-B}| E_{r2} [\cos(\arg i_{B-B} - \psi_2) - \cos(2\omega t + \arg i_{B-B} + \psi_2)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_H(t) &= i_{C-C}(t) \cdot u_H(t) = \\ &= \sqrt{2} |i_{C-C}| \sin(\omega t + \arg i_{C-C}) \sqrt{2} |\dot{U}_H| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) = \\ &= \frac{\sqrt{2} \sqrt{2} |i_{C-C}| \dot{U}_H}{2} [\cos(\arg i_{C-C} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{C-C} + \arg \dot{U}_H)] = \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$= |i_{C-C} \dot{U}_H| [\cos(\arg i_{C-C} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{C-C} + \arg \dot{U}_H)]$$

Таблиця 3.6

№ з/п	Характер навантаження	
	Активний	Активно-індуктивний
1.	Розрахунок струмів через перетини А-А, В-В, С-С	
	$I_{A-A} = \left[\dot{E}_{r1} - \frac{(\dot{E}_{r1} \underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2} \underline{Z}_1) R_H}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + R_H (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \right] \frac{1}{\underline{Z}_1}$ $I_{B-B} = \left[\dot{E}_{r2} - \frac{(\dot{E}_{r1} \underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2} \underline{Z}_1) R_H}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + R_H (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \right] \frac{1}{\underline{Z}_2}$ $I_{C-C} = \frac{\dot{E}_{r1} \underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2} \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + R_H (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}$	$I_{A-A} = \left[\dot{E}_{r1} - \frac{(\dot{E}_{r1} \underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2} \underline{Z}_1) \underline{Z}_H}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_H (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \right] \frac{1}{\underline{Z}_1}$ $I_{B-B} = \left[\dot{E}_{r2} - \frac{(\dot{E}_{r1} \underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2} \underline{Z}_1) \underline{Z}_H}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_H (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \right] \frac{1}{\underline{Z}_2}$ $I_{C-C} = \frac{\dot{E}_{r1} \underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2} \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_H (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}$
2.	Розрахунок напруги в системі	
	$\dot{U}_H = \dot{E}_{r1} - I_{A-A} \underline{Z}_1 = \dot{E}_{r2} - I_{B-B} \underline{Z}_1 = I_{C-C} R_H$	$\dot{U}_H = \dot{E}_{r1} - I_{A-A} \underline{Z}_1 = \dot{E}_{r2} - I_{B-B} \underline{Z}_1 = I_{C-C} \underline{Z}_H$
3.	Розрахунок активних та реактивних потужностей елементів системи	
	$P_{r1} = Re(I_{A-A}^* \dot{E}_{r1})$ $Q_{r1} = Im(I_{A-A}^* \dot{E}_{r1})$	$P_{r2} = Re(I_{B-B}^* \dot{E}_{r2})$ $Q_{r2} = Im(I_{B-B}^* \dot{E}_{r2})$
	$P_H = I_{C-C} ^2 R_H$ де: I_{A-A}^*, I_{B-B}^* - комплекс, спряжений з комплексом I_{A-A}, I_{B-B} відповідно	
	$Q_H = 0$	$Q_H = I_{C-C} ^2 X_H$
4.	Миттєві напруги, струми, повні потужності елементів системи	
	$u_{r1}(t) = e_{r1}(t) = \sqrt{2} E_{r1} \sin(\omega t + \psi_1)$	$u_{r2}(t) = e_{r2}(t) = \sqrt{2} E_{r2} \sin(\omega t + \psi_2)$
	$u_H(t) = \sqrt{2} \dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H)$	
	$u_H(t) = \sqrt{2} I_{C-C} R_H \sin(\omega t + \arg(I_{C-C} R_H))$	$u_H(t) = \sqrt{2} I_{C-C} \underline{Z}_H \sin(\omega t + \arg(I_{C-C} \underline{Z}_H))$
	$i_{A-A}(t) = \sqrt{2} I_{A-A} \sin(\omega t + \arg I_{A-A})$	$i_{B-B}(t) = \sqrt{2} I_{B-B} \sin(\omega t + \arg I_{B-B})$
	$i_{C-C}(t) = \sqrt{2} I_{C-C} \sin(\omega t + \arg I_{C-C})$	
	$s_{r1}(t) = I_{A-A} E_{r1} [\cos(\arg I_{A-A} - \psi_1) - \cos(2\omega t + \arg I_{A-A} + \psi_1)]$	
	$s_{r2}(t) = I_{B-B} E_{r2} [\cos(\arg I_{B-B} - \psi_2) - \cos(2\omega t + \arg I_{B-B} + \psi_2)]$	
	$s_H(t) = I_{C-C} \dot{U}_H [\cos(\arg I_{C-C} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg I_{C-C} + \arg \dot{U}_H)]$	

3.1.4 Система 2 генератора 2 навантаження

Розглянемо систему, яка складається з двох однофазних генераторів та двох навантажень (2Г-2Н), в якій всі елементи підключено паралельно. Виділимо перетини А-А, В-В, С-С та D-D (рис. 3.13) та розрахуємо параметри для моделей систем постійного та змінного струму.

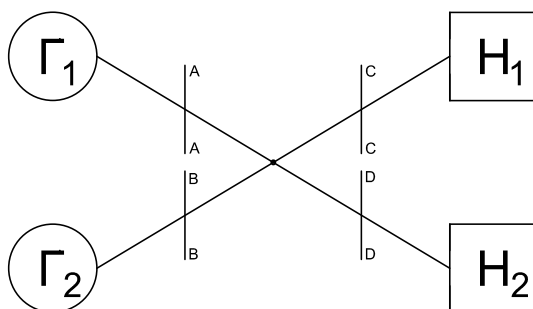


Рисунок 3.14 – Структурна схема системи 2Г-2Н

Система 2Г-2Н постійного струму

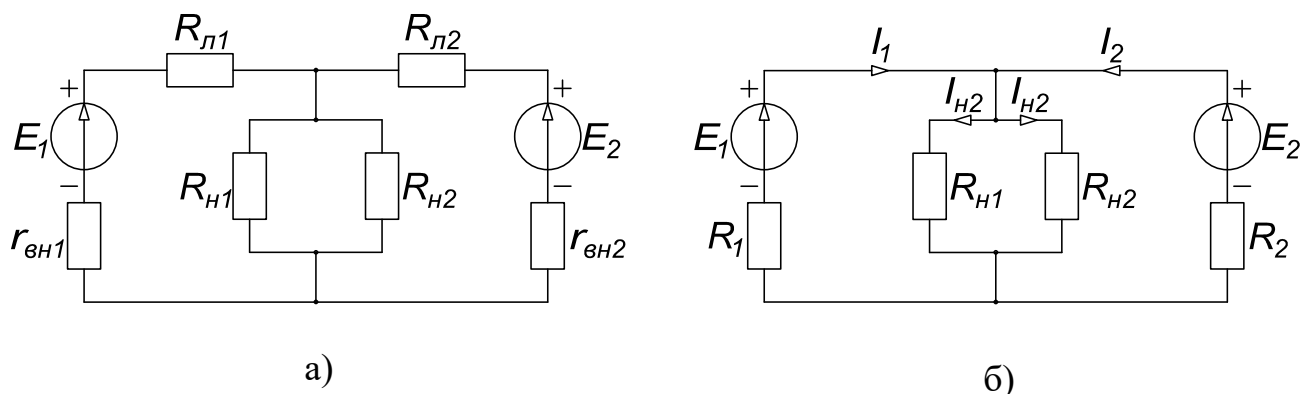


Рисунок 3.15 – Схема заміщення системи 2Г-2Н DC

Розрахуємо параметри системи 2Г-2Н постійного струму в загальному вигляді методом контурних струмів. Виберемо довільні напрямки струмів, які показано на рис. 3.15 б) та запишемо систему рівнянь, при цьому внутрішні опори генераторів та опори ліній аналогічно розрахунків попередніх систем об'єднуємо в один, (3.40):

$$\begin{aligned} R_1 &= r_{\text{вн}1} + R_{\text{л}1} \\ R_2 &= r_{\text{вн}2} + R_{\text{л}2} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Система рівнянь для кожної вітки системи, які відповідають виділеним перетинам А-А, В-В, С-С та D-D на структурній схемі має наступний вигляд, (3.41):

$$\begin{cases} E_{\Gamma 1} = I_{A-A} R_1 + I_{\text{н}} \frac{R_{\text{н}1} R_{\text{н}2}}{R_{\text{н}1} + R_{\text{н}2}} \\ E_{\Gamma 2} = I_{B-B} R_2 + I_{\text{н}} \frac{R_{\text{н}1} R_{\text{н}2}}{R_{\text{н}1} + R_{\text{н}2}} \\ I_{\text{н}} = I_{A-A} + I_{B-B} = I_{C-C} + I_{D-D} \end{cases} \quad (3.41)$$

де: $I_{\text{н}} = I_{A-A} + I_{B-B} = I_{C-C} + I_{D-D} = I_{\text{н}} \frac{R_{\text{н}2}}{R_{\text{н}1} + R_{\text{н}2}} + I_{\text{н}} \frac{R_{\text{н}1}}{R_{\text{н}1} + R_{\text{н}2}}$

Розв'язок системи рівнянь, та розрахунок інших параметрів елементів системи у загальному вигляді наведено у табл. 3.7.

Таблиця 3.7

№ з/п	Розрахунок параметрів елементів
1.	Розрахунок струмів через перетини А-А, В-В, С-С, D-D
	$I_{A-A} = \left(E_{r1} - \frac{(E_{r1}R_2 + E_{r2}R_1)R_H}{R_1R_2 + R_H(R_1 + R_2)} \right) \frac{1}{R_1}$ $I_{B-B} = \left(E_{r2} - \frac{(E_{r1}R_2 + E_{r2}R_1)R_H}{R_1R_2 + R_H(R_1 + R_2)} \right) \frac{1}{R_2}$ $I_{C-C} = \frac{E_{r1}R_2 + E_{r2}R_1}{R_1R_2 + R_H(R_1 + R_2)} \frac{R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}}$ $I_{D-D} = \frac{E_{r1}R_2 + E_{r2}R_1}{R_1R_2 + R_H(R_1 + R_2)} \frac{R_{H1}}{R_{H1} + R_{H2}}$
2.	Розрахунок напруги в системі
	$U_H = E_{r1} - I_{A-A}R_1 = E_{r2} - I_{B-B}R_2 = I_{C-C}R_{H1} = I_{D-D}R_{H2}$
3.	Розрахунок потужностей, що проходять через перетини А-А, В-В, С-С
	$P_{r1} = E_{r1}I_{A-A}$ $P_{r2} = E_{r2}I_{B-B}$ $P_{H1} = I_{C-C}^2 R_{H1} = U_H I_{C-C}$ $P_{H2} = I_{D-D}^2 R_{H2} = U_H I_{D-D}$

Система 2Г-2Н змінного струму

Загальна схема заміщення для системи 2Г-2Н представлена на рис. 3.16 а), при цьому розглянемо два випадки: в першому випадку знехтуємо індуктивною складовою навантаження $L_H = 0$ та розглянемо чисто активний характер навантаження рис. 3.16 б), в другому випадку активно-індуктивний характер навантаження рис. 3.16 в)

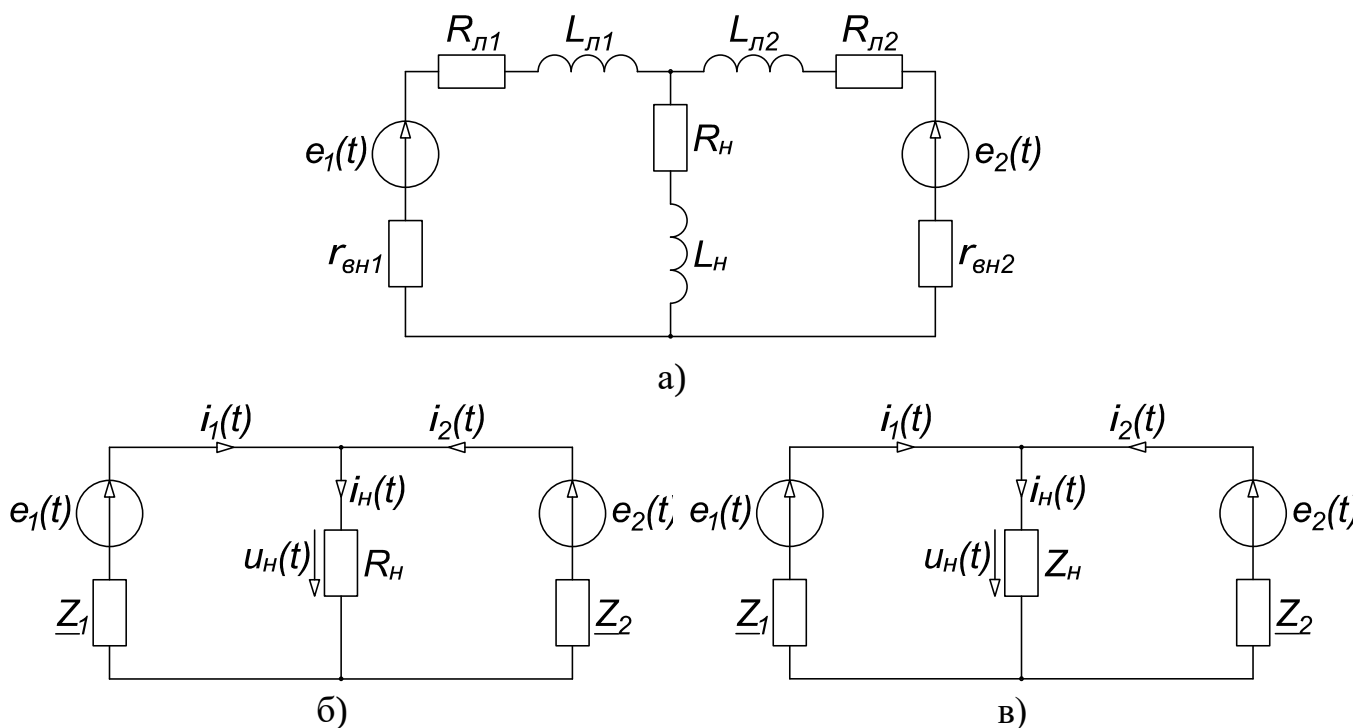


Рисунок 3.16 – Схема заміщення системи 2Г-2Н АС

Розрахуємо значення параметри системи окремо для випадку з активним та активно-індуктивним навантаженням, результати розрахунків занесемо в **табл. 3.8**.

