

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

СУВОРОВ ВЛАДИСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ
ЕНЕРГОСИСТЕМИ ПРИ НАНЕСЕННІ ВИПАДКОВИХ ТА
ЗАПЛАНОВАНИХ ЗБУРЕНЬ**

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В. О. Суворов

Науковий керівник Кривда В. І., кандидат технічних наук, доцент

Одеса – 2024

АНОТАЦІЯ

Суворов В. О. Моделі та методи аналізу ефективності та працездатності енергосистеми при нанесенні випадкових та запланованих збурень. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Національний університет «Одеська політехніка», МОН України, Одеса, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробленню методу аналізу ефективності експлуатації та працездатності єдиної енергосистеми за рахунок розроблення її імітаційної моделі для визначення зміни властивостей поставки та споживання електроенергії, в основу якої покладено згортку критеріїв аналізу запланованих та випадкових збурень, які роблять можливим руйнування окремих складових та вузлів, які зменшують працездатність.

У першому розділі «Аналіз сучасного стану експлуатації енергетичних систем через оцінку її ефективності та працездатності при збуреннях» одержано такі результати:

– Встановлено, що багато елементів єдиної енергосистеми, такі як трансформатори, генератори, лінії передачі тощо, мають великий термін експлуатації, але з часом вони втрачають ефективність та можуть вимагати заміни або серйозного ремонту. Під диспетчерським керуванням не всі елементи енергосистеми отримують регулярне технічне обслуговування, що може призводити до випадкових аварій. Багато енергетичних систем мають застаріле обладнання та технології, які не відповідають сучасним стандартам ефективності експлуатації.

– Встановлено, що країна стикається зі значним дефіцитом енергоносіїв, що обмежує можливості розвитку традиційних джерел енергії та підвищує залежність від імпорту. У енергетичному балансі країни незначну частку становлять відновлювальні джерела енергії, такі як вітроенергетика, сонячна енергія, біопаливо тощо. Через недостатню інфраструктуру Україна має значний потенціал для розвитку

відновлювальної генерації електроенергії, зокрема за допомогою сонячних панелей, вітрових турбін, біогазових установок, що сприяє зменшенню залежності від традиційних джерел та покращенню енергетичної безпеки.

– Визначено, що сучасні моделі та методи енергосистеми не враховують випадки, коли в умовах споживчого управління споживач замовляє тільки необхідний для нього об'єм електроенергії або єдина енергосистема підлягає випадковим збуренням.

У другому розділі «Імітаційна модель єдиної енергосистеми для різних сценаріїв запланованих збурень» одержано такі результати:

– Встановлено, що застосування графової теорії дає можливість створити модель структури енергосистеми країни у вигляді ярусного графу. Це дозволяє у вигляді вузлів та ребер представити складні структурні елементи системи такі як генеруючі установки, електричні підстанції та лінії електропередач, у вигляді імітаційних моделей, які можуть бути використані для аналізу, диспетчерського керування та оптимізації її роботи.

– Вперше запропоновано імітаційну модель енергетичної системи у вигляді ярусного графа, яка враховує потужність згенерованої та переданої мережею електроенергії, номінальну потужність та кількість трансформаторів електричних