Синусоїдні ЕРС генераторів (3.42):

$$\begin{aligned} e_{r1}(t) &= \sqrt{2}E_{r1} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \\ e_{r2}(t) &= \sqrt{2}E_{r2} \sin(\omega_2 t + \psi_2) \end{aligned} \quad (3.42)$$

Запишемо миттєві ЕРС $e_{r1}(t)$ та $e_{r2}(t)$ показниковій та тригонометричній формах, (3.43):

$$\begin{aligned} \dot{E}_{r1} &= E_{r1} e^{j\psi_1} = E_{r1} (\cos \psi_1 + j \sin \psi_1) \\ \dot{E}_{r2} &= E_{r2} e^{j\psi_2} = E_{r2} (\cos \psi_2 + j \sin \psi_2) \end{aligned} \quad (3.43)$$

Запишемо комплексні опори всіх елементів системи:

- комплексні опори ліній та внутрішні опори генератора для перетинів А-А та В-В, (3.44):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_{л1} + r_{вн1} + \omega L_{л1} = R_{л1} + r_{вн1} + jX_{л1} = R_1 + jX_1 \\ \underline{Z}_2 &= R_{л2} + r_{вн2} + \omega L_{л2} = R_{л2} + r_{вн2} + jX_{л2} = R_2 + jX_2 \end{aligned} \quad (3.44)$$

- комплексні опори навантажень (активний характер) для перетинів С-С, D-D, (3.45):

$$\underline{Z}_{H1} = R_{H1}; \quad \underline{Z}_{H2} = R_{H2} \quad (3.45)$$

- комплексні опори навантажень (активно-індуктивний характер) для перетинів С-С та D-D, (3.46):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{H1} &= R_{H1} + \omega L_{H1} = R_{H1} + jX_{H1} \\ \underline{Z}_{H2} &= R_{H2} + \omega L_{H2} = R_{H2} + jX_{H2} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Розрахуємо струми, що проходять через перетини методом контурних струмів, при цьому запишемо окремо систему рівнянь для чисто активного (3.47) та активно-індуктивного (3.48) характеру навантажень:

$$\begin{cases} \dot{I}_H = \dot{I}_{A-A} + \dot{I}_{B-B} \\ \dot{E}_{r1} = \dot{I}_{A-A} \underline{Z}_1 + \dot{I}_H \frac{R_{H1} R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}} \\ \dot{E}_{r2} = \dot{I}_{B-B} \underline{Z}_2 + \dot{I}_H \frac{R_{H1} R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}} \end{cases} \quad (3.47)$$

$$\begin{cases} i_H = i_{A-A} + i_{B-B} \\ \dot{E}_{r1} = i_{A-A} \underline{Z}_1 + i_H \frac{\underline{Z}_{H1} \underline{Z}_{H2}}{\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2}} \\ \dot{E}_{r2} = i_{B-B} \underline{Z}_2 + i_H \frac{\underline{Z}_{H1} \underline{Z}_{H2}}{\underline{Z}_{H1} + \underline{Z}_{H2}} \end{cases} \quad (3.48)$$

Миттєві напруги елементів у перетинах генераторів А-А та В-В, (3.49):

$$\begin{aligned} u_{r1}(t) &= e_{r1}(t) = \sqrt{2} E_{r1} \sin(\omega t + \psi_1) = \sqrt{2} |\dot{U}_{r1}| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{r1}) \\ u_{r2}(t) &= e_{r2}(t) = \sqrt{2} E_{r2} \sin(\omega t + \psi_2) = \sqrt{2} |\dot{U}_{r2}| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{r2}) \\ u_{z1}(t) &= \sqrt{2} |i_{A-A} \underline{Z}_1| \sin(\omega t + \arg(i_{A-A} \underline{Z}_1)) = \sqrt{2} \dot{U}_{z1} \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{z1}) \\ u_{z2}(t) &= \sqrt{2} |i_{B-B} \underline{Z}_2| \sin(\omega t + \arg(i_{B-B} \underline{Z}_2)) = \sqrt{2} \dot{U}_{z2} \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{z2}) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Миттєві напруги навантажень в перетинах С-С та D-D у разі чисто активного характеру, (3.50):

$$\begin{aligned} u_{h1}(t) &= \sqrt{2} |i_{C-C} R_{H1}| \sin(\omega t + \arg(i_{C-C} R_{H1})) = \sqrt{2} \dot{U}_{h1} \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{h1}) \\ u_{h2}(t) &= \sqrt{2} |i_{D-D} R_{H2}| \sin(\omega t + \arg(i_{D-D} R_{H2})) = \sqrt{2} \dot{U}_{h2} \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{h2}) \end{aligned} \quad (3.50)$$

Миттєві напруги навантажень в перетинах С-С та D-D у разі активно-індуктивного характеру, (3.51):

$$\begin{aligned} u_{h1}(t) &= \sqrt{2} |i_{C-C} \underline{Z}_{H1}| \sin(\omega t + \arg(i_{C-C} \underline{Z}_{H1})) = \sqrt{2} \dot{U}_{h1} \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{h1}) \\ u_{h2}(t) &= \sqrt{2} |i_{D-D} \underline{Z}_{H2}| \sin(\omega t + \arg(i_{D-D} \underline{Z}_{H2})) = \sqrt{2} \dot{U}_{h2} \sin(\omega t + \arg \dot{U}_{h2}) \end{aligned} \quad (3.51)$$

Так як перетини з навантаженнями підключені паралельно до перетинів з генераторами, напруга в усіх перетинах системи буде однакою, тому можна записати, (3.52):

$$\begin{aligned} u_{r1}(t) - u_{z1}(t) &= u_{r2}(t) - u_{z2}(t) = u_{h1}(t) = u_{h2}(t) = u_h(t) \\ u_h(t) &= \sqrt{2} |\dot{U}_h| \sin(\omega t + \arg \dot{U}_h) \end{aligned} \quad (3.52)$$

Визначимо повні миттєві потужності генераторів (3.53) та навантаження з активним та активно-індуктивним характером, для яких формула однакова, (3.54):

$$\begin{aligned} s_{r1}(t) &= i_{A-A}(t) e_{r1}(t) = \\ &= \sqrt{2} |i_{A-A}| \sin(\omega t + \arg i_{A-A}) \cdot \sqrt{2} E_{r1} \sin(\omega t + \psi_1) = \\ &= \frac{\sqrt{2} \sqrt{2} |i_{A-A}| E_{r1}}{2} [\cos(\arg i_{A-A} - \psi_1) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \psi_1)] = \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned}
&= |i_{A-A}|E_{r1}[\cos(\arg i_{A-A} - \psi_1) - \cos(2\omega t + \arg i_{A-A} + \psi_1)] \\
s_{r2}(t) &= i_{B-B}(t)e_{r2}(t) = \\
&= \sqrt{2}|i_{B-B}|\sin(\omega t + \arg i_{B-B}) \cdot \sqrt{2}E_{r2}\sin(\omega t + \psi_2) = \\
&= \frac{\sqrt{2}\sqrt{2}|i_{B-B}|E_{r2}}{2}[\cos(\arg i_{B-B} - \psi_2) - \cos(2\omega t + \arg i_{B-B} + \psi_2)] = \\
&= |i_{B-B}|E_{r2}[\cos(\arg i_{B-B} - \psi_2) - \cos(2\omega t + \arg i_{B-B} + \psi_2)] \\
s_{H1}(t) &= i_{C-C}(t) \cdot u_H(t) = \\
&= \sqrt{2}|i_{C-C}|\sin(\omega t + \arg i_{C-C}) \sqrt{2}|\dot{U}_H|\sin(\omega t + \arg \dot{U}_H) = \\
&= \frac{\sqrt{2}\sqrt{2}|i_{C-C}\dot{U}_H|}{2}[\cos(\arg i_{C-C} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{C-C} + \arg \dot{U}_H)] = \\
&= |i_{C-C}\dot{U}_H|[\cos(\arg i_{C-C} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{C-C} + \arg \dot{U}_H)] \\
s_{H2}(t) &= i_{D-D}(t) \cdot u_H(t) = \\
&= |i_{D-D}\dot{U}_H|[\cos(\arg i_{D-D} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg i_{D-D} + \arg \dot{U}_H)]
\end{aligned} \tag{3.54}$$

Таблиця 3.8

№ з/п	Характер навантаження	
	Активний	Активно-індуктивний
1.	Розрахунок струмів через перетини А-А, В-В, С-С, D-D	
	$i_{A-A} = \left[\dot{E}_{r1} - \frac{(\dot{E}_{r1}\underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2}\underline{Z}_1)}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \frac{R_{H1}R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \frac{R_{H1}R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}} \right] \frac{1}{\underline{Z}_1}$ $i_{B-B} = \left[\dot{E}_{r2} - \frac{(\dot{E}_{r1}\underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2}\underline{Z}_1)}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \frac{R_{H1}R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \frac{R_{H1}R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}} \right] \frac{1}{\underline{Z}_2}$ $i_{C-C} = \frac{\dot{E}_{r1}\underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \frac{R_{H1}R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \frac{R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}}$ $i_{D-D} = \frac{\dot{E}_{r1}\underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \frac{R_{H1}R_{H2}}{R_{H1} + R_{H2}}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \frac{R_{H1}}{R_{H1} + R_{H2}}$	$i_{A-A} = \left[\dot{E}_{r1} - \frac{(\dot{E}_{r1}\underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2}\underline{Z}_1)}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \frac{Z_{H1}Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \frac{Z_{H1}Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}} \right] \frac{1}{\underline{Z}_1}$ $i_{B-B} = \left[\dot{E}_{r2} - \frac{(\dot{E}_{r1}\underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2}\underline{Z}_1)}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \frac{Z_{H1}Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \frac{Z_{H1}Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}} \right] \frac{1}{\underline{Z}_2}$ $i_{C-C} = \frac{\dot{E}_{r1}\underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \frac{Z_{H1}Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \frac{Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}}$ $i_{D-D} = \frac{\dot{E}_{r1}\underline{Z}_2 + \dot{E}_{r2}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \frac{Z_{H1}Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \frac{Z_{H1}}{Z_{H1} + Z_{H2}}$
2.	Розрахунок напруги в системі	
	$\dot{U}_H = \dot{E}_{r1} - i_{A-A}\underline{Z}_1 = \dot{E}_{r2} - i_{B-B}\underline{Z}_1 = i_{C-C}R_{H1} = i_{D-D}R_{H2}$	$\dot{U}_H = \dot{E}_{r1} - i_{A-A}\underline{Z}_1 = \dot{E}_{r2} - i_{B-B}\underline{Z}_1 = i_{C-C}Z_{H1} = i_{D-D}Z_{H2}$
3.	Розрахунок активних та реактивних потужностей через перетини А-А, В-В, С-С	
	$P_{r1} = Re(I_1^* \dot{E}_1)$	$P_{r2} = Re(I_2^* \dot{E}_2)$

	$P_{H1} = I_{H1} ^2 R_{H1}$ $P_{H2} = I_{H2} ^2 R_{H2}$	
	де: I_{A-A}^*, I_{B-B}^* - комплекс, спряжений з комплексом I_{A-A}, I_{B-B} відповідно	
	$Q_{H1} = Q_{H2} = 0$	$Q_{H1} = I_{C-C} ^2 X_{H1}$ $Q_{H2} = I_{D-D} ^2 X_{H2}$
4.	Миттєві напруги, струми, повні потужності елементів системи	
	$u_{r1}(t) = e_{r1}(t) = \sqrt{2}E_{r1} \sin(\omega t + \psi_1)$ $u_{r2}(t) = e_{r2}(t) = \sqrt{2}E_{r2} \sin(\omega t + \psi_2)$	
	$u_{H1}(t) = u_{H2}(t) = \sqrt{2}\dot{U}_H \sin(\omega t + \arg \dot{U}_H)$	
	$u_H(t) = \sqrt{2} I_{C-C}R_{H1} \sin(\omega t + \arg(I_{C-C}R_{H1})) =$ $= \sqrt{2} I_{D-D}R_{H2} \sin(\omega t + \arg(I_{D-D}R_{H2}))$	$u_H(t) = \sqrt{2} I_{C-C}Z_{H1} \sin(\omega t + \arg(I_{C-C}Z_{H1})) =$ $= \sqrt{2} I_{D-D}Z_{H2} \sin(\omega t + \arg(I_{D-D}Z_{H2}))$
	$i_{A-A}(t) = \sqrt{2} I_{A-A} \sin(\omega t + \arg I_{A-A})$ $i_{B-B}(t) = \sqrt{2} I_{B-B} \sin(\omega t + \arg I_{B-B})$ $i_{C-C}(t) = \sqrt{2} I_{C-C} \sin(\omega t + \arg I_{C-C})$ $i_{D-D}(t) = \sqrt{2} I_{D-D} \sin(\omega t + \arg I_{D-D})$	
	$s_{r1}(t) = I_{A-A} E_{r1}[\cos(\arg I_{A-A} - \psi_1) - \cos(2\omega t + \arg I_{A-A} + \psi_1)]$ $s_{r2}(t) = I_{B-B} E_{r2}[\cos(\arg I_{B-B} - \psi_2) - \cos(2\omega t + \arg I_{B-B} + \psi_2)]$ $s_{H1}(t) = I_{C-C} \dot{U}_H[\cos(\arg I_{C-C} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg I_{C-C} + \arg \dot{U}_H)]$ $s_{H2}(t) = I_{D-D} \dot{U}_H[\cos(\arg I_{D-D} - \arg \dot{U}_H) - \cos(2\omega t + \arg I_{D-D} + \arg \dot{U}_H)]$	

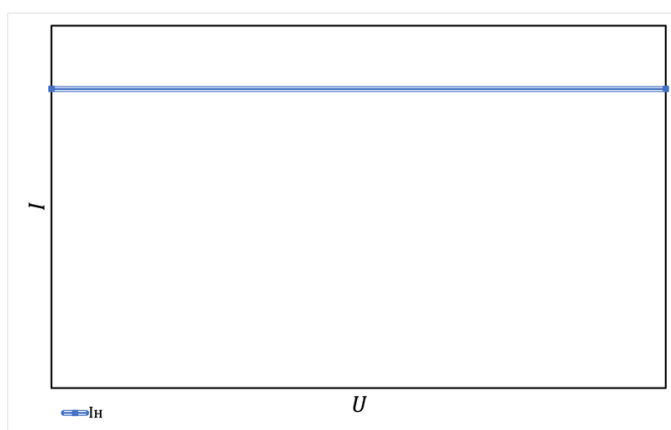
Висновки до розділу 3

В даному розділі сформовано базові схеми взаємодії постійного та змінного струму, до складу яких входить різна кількість генераторів та навантажень, проведено розрахунки процесів в базових схемах взаємодії. Застосовано методи комплексного числення для розрахунку процесів в базових схемах взаємодії змінного струму. Отримані результати дозволяють підвести будь-яку реальну систему Microgrid-Nanogrid до базової схеми взаємодії та розрахувати процеси.

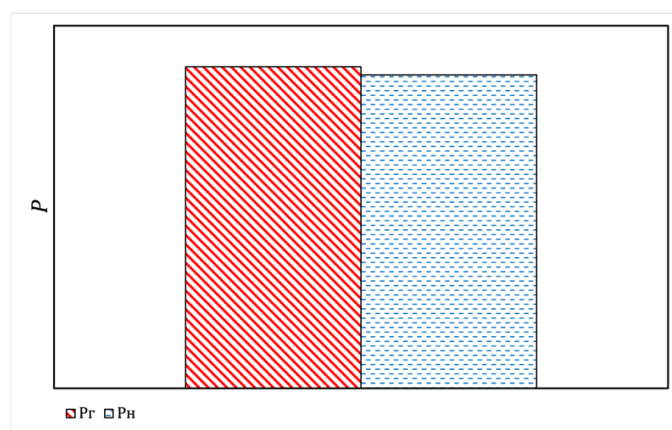
РОЗДІЛ 4 НАПРЯМКИ ПІДВЕДЕННЯ БАЛАНСУ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ MICROGRID-NANOGRID

4.1 Аналіз миттєвих характеристик та оцінка якісного впливу узгодженості та неузгодженості параметрів елементів на режим роботи системи

Балансування системи 1Г-1Н постійного струму є тривіальною задачею, так як тут відсутні такі неоптимальні режими, що притаманні більш складним системам, що містять декілька генераторів, в яких можуть до прикладу виникати режими, де генератори працюють один на одного. Оптимальне співвідношення між генерацією та споживанням електроенергії $P_G \approx P_H + \Delta P$, де ΔP – втрати потужності лінії, можна досягти за рахунок збільшення потужності генерування, або за рахунок зменшення потужності споживання.



а)



б)

Рисунок – 4.1

В усталеному режимі струм навантаження через перетин А-А буде $I_{A-A} = const$ (рис.3.5 а), потужність навантаження буде меншою за потужність генерування на величину втрат в лінії (рис.3.5 б).

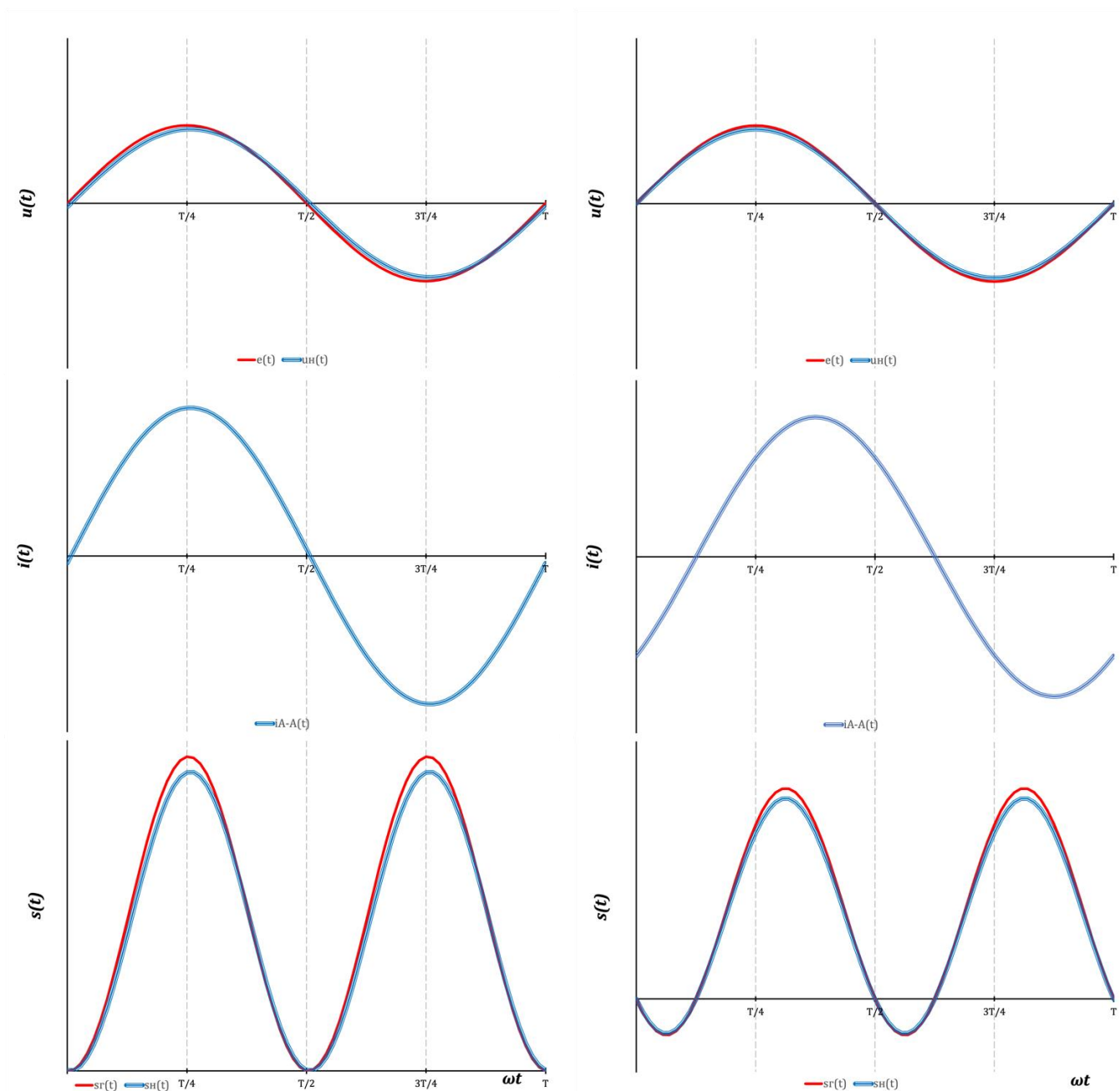
Маючи розраховані параметри та характеристики елементів системи, змоделюємо роботу систем з активним та активно-індуктивним характером навантаження, та проаналізуємо на якісному рівні їх відмінності на часових діаграмах на періоді Т (рис.3.7).

Як видно з часових діаграм (рис. 3.7), різниця між системами змінного струму, з однаковими вхідними величинами параметрів елементів, наявність індуктивної складової (рис. 3.7 б) вносить помітний вплив, який збільшується з ростом її величини.

Миттєва напруга на генераторі та на навантаженні залишилась без змін. На діаграмах видно, що ЕРС генератора більша за напругу навантаження, що спричинене падінням напруги на опорі лінії.

Миттєвий струм в перетині А-А у системі що містить активно-індуктивне навантаження відбувся зсув фази струму.

Повна миттєва потужність на інтервалах періоду T : $[0 \div T/4]$ та $[T/2 \div 3T/4]$ починає переходити через нуль, змінюючи при цьому свій знак, а отже і напрямок, через що відбувається перетік потужності в перетині А-А, і якась її частина (в залежності від величини реактивного опору) починає повертатись назад на генератор. Тут виникає неоптимальний режим, при якому виникає реактивна складова потужності, яка зазвичай не споживається, та яку необхідно компенсувати за рахунок підключення до системи ємнісних елементів.



а) Активний х-р навантаження

б) Активно-індуктивний х-р навантаження

Рисунок – 4.2 – Часові діаграми миттєвих напруг, струмів та потужностей генератору та навантажень для системи 1Г-1Н АС

Система один генератор два навантаження

Для даної конфігурації системи 1Г-2Н постійного струму, що розглядається існує $2^1=2$ можливих випадки комбінації параметрів пар елементів, що можуть бути

рівними чи нерівним один відносно одного (табл. 2), при цьому в випадку нерівності параметрів пари елементів, параметер одного елементу виражаємо через інший з додаванням приросту, в даному випадку ΔR , який може буди як від'ємний, так і додатній.

Таблиця 2

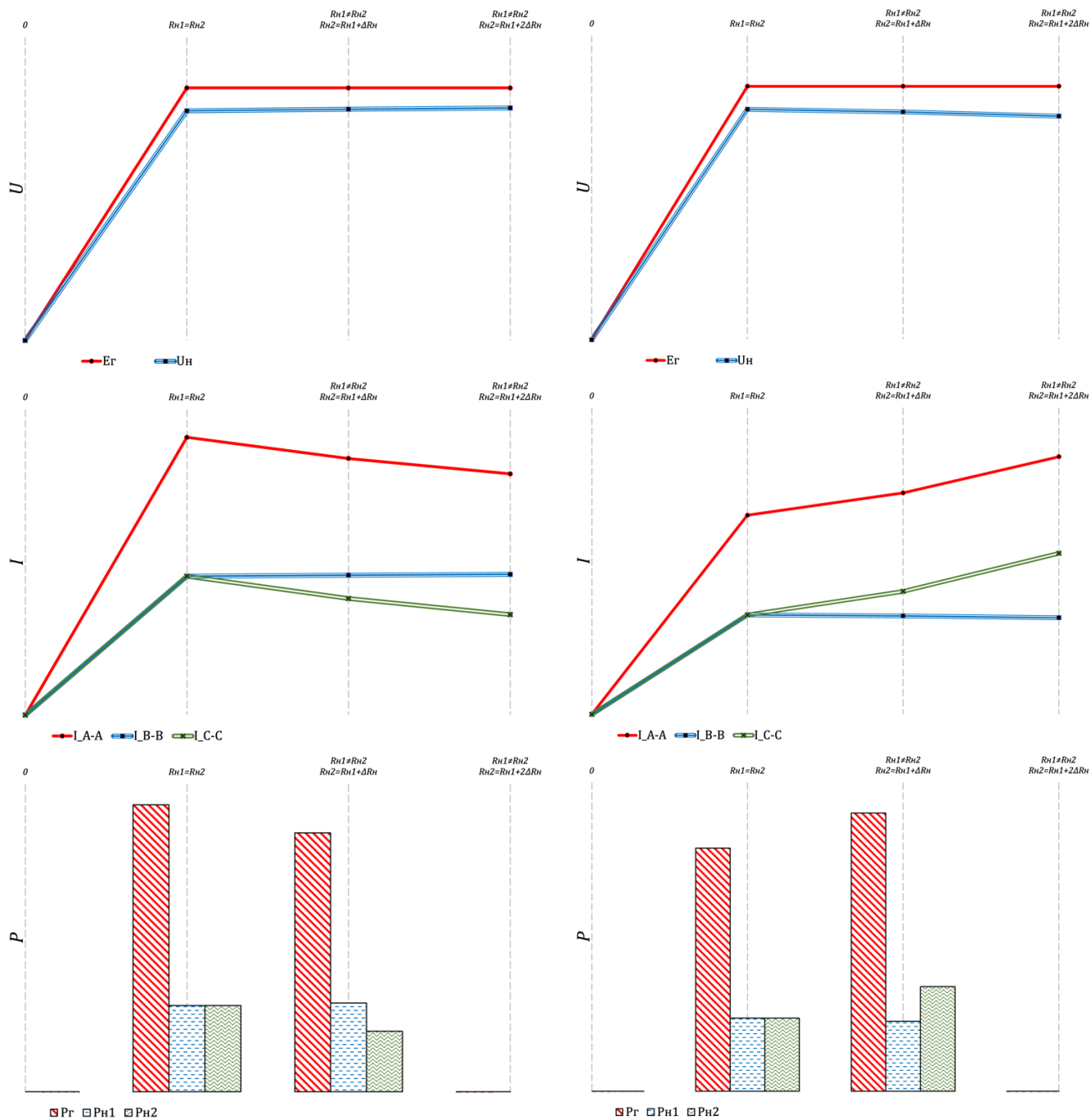
1.	$R_{H1} = R_{H2}$	–
2.	$R_{H1} \neq R_{H2}$	$R_{H2} = R_{H1} + \Delta R$

Змоделюємо та проаналізуємо роботу системи з урахуванням двох вищевказаних випадків що спричиняють небаланс та оцінімо їх якісний вплив на графіках напруги, струму та потужності (рис. 3) в залежності від умов наведених в табл. 2.

1. При $R_{H1} = R_{H2}$ струми та потужності навантажень однакові $I_{B-B} = I_{C-C}$, $P_{H1} = P_{H2}$, система працює в ідеальному режимі, проте напруга генератора більша за напругу навантаження через втрати що спричинені опором лінії та внутрішнім опором генератору R .

2. При $R_{H1} \neq R_{H2}$ напруга навантаження по мірі зростання $\Delta R > 0$ (рис. 3 а) в додатному напрямку починає незначно зростати, струми I_{A-A} та I_{C-C} та потужності елементів P_{Γ} та P_{H2} в перетині генератора Γ та навантаження R_{H2} знижуються, струм I_{B-B} та потужність P_{H1} в перетині з навантаженням залишається без змін.

В разі якщо приріст від'ємний, $\Delta R < 0$ (рис. 3 б), напруга навантаження незначно знижується, струми I_{A-A} та I_{C-C} та потужності елементів P_{Γ} та P_{H2} в перетині генератора Γ та навантаження R_{H2} зростають, струм I_{B-B} та потужність P_{H1} в перетині з навантаженням залишається без змін.



а) $\Delta > 0$

б) $\Delta < 0$

Рисунок 4.3 – Графіки напруги, струму та потужності в залежності від наданих приростів для системи 1Г-2Н DC

Отже, в розглянутій системі, зростання потужності споживання в одному з перетинів знижує потужність генерування, а скидання навантаження викликає —

зростання потужності генерування. Перетин одного навантаження не впливає на перетин іншого.

Система 1Г-2Н змінного струму

Для даної конфігурації системи 1Г-2Н змінного струму, що розглядається у разі активного характеру навантаження існує $2^1=2$ можливих випадки комбінації параметрів пар елементів, у разі активно-індуктивного характеру кількість випадків зростає до $2^2=4$ (табл. 4).

Таблиця 4

1.	$R_{H1} = R_{H2}$	$L_{H1} = L_{H2}$	—
2.	$R_{H1} \neq R_{H2}$	$L_{H1} = L_{H2}$	$R_{H2} = R_{H1} + \Delta R$
3.	$R_{H1} = R_{H2}$	$L_{H1} \neq L_{H2}$	$L_{H2} = L_{H1} + \Delta L$
4.	$R_{H1} \neq R_{H2}$	$L_{H1} \neq L_{H2}$	$\begin{array}{ll} R_{H2} & L_{H2} \\ = R_{H1} + \Delta R & = L_{H1} + \Delta L \end{array}$

Змоделюємо та проаналізуємо роботу системи з активним (рис.5 а) та активно індуктивним характером навантаження (рис.5 б) з урахуванням вищевказаних в табл. 4, випадків що спричиняють небаланс та оцінімо їх якісний вплив часових діаграмах миттєвих напруг, струмів та повних потужностей.

За усіх умов у разі активного та активно-індуктивного навантаження напруга в системі 1Г-2Н змінного струму якісно не змінюється фаза сигналу напруги незмінна через паралельне з'єднання опорів навантаження, які можна розглядати як один еквівалентний опір.

Системі з активним навантаженням, якій відповідають умови 1-2 табл. 4:

1. За умов $R_{H1} = R_{H2}$ інтервал $[0; T]$ рис.5 а. всі миттєві струми та повні потужності мають однакові фази, характеристики перетинів В-В та С-С однакові.

2. За умов $R_{H1} \neq R_{H2}$ інтервал $[T; 3T]$ рис.5 а. відбуваються лише кількісні зміни: через зростання активного опору R_{H2} знижується миттєві струми та повні

потужності в перетинах генератора А-А та цього ж навантаження С-С, характеристики перетину В-В з опором R_{H1} не змінюються.

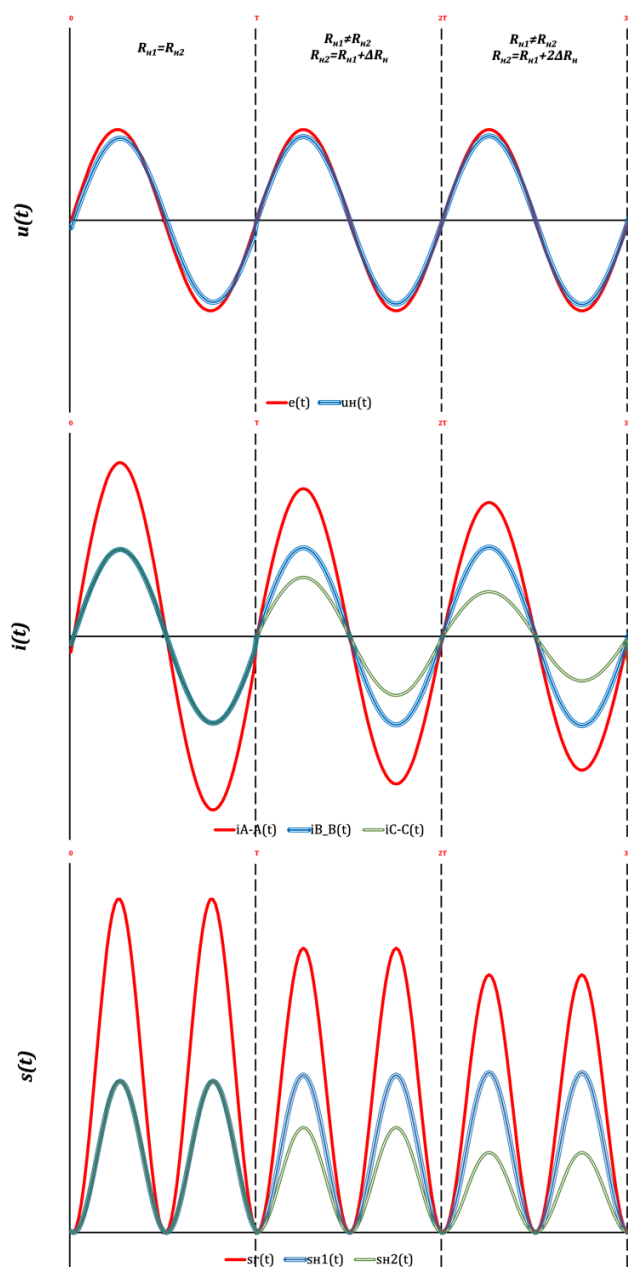
Системі з активно-індуктивним навантаженням, для якої розглянемо умови 1-3 **табл. 4:**

1. За умов $R_{H1} = R_{H2}$ та $L_{H1} = L_{H2}$ інтервал $[0; T]$ **рис.5 б.** всі миттєві струми та повні потужності мають однакові фази, характеристики перетинів В-В та С-С однакові, відмінність від системи з чисто активним навантаженням заключається у переході миттєвих повних потужностей через 0, через що не вся потужність споживається навантаженнями, частина повертається назад на генератор.

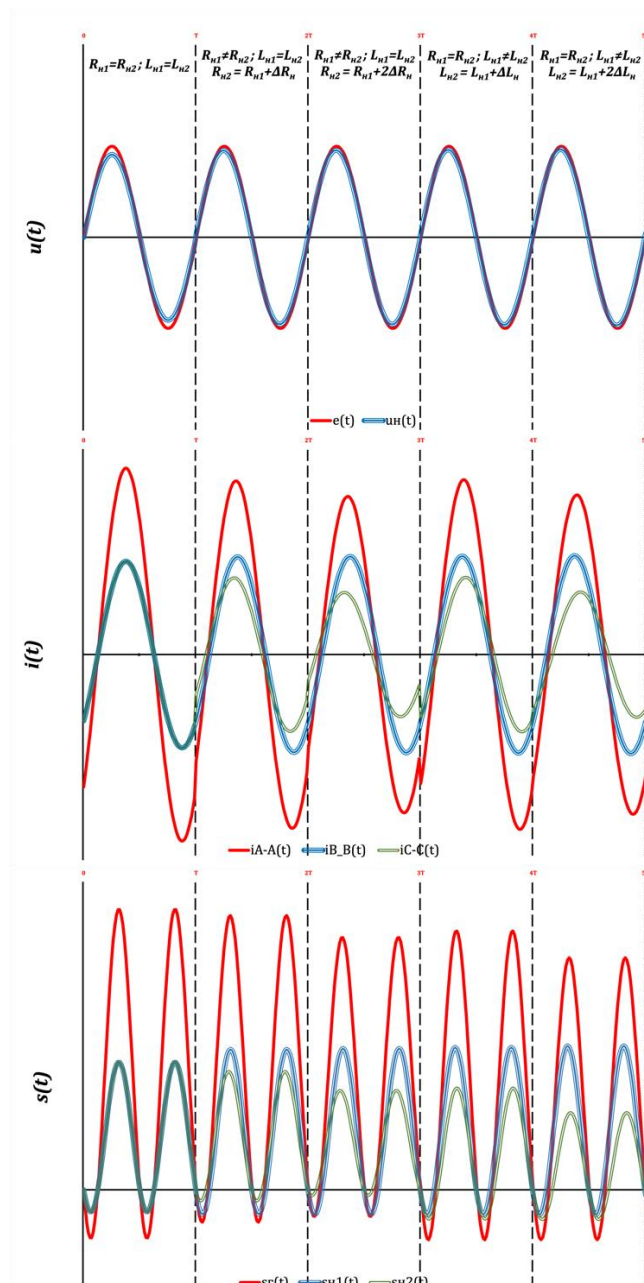
2. За умов $R_{H1} \neq R_{H2}$ та $L_{H1} = L_{H2}$, інтервал $[T; 3T]$ **рис.5 б.** відбуваються одночасно кількісні та якісні зміни: через зростання активного опору R_{H2} знижується миттєвий струм та потужність в перетинах генератора А-А та цього ж навантаження С-С, разом з цим знижується амплітуди сигналів, що переходять через 0, відбувається зсув між фазами сигналів у цих перетинів при якому миттєвий струм та повна потужність навантаження 2 (С-С) починає по фазі випереджати миттєві струми та потужності генератора (А-А) та навантаження 1 та (В-В).

3. За умов $R_{H1} = R_{H2}$ та $L_{H1} \neq L_{H2}$, інтервал $[3T; 5T]$ **рис.5 б.** відбуваються одночасно кількісні та якісні зміни: через зростання реактивного опору X_{H2} знижується миттєвий струм та потужність в перетинах генератора А-А та цього ж навантаження С-С, разом з цим знижується амплітуди сигналів, що переходять через 0.

Кількісна відмінність від випадку з приростом активного навантаження заключається у меншому зниженні амплітуд струмів та потужностей, що мають знак «+», проте зростає значення амплітуд, що переходять через нуль та мають знак «-», якісна відмінність полягає у зсуві між фазами сигналів у перетинах генератора (А-А) та навантаження (С-С) при якому миттєвий струм та повна потужність навантаження 2 (С-С) починає по мірі збільшення приросту відставати по фазі від миттєвих струмів та потужностей генератора (А-А) та навантаження 1 та (В-В), що мають майже однаковий зсув.



а) Активний х-р навантаження



б) Активно-індуктивний х-р навантаження

Рисунок – 4.4 – Часові діаграми миттєвих напруг, струмів та потужностей генератору та навантажень для системи 1Г-2Н АС

Система два генератора одне навантаження

Система 2Г-1Н постійного струму

Для даної конфігурації системи 1Г-2Н постійного струму, що розглядається існує $2^2=4$ можливих випадки комбінації параметрів пар елементів, що можуть бути рівними чи нерівним один відносно одного (табл. 2), при цьому в випадку нерівності параметрів пари елементів, параметр одного елементу виражаємо через інший з

додаванням приросту, в даному випадку ΔE_r , ΔR , який може бути як від'ємний, так і додатний. Кожен приріст ΔE_r та ΔR для більшої наглядності приймаємо як 50% від початкового параметру одного з двох елементів, які рівні між собою:

$$\Delta E_r = 0,5E_{r1} = 0,5E_{r2}$$

$$\Delta R = 0,5R_1 = 0,5R_2$$

Таблиця 2

1.	$E_{r1} = E_{r2}$	$R_1 = R_2$	
2.	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$R_1 = R_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$
3.	$E_{r1} = E_{r2}$	$R_1 \neq R_2$	$R_2 = R_1 + \Delta R$
4.	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$R_1 \neq R_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r; R_2 = R_1 + \Delta R$

Змоделюємо та проаналізуємо роботу системи з урахуванням трьох вищевказаних випадків що спричиняють небаланс та оцінимо їх якісний вплив на графіках напруги, струму та потужності (рис. 3) в залежності від умов наведених в табл. 2 надавши по два кроки приростів для кожного випадку.

1. При $E_{r1} = E_{r2}$ та $R_1 = R_2$ струми та потужності в перетинах генераторів однакові $I_{A-A} = I_{B-B}$, $P_{r1} = P_{r2}$, система працює в ідеальному режимі, навантаження відбиває від генераторів однакову потужність, проте напруги генераторів більші за напругу навантаження через втрати що спричинені опором лінії та внутрішнім опором генераторів R_1 та R_2 .

2. При $E_{r1} \neq E_{r2}$ у разі додатного приросту $\Delta E_r > 0$ (рис. 3 а) зростає ЕРС генератора 2 та напруга навантаження, зростають струми в перетинах генератора 2 (В-В) та навантаження (С-С), у перетині генератора 1 (А-А) що має меншу ЕРС струм змінює знак, а отже і напрямок, через що цей генератор починає не віддавати а споживати потужність, так як другий генератор працює на перший. Виникає режим надмірної генерації, при якому навантаження не взагалі не відбирає потужності, що

генерується першим генератором, при цьому відбирає не всю потужність, яка генерується другим генератором.

У разі від'ємного приросту $\Delta E_T < 0$ (рис. 3 б) виникає протилежна ситуація з точністю навпаки. Як висновки: якщо ЕРС генераторів різні, тоді генератор, що має меншу ЕРС буде споживати.

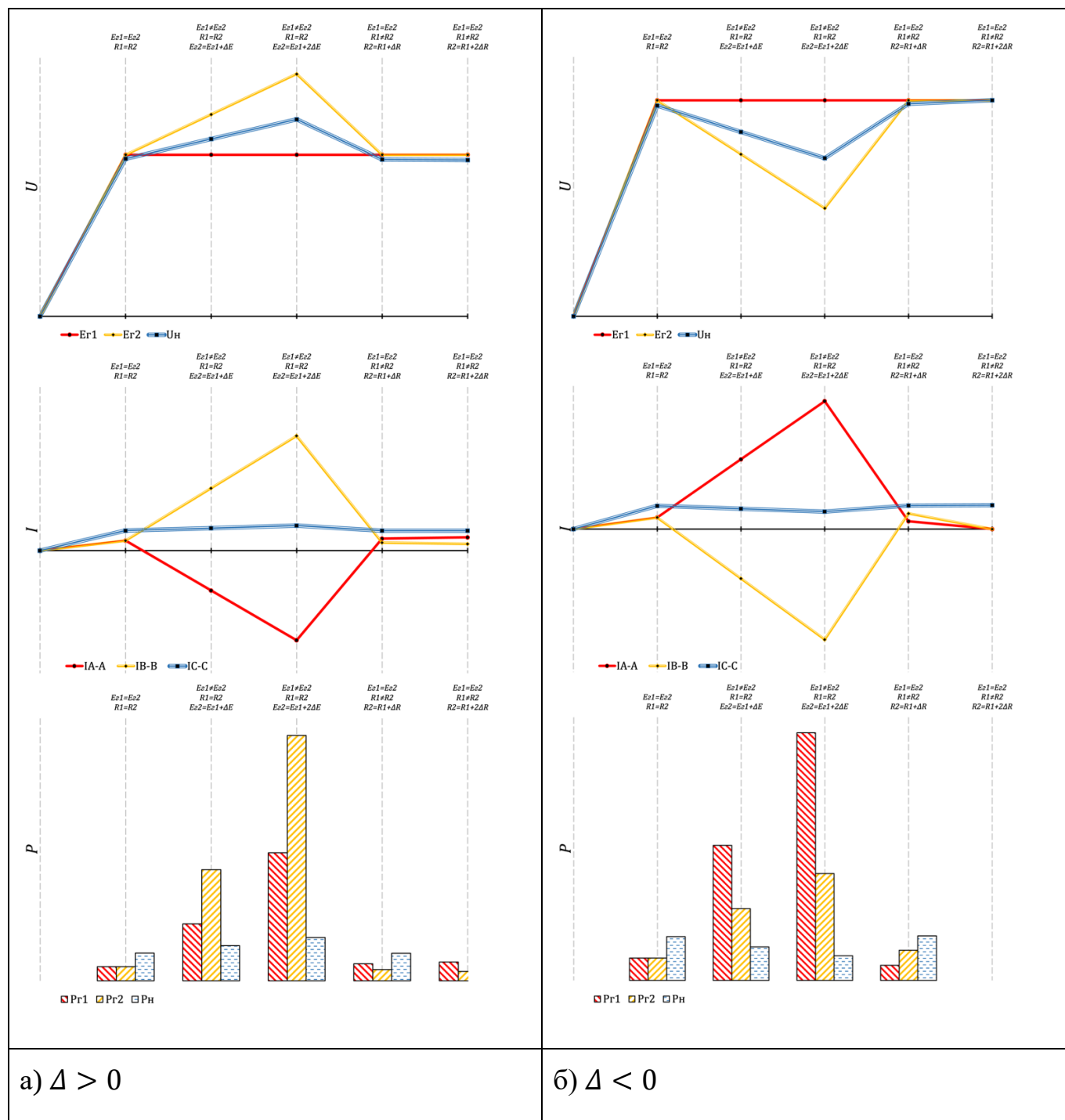


Рисунок 4.5 – Графіки напруги, струму та потужності в залежності від наданих приростів для системи 2Г-1Н DC

3. При $R_1 \neq R_2$ у разі додатного приросту $\Delta R > 0$ (рис. 3 а) помітних якісних змін не відбувається, лише незначні кількісні. Напруга навантаження на незначну величину по мірі збільшення приросту починає незначно знижувати, проте в порівнянні з ЕРС генераторів во перебувають майже на одному рівні, струм через перетин що має більший опір, в даному випадку В-В знижується на незначну величину, разом з цим знижується потужність на виході з цього перетину. Навантаження відбирає потужність від обох генераторів.

У разі від'ємного приросту $\Delta R < 0$ (рис. 3 б) спостерігається по мірі росту приросту незначне зростання ЕРС генератора 2 та напруги навантаження, знижується струм в перетинах А-А та В-В генераторів 1 та 2, проте незначно зростає струм навантаження С-С. Навантаження відбирає потужність від обох генераторів.

Система 2Г-1Н змінного струму

Для даної конфігурації системи 2Г-1Н змінного струму, що розглядається у разі активного та активно-індуктивного характеру навантаження існує $2^4=16$ можливих випадки комбінації параметрів пар елементів (табл. 4), де номер групи відповідає кількості пар, елементи в яких не рівні між собою., Детально розглянемо 1 групу, в якій серед усіх пар не рівна тільки одна, що дає змогу в індивідуальному порядку оцінити вплив кожної пари на режим роботи системи.

Таблиця 4

	1	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	–		
I	2	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$		
	3	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi$		
	4	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 = L_2$	$R_2 = R_1 + \Delta R$		
	5	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 \neq L_2$	$L_2 = L_1 + \Delta L$		
II	6	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi$	
	7	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$\psi_1 = \psi_2$	$L_1 = L_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$	$R_2 = R_1 + \Delta R$	
	8	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 \neq L_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$	$L_2 = L_1 + \Delta L$	
	9	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 = L_2$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi$	$R_2 = R_1 + \Delta R$	
	10	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 \neq L_2$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi$	$L_2 = L_1 + \Delta L$	
	11	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_2 = R_1 + \Delta R$	$L_2 = L_1 + \Delta L$	
III	12	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 = L_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi$	$R_2 = R_1 + \Delta R$
	13	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$	$R_2 = R_1 + \Delta R$	$L_2 = L_1 + \Delta L$

14	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 \neq L_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi$	$L_2 = L_1 + \Delta L$
15	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi$	$R_2 = R_1 + \Delta R$	$L_2 = L_1 + \Delta L$
16	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$ $R_2 = R_1 + \Delta R$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi$ $L_2 = L_1 + \Delta L$	

Змоделюємо та проаналізуємо роботу системи з активним (рис.6 а) та (рис.7 а) та активно індуктивним характером навантаження (рис.6 б) та (рис.7 б) з урахуванням вищевказаних в табл. 4, випадків що спричиняють небаланс та оцінимо їх якісний вплив часових діаграмах миттєвих напруг, струмів та повних потужностей.

Для системи з активним навантаженням, я якої розглядаємо умови 1-5 табл. 4:

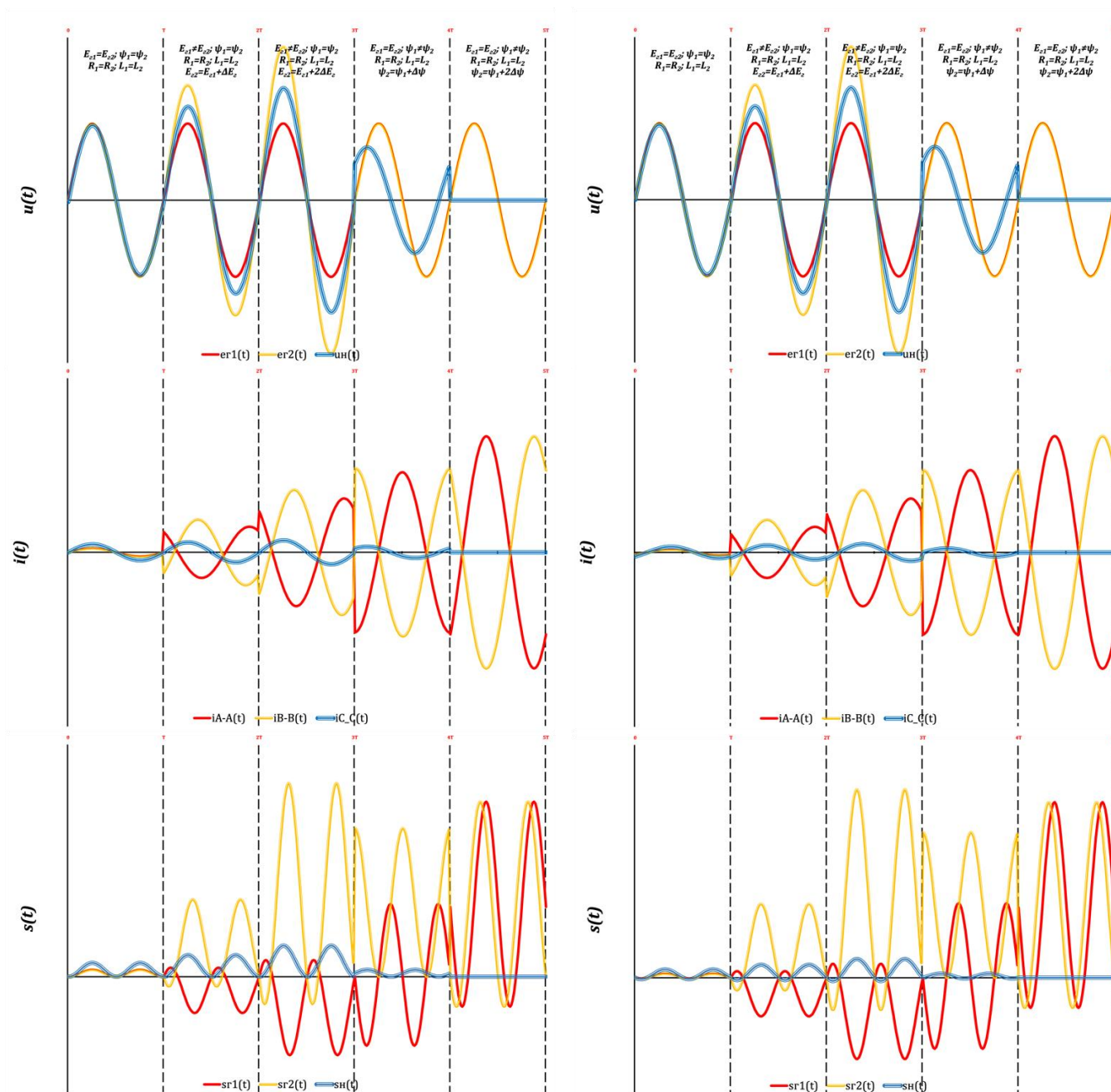
1. За умов рівності всі параметрів пар елементів інтервал $[0; T]$ (рис.6 а) та (рис.7 а), всі миттєві струми та повні потужності мають однакові фази, характеристики перетинів В-В та С-С однакові.

2. За умови $E_{r1} \neq E_{r2}$ інтервал $[T; 3T]$ рис.6 а відбуваються як кількісні так і якісні зміни: зростає ЕРС генератора 2 та напруга навантаження, зростають миттєві струми в перетинах генератора 2 (В-В) та навантаження (С-С), у перетині генератора 1 (А-А) що має меншу ЕРС струм фази та змінює знак відносно струму перетину В-В з 2 генератором, через що цей генератор починає не віддавати а споживати потужність, так як другий генератор працює на перший, що видно з графіку потужності, на якому потужність генерування переходить через нуль і майже весь час залишається від'ємною. Виникає як і у випадку з постійним струмом режим надмірної генерації, при якому навантаження майже не відбирає потужності, що генерується першим генератором, при цьому відбирає не всю потужність, яка генерується другим генератором.

3. За умови $\psi_1 \neq \psi_2$ інтервал $[3T; 5T]$ рис.6 а відбуваються як кількісні так і якісні зміни:

При першому прирості $\psi_2 = \psi_1 + \pi/2$ на інтервалі $[3T; 4T]$ напруга навантаження випереджає по фазі напругу обох генераторів, фази яких рівні, амплітуди струмів в перетинах генераторів А-А та В-В значно переважають струм навантаження в перетині С-С, генератор 1 споживає потужність, згенеровано генератором 2, генератори працюють в режимі надмірної генерації.

При другому прирості $\psi_2 = \psi_1 + \pi$ на інтервалі $[4T; 5T]$ виникає КЗ в перетині навантаження, воно взагалі не споживає навантаження, генератори працюють в певні моменти часу один на одного.



а) Активний х-р навантаження

б) Активно-індуктивний х-р навантаження

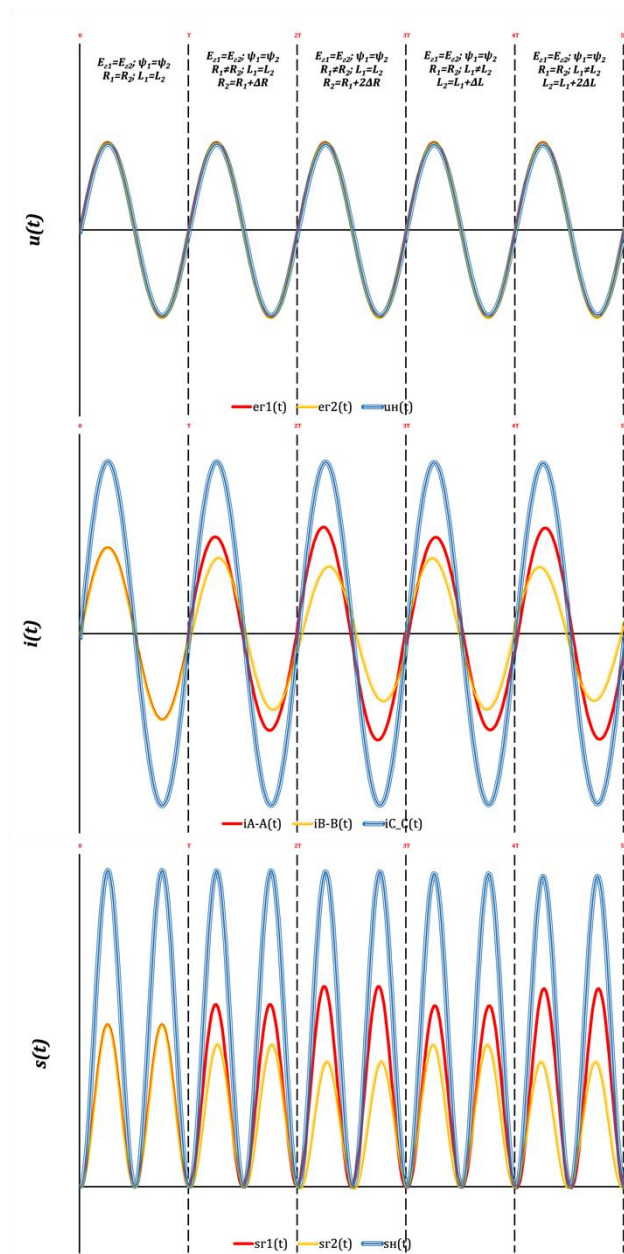
а)

б)

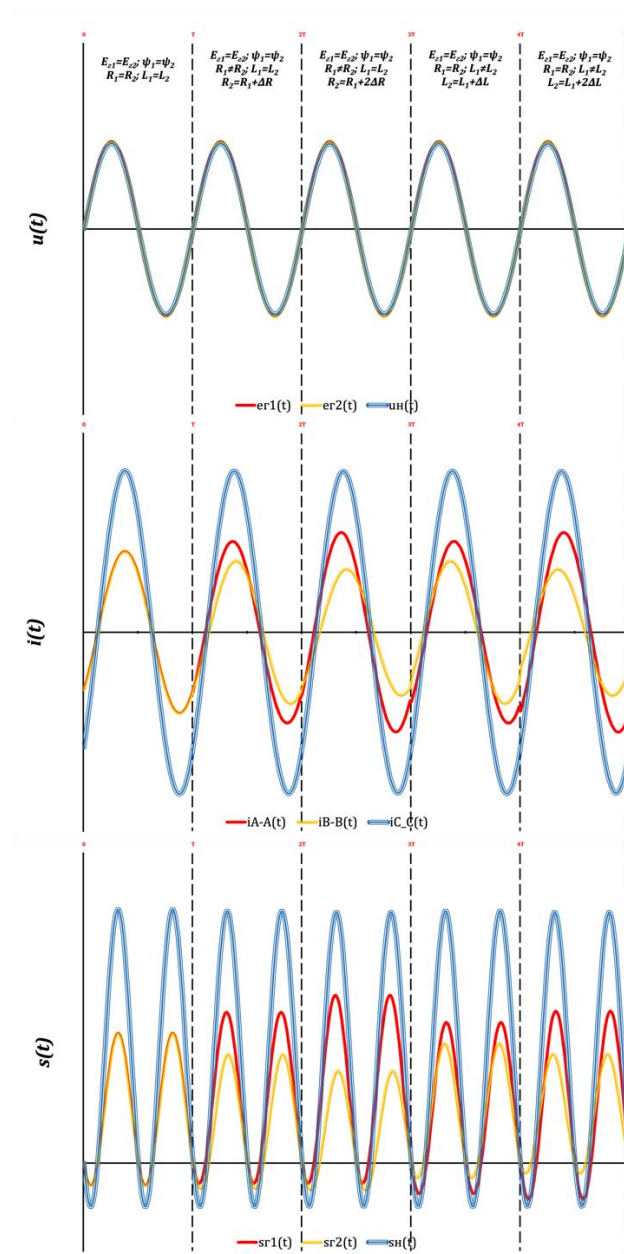
Рисунок 4.6 – Графіки миттєвих значень напруги, струму та потужності в залежності від наданих приростів для системи 2Г-1Н змінного струму для активного а) та активно-індуктивного характеру навантажень (випадок 3)

4. За умови $R_1 \neq R_2$ інтервал $[T; 3T]$ рис.7 а відбуваються лише кількісні зміни, що характерні для аналогічного випадку системи постійного струму – напруга залишається без змін, в даному випадку зменшується струм в перетині В-В що має більший опір, одночасно з цим зростає струм в перетині А-А, потужність навантаження не зазнає помітних кількісних змін.

5. За умови $L_1 \neq L_2$ інтервал $[3T; 5T]$ **рис.7 а** відбуваються кількісні та якісні зміни, напруга залишається без змін, в даному випадку зменшується струм в перетині В-В що має більший опір, одночасно з цим зростає струм в перетині А-А, потужність навантаження не зазнає помітних кількісних змін, відбувається зсув по фазі струму та потужності в перетині з В-В, який має більшу індуктивну складову, через що починає випереджати по фазі ці величини.



а) Активний х-р навантаження



б) Активно-індуктивний х-р навантаження

а)

б)

Рисунок 4.7 – Графіки миттєвих значень напруги, струму та потужності в залежності від наданих приростів для системи 2Г-1Н змінного струму для активного а) та активно-індуктивного характеру навантажень (випадок 3)

Система один генератор одне навантаження

Система 2Г-2Н постійного струму

Для системи 2Г-2Н постійного струму що розглядається, кількість можливих варіантів складає 8, **табл. 2**

Таблиця 2					
	1	$E_1 = E_2$	$R_1 = R_2$	$R_{H1} = R_{H2}$	—
I	2	$E_1 \neq E_2$	$R_1 = R_2$	$R_{H1} = R_{H2}$	$E_2 = E_1 + \Delta E$
	3	$E_1 = E_2$	$R_1 \neq R_2$	$R_{H1} = R_{H2}$	$R_2 = R_1 + \Delta R$
	4	$E_1 = E_2$	$R_1 = R_2$	$R_{H1} \neq R_{H2}$	$R_{H2} = R_{H1} + \Delta R_H$
II	5	$E_1 \neq E_2$	$R_1 \neq R_2$	$R_{H1} = R_{H2}$	$E_2 = E_1 + \Delta E$ $R_2 = R_1 + \Delta R$
	6	$E_1 \neq E_2$	$R_1 = R_2$	$R_{H1} \neq R_{H2}$	$E_2 = E_1 + \Delta E$ $R_{H2} = R_{H1} + \Delta R_H$
	7	$E_1 = E_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_2 = R_1 + \Delta R$ $R_{H2} = R_{H1} + \Delta R_H$
	8	$E_1 \neq E_2$	$R_1 \neq R_2$	$R_{H1} \neq R_{H2}$	$E_2 = E_1 + \Delta E$ $R_2 = R_1 + \Delta R$ $R_{H2} = R_{H1} + \Delta R_H$

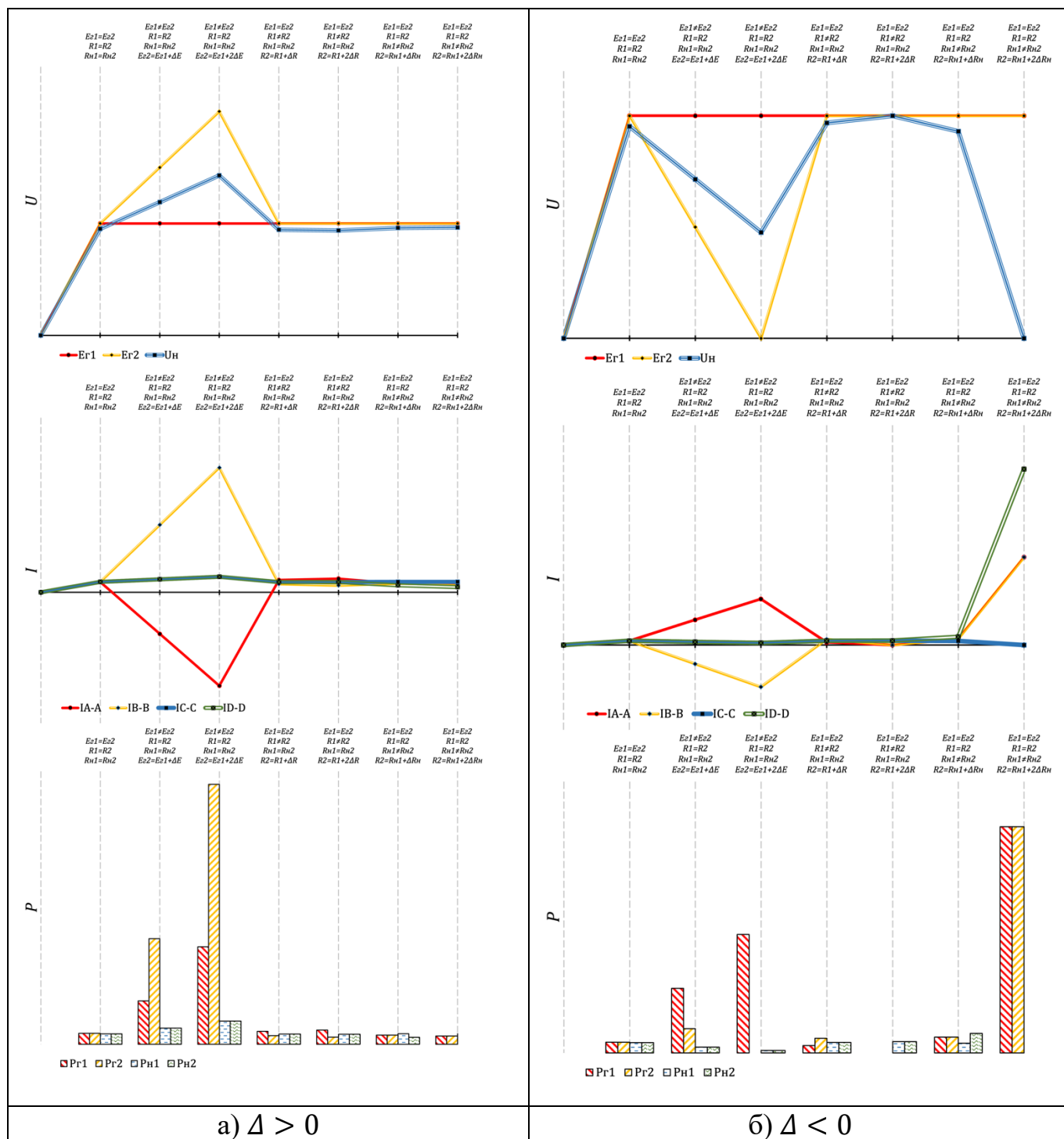


Рисунок 4.8 – Графіки напруги, струму та потужності в залежності від наданих приростів для системи 2Г-2Н DC

Система 2Г-2Н змінного струму

Для системи з чисто активним характером навантаження, що розглядаємо маємо 5 пар елементів, що рівні або нерівні між собою, кількість можливих комбінацій з яких для такої конфігурації становить $2^5 = 32$. Для системи з активно-індуктивним характером навантаження, для 6 пар елементів кількість можливих комбінацій становить відповідно $2^6 = 64$. В табл. 4, де номер групи відповідає кількості пар, елементи в яких не рівні між собою. Аналогічно до аналізу попередніх

систем, детально розглянемо 1 групу, в якій серед усіх пар не рівна тільки одна, що дає змогу в індивідуальному порядку оцінити вплив кожної пари на режим роботи системи.

Таблиця 4

	1	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	–
I	2	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$
	3	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta \psi$
	4	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$R_2 = R_1 + \Delta R$
	5	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$L_2 = L_1 + \Delta L$
	6	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} \neq R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$R_{h2} = R_{h1} + \Delta R_h$
	7	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} \neq L_{h2}$	$L_{h2} = L_{h1} + \Delta L_h$
II	8	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$ $\psi_2 = \psi_1 + \Delta \psi$
	21	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} \neq R_{h2}$	$L_{h1} \neq L_{h2}$	$R_{h2} = R_{h1} + \Delta R_h$ $L_{h2} = L_{h1} + \Delta L_h$
III	22	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 = L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$ $\psi_2 = \psi_1 + \Delta \psi$ $R_2 = R_1 + \Delta R$
	41	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_{h1} \neq R_{h2}$	$L_{h1} \neq L_{h2}$	$L_2 = L_1 + \Delta L$ $R_{h2} = R_{h1} + \Delta R_h$ $L_{h2} = L_{h1} + \Delta L_h$
IV	42	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_{h1} = R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$ $\psi_2 = \psi_1 + \Delta \psi$ $R_2 = R_1 + \Delta R$ $L_2 = L_1 + \Delta L$
	57	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_{h1} \neq R_{h2}$	$L_{h1} \neq L_{h2}$	$R_2 = R_1 + \Delta R$ $L_2 = L_1 + \Delta L$ $R_{h2} = R_{h1} + \Delta R_h$ $L_{h2} = L_{h1} + \Delta L_h$
V	58	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_{h1} \neq R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$ $\psi_2 = \psi_1 + \Delta \psi$ $R_2 = R_1 + \Delta R$ $L_2 = L_{h1} + \Delta L_h$ $R_{h2} = R_{h1} + \Delta R_h$
	63	$E_{r1} = E_{r2}$	$\psi_1 = \psi_2$	$R_1 = R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_{h1} \neq R_{h2}$	$L_{h1} \neq L_{h2}$	$\psi_2 = \psi_1 + \Delta \psi$ $R_2 = R_1 + \Delta R$ $L_{h2} = L_{h1} + \Delta L_h$ $R_{h2} = R_{h1} + \Delta R_h$ $L_{h2} = L_{h1} + \Delta L_h$
	64	$E_{r1} \neq E_{r2}$	$\psi_1 \neq \psi_2$	$R_1 \neq R_2$	$L_1 \neq L_2$	$R_{h1} \neq R_{h2}$	$L_{h1} = L_{h2}$	$E_{r2} = E_{r1} + \Delta E_r$ $\psi_2 = \psi_1 + \Delta \psi$ $R_2 = R_1 + \Delta R$ $L_2 = L_1 + \Delta L$ $R_{h2} = R_{h1} + \Delta R_h$ $L_{h2} = L_{h1} + \Delta L_h$

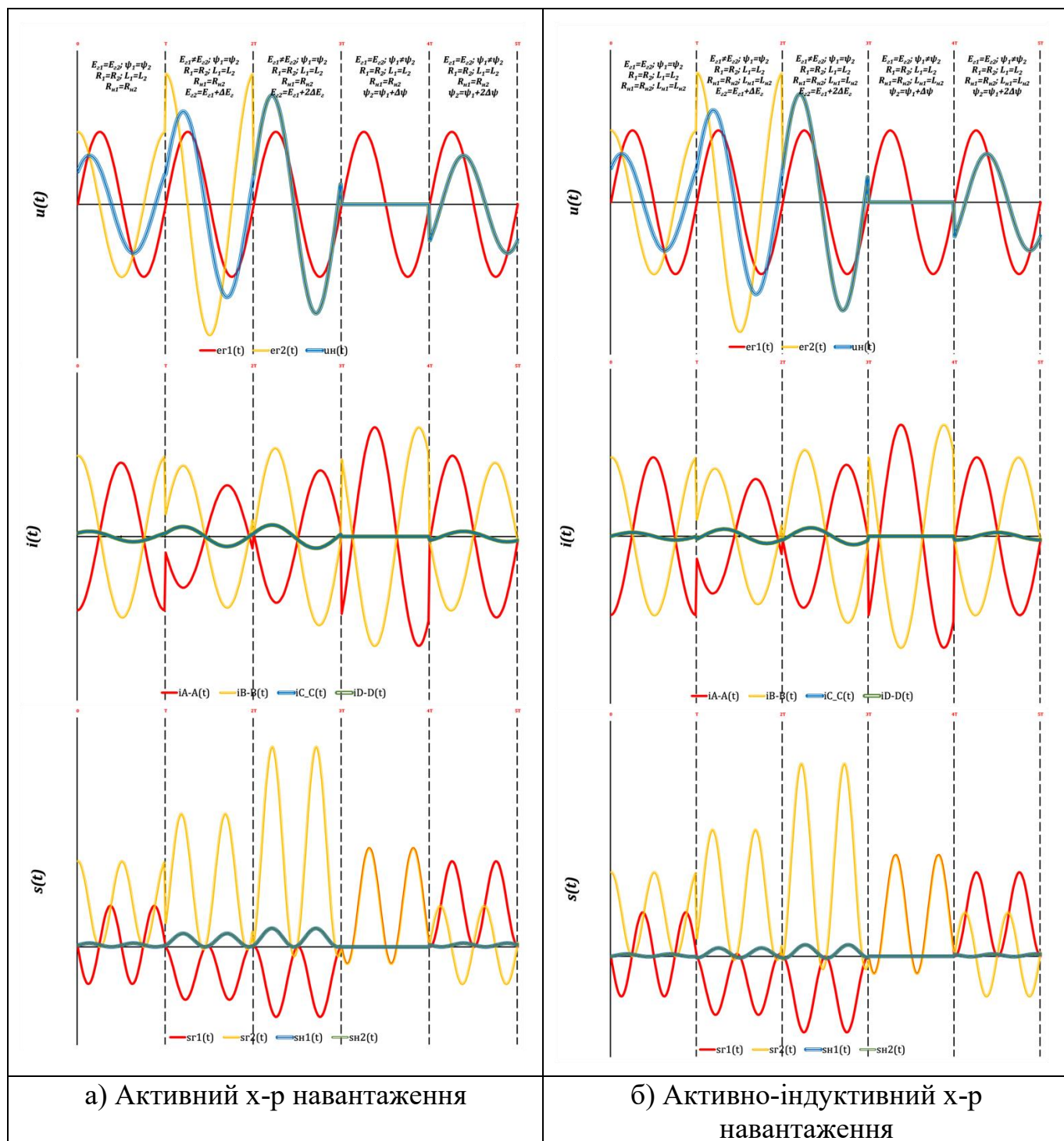


Рисунок 4.9 – Часові діаграми миттєвих напруг, струмів та потужностей генераторів та навантажень для системи 2Г-2Н АС (випадок 1, 2, 3)

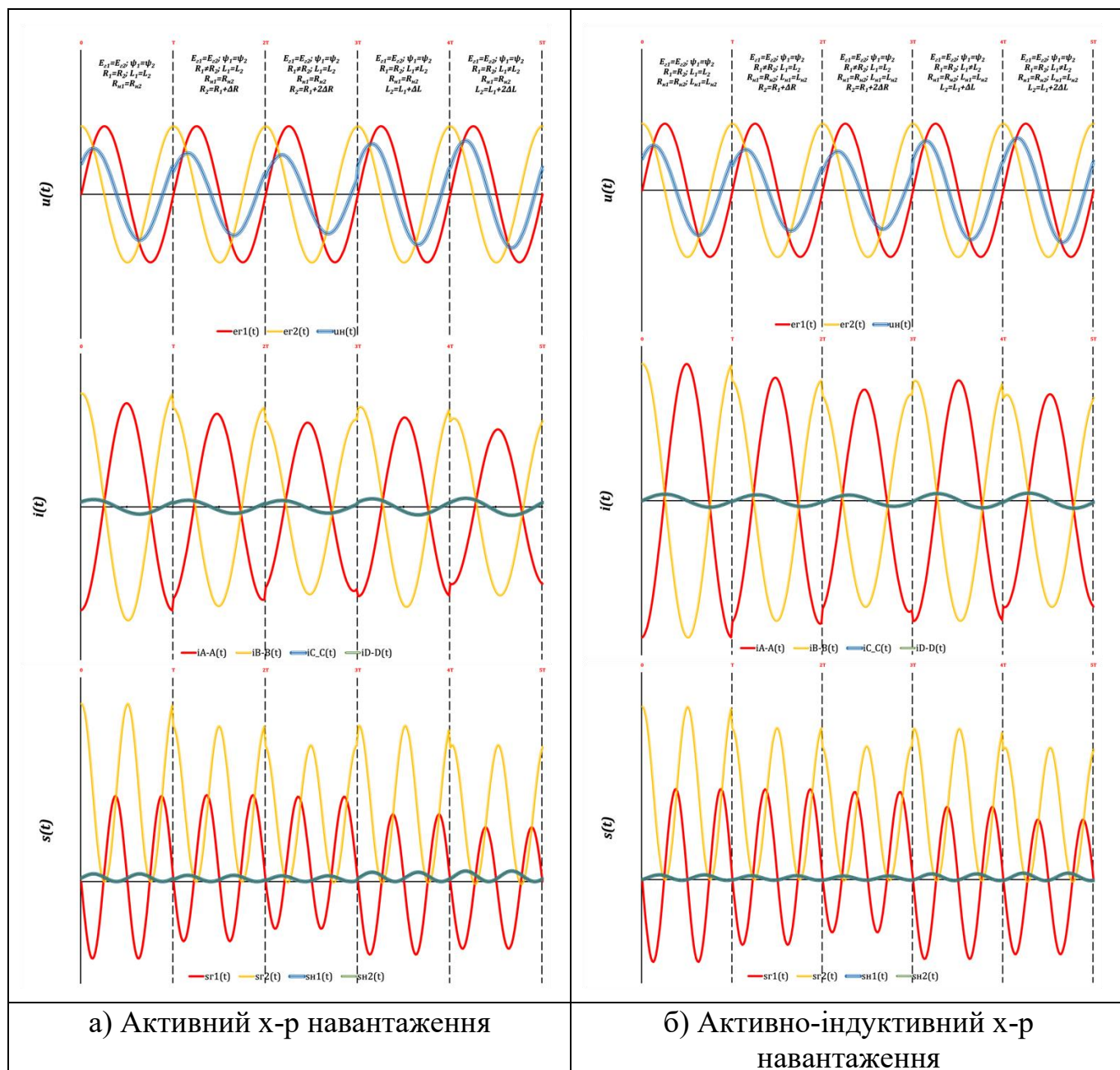


Рисунок 4.10 – Часові діаграми миттєвих напруг, струмів та потужностей генераторів та навантажень для системи 2Г-2Н АС (випадок 1, 4, 5)

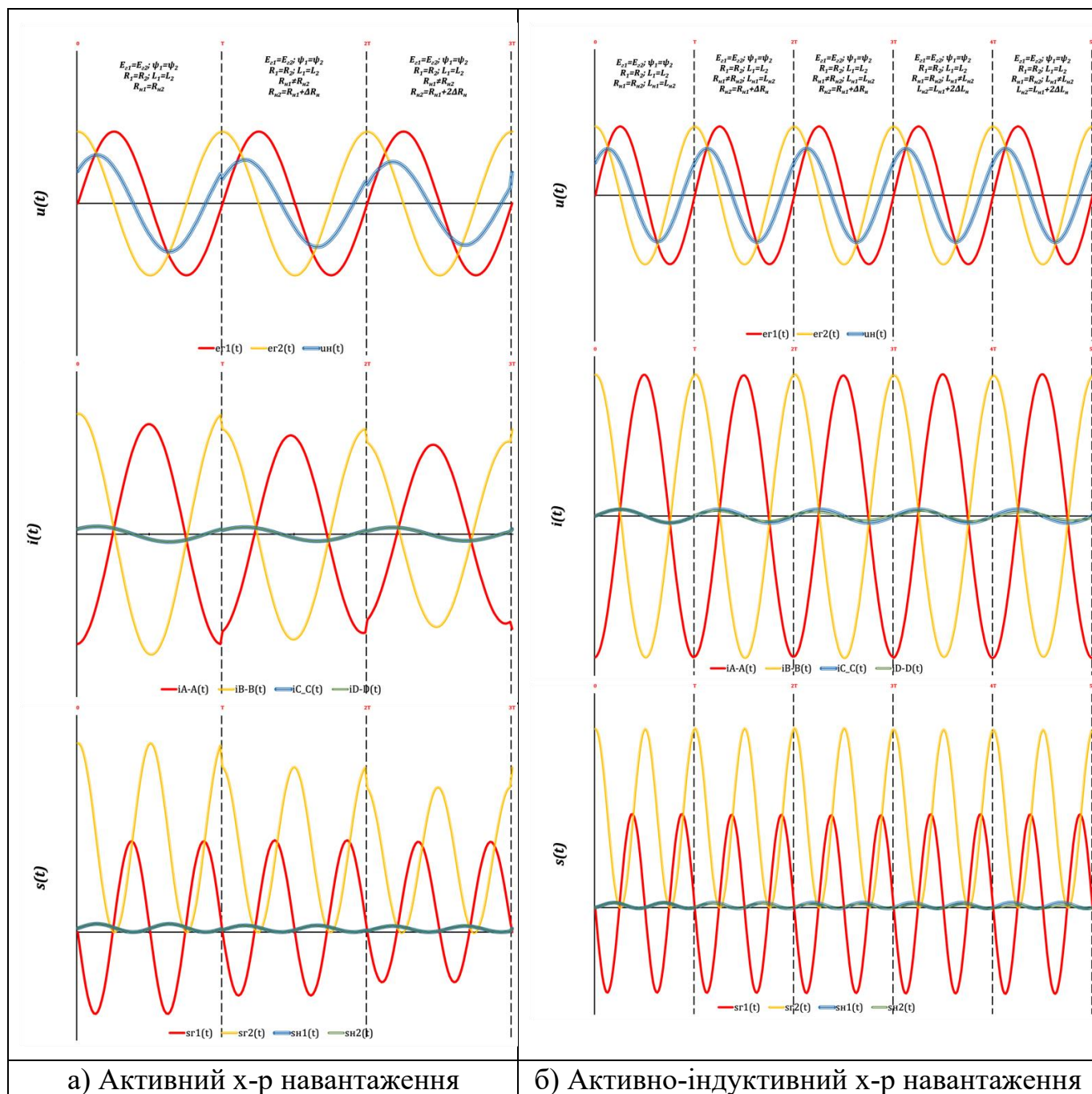


Рисунок 4.11 – Часові діаграми миттєвих напруг, струмів та потужностей генераторів та навантажень для системи 2Г-2Н АС (випадок 1, 6, 7)

4.2 Оцінка та порівняння енергетичних характеристик базових схем взаємодії та мета їх балансування

Проаналізуємо кількісний вплив для всіх типових схем взаємодії 1Г-1Н, постійного та змінного струму для випадків узгодженості та неузгодженості параметрів елементів між собою. В даному пункті для всіх систем змінного струму індуктивною в перетинах генератора (реактивний опір лінії) будемо нехтувати, як показано в пункті 4.1 її вплив нехтовно малий.

Система 1 генератор 1 навантаження постійного струму

Для системи 1Г-1Н постійного та змінного струму розглянемо зміну процесів в залежності від співвідношень значень опору лінії та опору навантаження, проаналізуємо їх кількісний вплив.

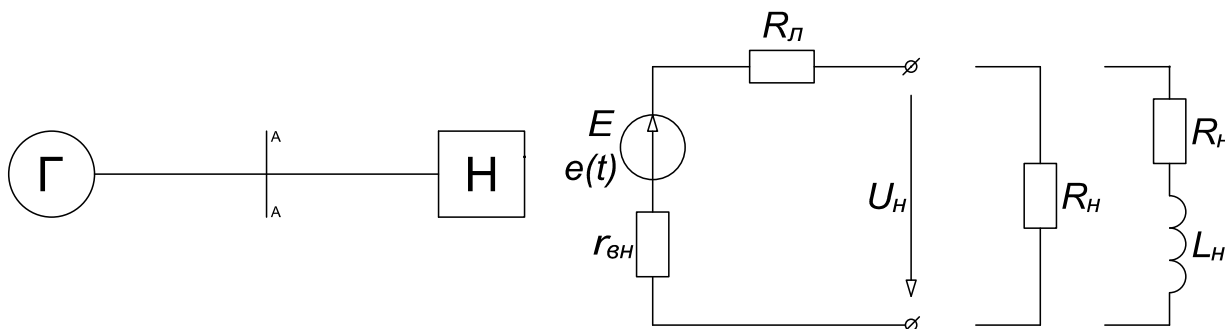


Рисунок 4.12 – Система 1Г-1Н постійного та змінного струму

Для системи постійного струму розглянемо відношення внутрішнього опору генератора та лінії до опору навантаження: R/R_H , де $R_{вн} = r_{вн} + R_л$. Розглянемо 2 випадки: у першому буде збільшуватись опір $R_{вн}$, у другому опір навантаження R_H .

Задаємо наступні початкові параметри для системи постійного струму:

$$E_{Г0} = 100 \text{ В}; R_{вн0} = 1 \text{ Ом}; R_{H0} = 10 \text{ Ом}$$

Надаємо приріст до початкової величини внутрішнього опору $R_{вн0} + \Delta R_{вн}$:

$$\Delta R_{вн} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 \text{ Ом}$$

$$R_{вн} - var; R_{вн0} + \Delta R_{вн} = 1; 1,01; 1,02 \dots 2$$

При цьому співвідношення між опором має наступні кількісні значення:

$$(R_{вн0} + \Delta R_{вн})/R_H = 0,1; 0,101; 0,102 \dots 2$$

Надаємо приріст до початкової величини опору навантаження $R_{H0} + \Delta R_H$:

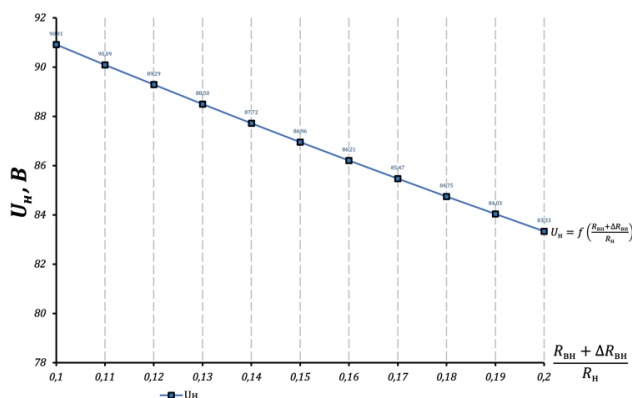
$$\Delta R_H = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10 \text{ Ом}$$

$$R_H - var; R_{H0} + \Delta R_H = 10; 11; \dots 20$$

При цьому співвідношення між опорами має наступні кількісні значення:

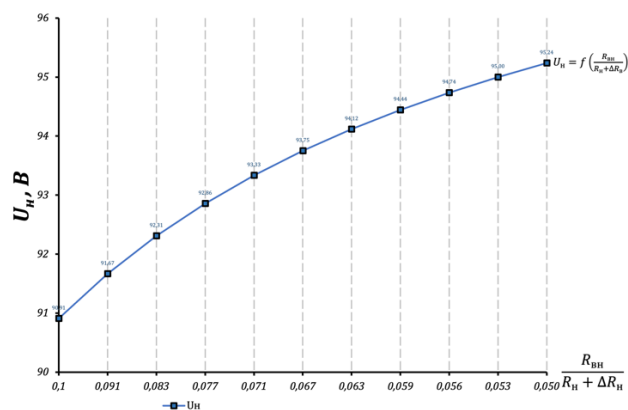
$$R_{BH}/(R_{H0} + \Delta R_H) = 0,1; 0,909; 0,083 \dots 0,05$$

Побудуємо графіки напруги, струму, потужності (рис. 4.13 – 4.15) в залежності від співвідношення опорів $U_H = f(R_{BH}/R_H)$, $I_{A-A} = f(R_{BH}/R_H)$, $P_\Gamma = f(R_{BH}/R_H)$ та $P_H = f(R_{BH}/R_H)$ для випадків, коли варіюється внутрішній опір та опір навантаження.



$$R_{BH} - var (1 \dots 2) \text{ Ом} \quad U_H = f\left(\frac{R_{BH0} + \Delta R_{BH}}{R_H}\right) \\ \Delta R_{BH} = 0,1; 0 \dots 1 \text{ Ом}$$

а)

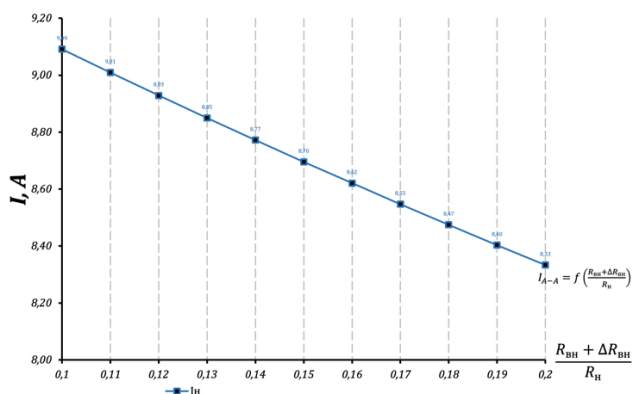


$$R_H - var (10 \dots 20) \text{ Ом} \quad U_H = f\left(\frac{R_{BH}}{R_{H0} + \Delta R_H}\right) \\ \Delta R_H = 1; 2; \dots 10 \text{ Ом}$$

б)

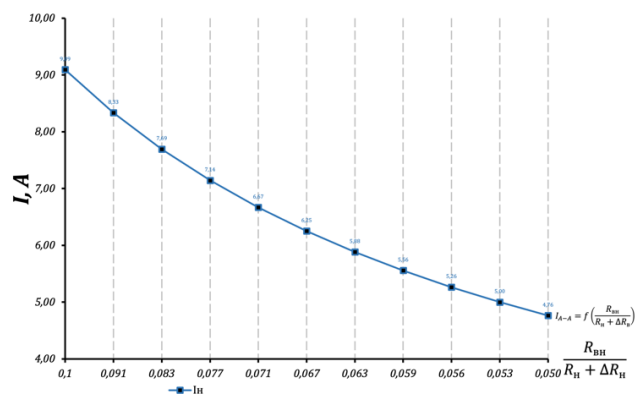
Рисунок 4.13 – Вплив співвідношень R_{BH}/R_H на напругу навантаження U_H

В разі, якщо внутрішній опір R_{BH} зростає (рис.4.13 а), напруга навантаження зменшується, у випадку зростання опору навантаження R_H (рис.4.13 б), зростає і напруга навантаження.



$$R_{BH} - var (1 \dots 2) \text{ Ом} \quad I_{A-A} = f\left(\frac{R_{BH0} + \Delta R_{BH}}{R_H}\right) \\ \Delta R_{BH} = 0,1; 0 \dots 1 \text{ Ом}$$

а)



$$R_H - var (10 \dots 20) \text{ Ом} \quad I_{A-A} = f\left(\frac{R_{BH}}{R_{H0} + \Delta R_H}\right) \\ \Delta R_H = 1; 2; \dots 10 \text{ Ом}$$

б)

Рисунок 4.14 – Вплив співвідношень R/R_H на струм навантаження I_{A-A}

У випадку зі струмом навантаження, коли значення внутрішнього опору R_{BH} або R_H зростає, струм навантаження в обох випадках зменшується, проте у випадку зростання опору навантаження R_H струм зменшується суттєвіше, так як опір навантаження більше за внутрішній опір більше ніж у 10 разів.

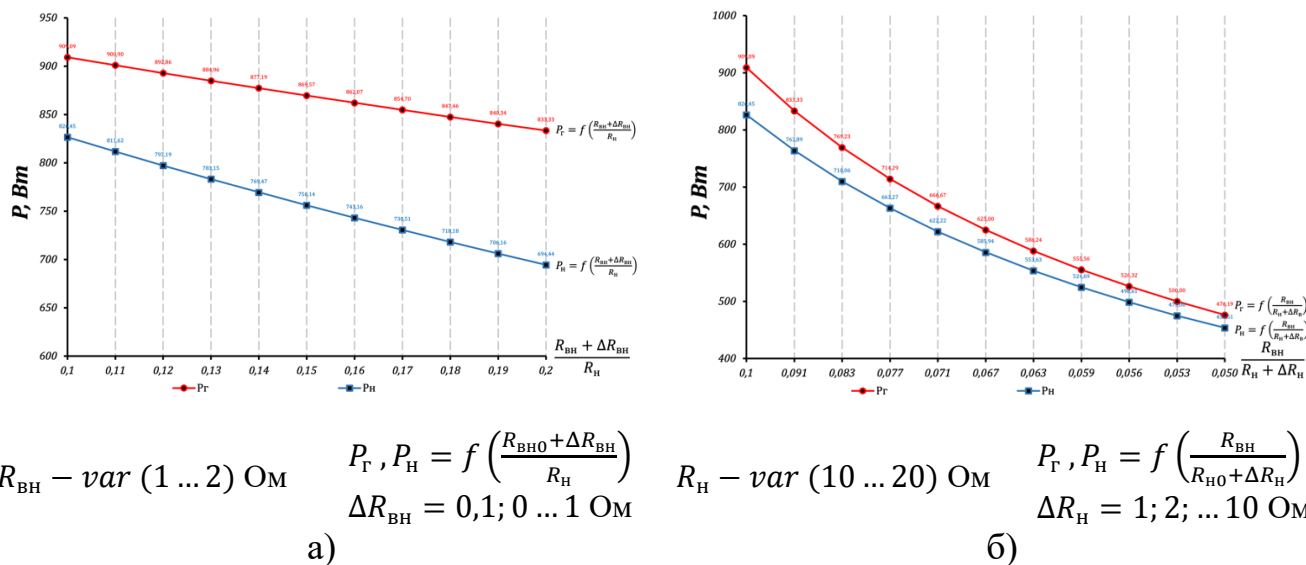


Рисунок 4.15 – Вплив співвідношень R/R_H на потужність генератора P_G та навантаження P_H

У випадку збільшення опору навантаження зменшується різниця потужностей генератора та навантаження.

Система 1 генератор 1 навантаження змінного струму

Для системи змінного струму розглянемо відношення внутрішнього опору до суми активного та реактивного опору навантаження: R/Z_H , де $Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$.

Розглянемо 3 випадки:

- збільшується активний внутрішній опір R_{BH} ;
- збільшується активний опір навантаження R_H ;
- збільшується реактивний опір навантаження X_H .

Задаємо наступні початкові параметри для системи змінного струму:

$$E_{G0} = 100 \text{ В}; R_{BH0} = 1 \text{ Ом}; R_{H0} = 10 \text{ Ом}; X_{H0} = 10 \text{ Ом}$$

1) Надаємо приріст до початкової величини внутрішнього опору $R_{BH0} + \Delta R_{BH}$:

$$\Delta R_{BH} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 \text{ Ом}$$

$$R_{BH} - var; R_{BH0} + \Delta R_{BH} = 1; 1,01; 1,02 \dots 2$$

При цьому співвідношення між опорами має наступні кількісні значення:

$$(R_{\text{ВН}0} + \Delta R_{\text{ВН}}) / \sqrt{R_{\text{Н}}^2 + X_{\text{Н}}^2} = 0,0705; 0,0776; 0,0846 \dots 0,1410$$

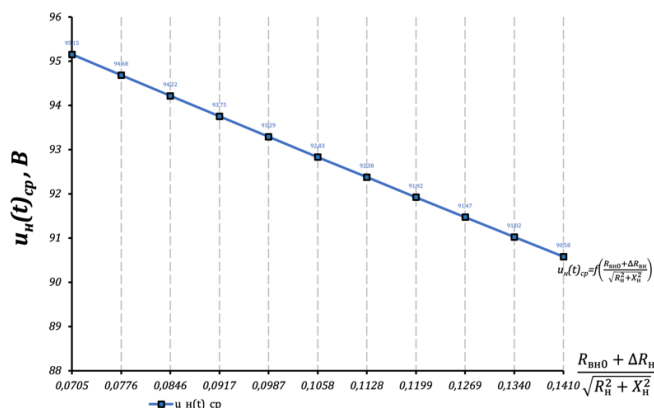
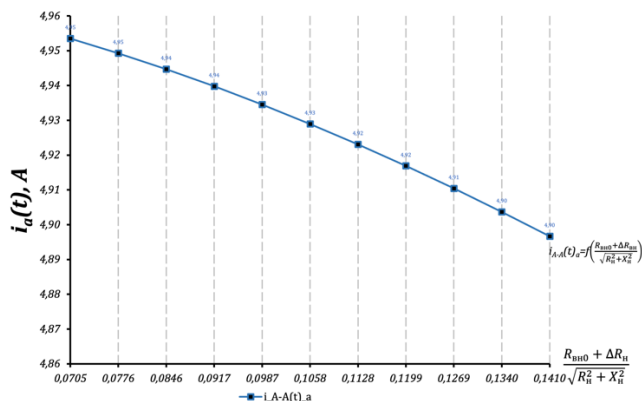
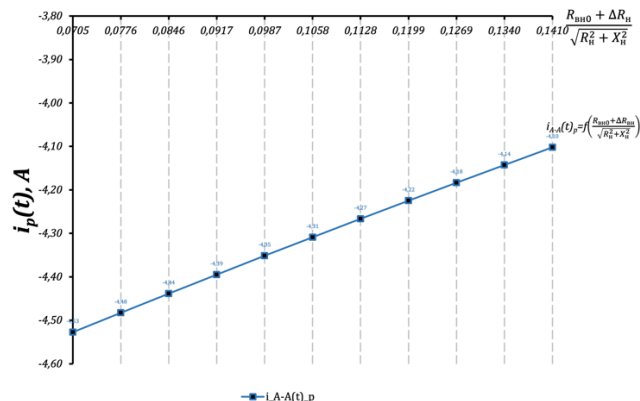


Рисунок 4.16 – Вплив співвідношень $R_{\text{ВН}} / \sqrt{R_{\text{Н}}^2 + X_{\text{Н}}^2}$ на діючу напругу напругу навантаження $u_{\text{H}}(t)_{\text{cp}}$ при $R_{\text{ВН}} - \text{var} (1 \dots 2) \text{ Ом}$, $U_{\text{H}} = f\left(\frac{R_{\text{ВН}0} + \Delta R_{\text{ВН}}}{R_{\text{Н}}}\right)$

При збільшенні внутрішнього опору знижується напруга навантаження.



а)



б)

Рисунок 4.17 – Вплив співвідношень $R_{\text{ВН}} / \sqrt{R_{\text{Н}}^2 + X_{\text{Н}}^2}$ на діючий активний $i_{\text{A}-\text{A}}(t)_{\text{a}}$ (рис. 4.17 а) та реактивний $i_{\text{A}-\text{A}}(t)_{\text{p}}$ (рис. 4.17 б) струми при $R_{\text{ВН}} - \text{var} (1 \dots 2) \text{ Ом}$

При зростанні внутрішнього опору, знижується активний струм, одночасно збільшується реактивний струм, який має від'ємне значення, а отже і протилежний напрямок відносно активного, що означає, що він йде від навантаження до генератора.

навантаження $u_H(t)_{cp}$ при $R_H - var (10 \dots 20) \text{ Ом}$, $U_H = f\left(\frac{R_{BH0} + \Delta R_{BH}}{(\Delta R_{H0} + \Delta R_H)^2 + X_H^2}\right)$

Пилкоподібна форма напруги при прирості до активного опору навантаження спричинена різними значенням кута зсуву фаз між струмом та напругою, який змінюється через різні значення в співвідношенні реактивного опору до активного:

$\varphi = \arctg\left(\frac{X_H}{R_H}\right)$, що більш наглядно показано в п.4.1 на часових діаграмах миттєвих характеристик. Покажемо зміну кута в залежності від зростаючого активного опору для декількох співвідношень:

- при $\arctg\left(\frac{10}{13}\right) = 0,658 \text{ рад} = 37,71 \text{ град}$; $\cos 0,658 = 0,79$
- при $\arctg\left(\frac{10}{14}\right) = 0,622 \text{ рад} = 35,68 \text{ град}$; $\cos 0,622 = 0,81$
- при $\arctg\left(\frac{10}{13}\right) = 0,59 \text{ рад} = 33,83 \text{ град}$; $\cos 0,59 = 0,83$

В результаті маємо: що при зниженні значення кута зсуву фаз зростає коефіцієнт потужності

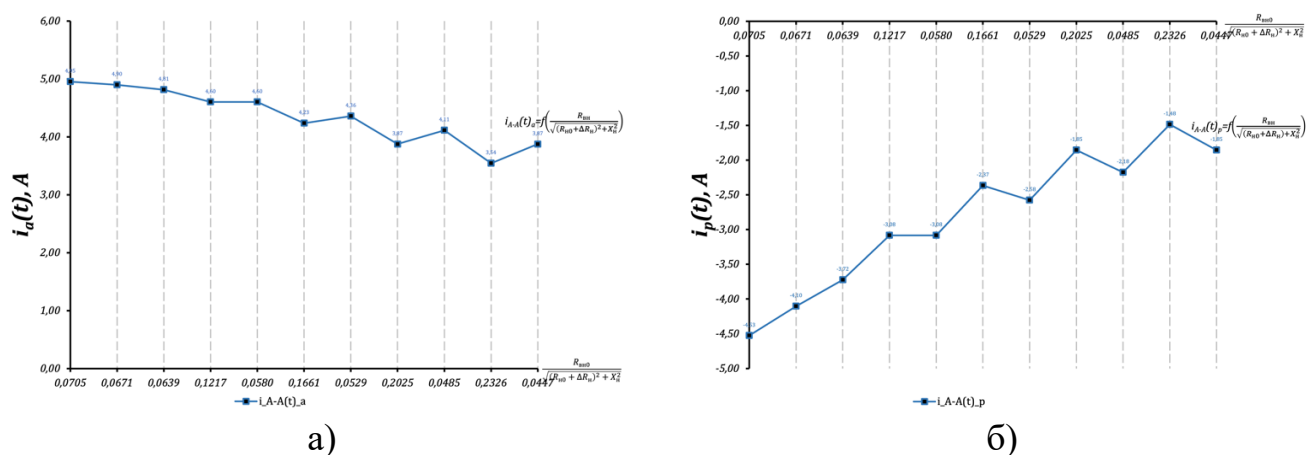


Рисунок 4.20 – Вплив співвідношень $R_{BH} / \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$ на діючий активний $i_{A-A}(t)_a$ (рис. 4.20 а) та реактивний $i_{A-A}(t)_p$ (рис. 4.20 б) струми при $R_H - var (10 \dots 20) \text{ Ом}$

Активний струм при збільшенні активного опору навантаження знижується, реактивний зростає, хоче все ще заливається від'ємним при заданих приростах, виділяється на навантаженні та йде на генератор. По мірі збільшення активного опору навантаження знижується кут зсуву фаз,

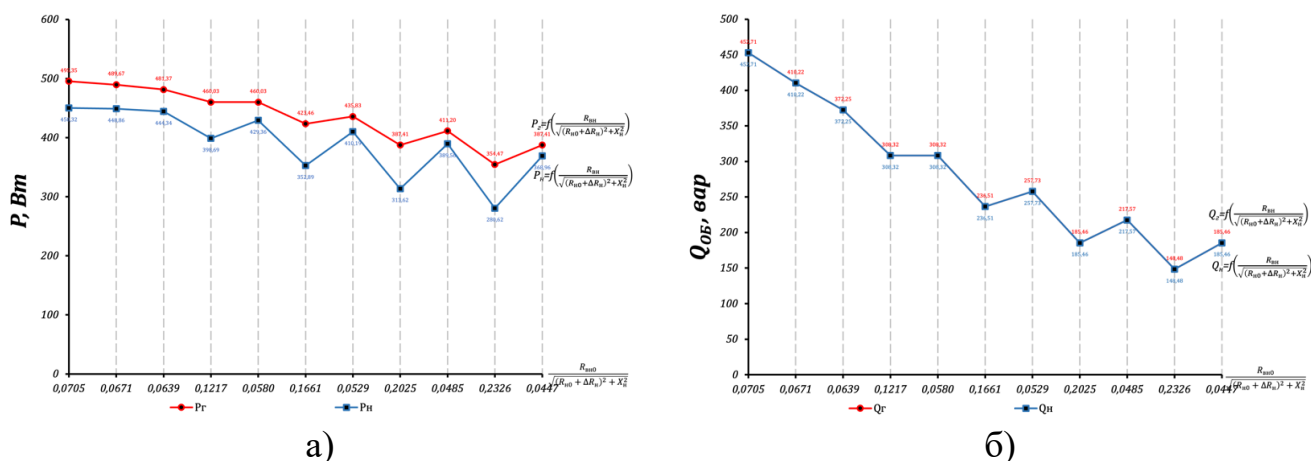


Рисунок 4.21 – Вплив співвідношень $R_{BH} / \sqrt{R_N^2 + X_N^2}$ на діючі значення активних P_r та P_h (рис. 4.21 а) та обмінних Q_r та Q_h (рис. 4.21 б) потужностей генератора та навантаження при $R_N - var (10 \dots 20) \text{ Ом}$

Активна потужність навантаження зазнає інтенсивніших змін, коливаючись в ширших межах при зростанні активного опору навантаження. Обмінна потужність навантаження в порівнянні з 1 випадком, де надавався приріст внутрішньому опору в кількісному вираженні зменшилась в декілька разів. Зазначимо, що ця потужність не споживається, а залишається в мережі, наслідком чого є зниження пропускної здатності лінії.

4.3 Баланс генерації електроенергії на стороні генерування

Напрямки укладання балансу в локальних електротехнічних системах (Microgrid – Nanogrid):

- баланс генерації електроенергії на постійному струмі;
- баланс генерації електроенергії на змінному струмі;
- баланс генерації електроенергії на постійно-змінному струмі (на стороні генерації);
- баланс споживання електроенергії на постійному струмі;
- баланс споживання електроенергії на змінному струмі;
- баланс споживання електроенергії на постійно-змінному струмі (на стороні споживання).

РОЗДІЛ 5 МЕТОДИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ РІВНЯ БАЛАНСУВАННЯ

5.1 Особливості оцінки рівня балансування

Оцінка рівня балансування в локальних електроенергетичних системах (Microgrid – Nanogrid) є складним процесом, який вимагає врахування багатьох факторів, таких як тип струму (постійний або змінний), характер генерації та споживання, а також взаємодія між різними компонентами системи. Основні особливості оцінки рівня балансування включають:

1. Типи струму:

- Постійний струм (DC): Використовується в системах з сонячними панелями, батареями та іншими джерелами, які виробляють або споживають постійний струм.
- Змінний струм (AC): Використовується в традиційних електромережах, вітрових турбінах та багатьох побутових пристроях.
- Постійно-змінний струм (DC-AC): Поєднує елементи, що працюють на постійному і змінному струмі, вимагаючи додаткових конвертерів для забезпечення сумісності.

2. Характер генерації та споживання:

3. Взаємодія між компонентами системи:

- Взаємний вплив генераторів та навантажень.
- Балансування між миттєвими та інтегральними характеристиками енергії.
- Усунення небалансу для забезпечення стабільності та ефективності системи.

5.2 Методика «Оцінка рівня балансування»

Мета: Метою методики є забезпечення ефективного балансування генерації та споживання електроенергії, мінімізація небалансу та підвищення стабільності роботи системи.

Вихідні дані:

Миттєві характеристики струму та напруги: $u(t)$, $i(t)$, $p(t)$.

Інтегральні характеристики потужності: активна потужність P , реактивна потужність Q , повна потужність S .

Дані про генератори та навантаження на постійному та змінному струмі.

Результат

Результатом застосування методики є оцінка рівня небалансу системи, визначення необхідних заходів для його усунення та підвищення ефективності роботи системи.

Кроки методики

Крок 1. Розрахунок балансу миттєвих характеристик $u(t)$, $i(t)$, $p(t)$;

Крок 2. Розрахунок балансу інтегральних характеристик S , P , Q , Q_{Φ} , $Q_{\text{ОБМ}}$.

Крок 3. Оцінка величини небалансу на стороні генерації електроенергії – на постійному та змінному струмі.

Крок 4. Оцінка величини небалансу на стороні споживання електроенергії – на постійному та змінному струмі.

Крок 5. Оцінка взаємного впливу: 1) окремих генераторів один на одного; 2) окремих навантажень один на одного; 3) окремих генераторів та навантажень один на одного.

Крок 6. Оцінка показників небалансу генераторів (на стороні генерації).

Крок 7. Оцінка показників небалансу споживачів (на стороні споживання).

Крок 8. Розробка заходів з усунення небалансу на стороні генерації та на стороні споживання електроенергії.

Крок 9. Впровадження заходів балансування на стороні генерації та на стороні споживання електроенергії.

Крок 10. Оцінка показників небалансу генераторів (на стороні генерації) та показників небалансу споживачів (на стороні споживання) за результатами впровадження заходів балансування..

Крок 11. Перевірка результатів балансування. Вимоги щодо рівнів балансування на стороні генерації та споживання електроенергії виконуються, то перехід на Крок 12. У протилежному випадку – перехід на Крок 8.

Крок 12. Завершення процесу балансування.

Оцінка (розрахунок) складових балансу для вузла системи з врахуванням взаємоперетоків.

Базова умова:

$$\sum_i p_{Г,i}(t) + \sum_j p_{Г,АБ,j}(t) = \sum_l p_{Н,l}(t) + \sum_m p_{Н,АБ,m}(t).$$

Формування балансу активних потужностей

$$\sum_i P_{Г,i} = \sum_l P_{Н,l}.$$

Формування балансу реактивних потужностей:

$$\sum_i Q_{Г,i} = \sum_l Q_{Н,l}.$$

Оцінка неув'язок (наприклад, через квадратичну норму) для активної та реактивної потужності:

$$P_{\Delta} = \|P_{Г,\Sigma} - P_{Н,\Sigma}\|;$$

$$Q_{\Delta} = \|Q_{Г,\Sigma} - Q_{Н,\Sigma}\|.$$

Як показник небалансу може використовуватися величини ΔP та ΔQ :

$$\Delta P = P_{\Delta} / P_0; \quad \Delta Q = Q_{\Delta} / Q_0,$$

де P_0 та Q_0 – базові характеристики споживання електроенергії за активною та реактивною потужністю на виділеному інтервалі часу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ZAHRAOUI, Younes, et al. Energy management system in microgrids: A comprehensive review. *Sustainability*, 2021, 13.19: 10492.
URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/19/10492>
2. «Розвиток відновлюваної енергетики та створення балансуючих потужностей – аналіз викликів для стійкості енергосистеми України в розрізі досягнення енергетичних та кліматичних цілей»
URL: <https://euea-energyagency.org/wp-content/uploads/2020/12/Development-of-renewable-energy-and-creation-of-balancing-capacities-analysis-of-challenges-for-the-sustainability-of-Ukraines-energy-system-in-terms-of-achieving-energy-and-climate-goals.pdf>
3. КИРЕЛЕНКО, О. В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими/ТМ Базюк, ІВ Блінов, СП Денисюк та ін. *Інститут електродинаміки НАН України. – Київ*, 2016.
4. TON, Dan T.; SMITH, Merrill A. The US department of energy's microgrid initiative. *The Electricity Journal*, 2012, 25.8: 84-94.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>
5. ZAHRAOUI, Younes, et al. Energy management system in microgrids: A comprehensive review. *Sustainability*, 2021, 13.19: 10492.
URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/19/10492>
6. КУЗНЕЦОВ, Микола Петрович. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії. 2022.
URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/53745/1/Kuznetzov_monografy.pdf
7. DONDI, Peter, et al. Network integration of distributed power generation. *Journal of power sources*, 2002, 106.1-2: 1-9.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877530101031X>
8. Zamora, R.; Srivastava, A.K. Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2010**, 14, 2009–2018.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000742>

9. Wang, J.; Zhao, C.; Pratt, A.; Baggu, M. Design of an advanced energy management system for microgrid control using a state machine. *Appl. Energy* **2018**, 228, 2407–2421.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310626>
10. Flexibility (Power System)
URL: [https://energypedia.info/wiki/Flexibility_\(Power_System\)](https://energypedia.info/wiki/Flexibility_(Power_System))
11. AGHAMOHAMMADI, Mohammad Reza; ABDOLAHINIA, Hajar. A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 54: 325-333.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061513003025>
12. Soshinskaya, M.; Crijns-Graus, W.; Guerrero, J.; Vasquez, J.C. Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, 40, 659–672.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114006583>
13. ДЕНИСЮК, С. П.; ДЕРЕВ'ЯНКО, Д. Г.; ГОРЕНКО, Д. С. Особливості оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*, 2020, № 1 (59), 2020.
URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d3573332-022f-4af2-a931-cad5c9bbf80e/content>
14. DENYSIUK, Sergii; HILEVYCH, Kateryna. ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, 2023, 4.
URL: <http://energy.kpi.ua/article/view/290880/284625>

ДОДАТКИ



CERTIFICATE OF THE WINNER

This is to certify that
Daria Pluzhnyk,
Bohdan Lisovyyk



was awarded the 3rd place

IN THE FIELD OF «POWER ENGINEERING AND ENERGY EFFICIENCY»
in the International Competition of Student Scientific Works

«BLACK SEA SCIENCE 2023»

ORGANIZED BY
ODESA NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
ODESA, UKRAINE

Head of the organizing committee
President of Odesa National
University of Technology

Bogdan IEGOROV

Rector of Odesa National
University of Technology

Larysa IVANCHENKOVA

Deputy head of the organizing committee
Vice-Rector of Odesa National
University of Technology

Maryna MARDAR

BSS-2023.4.32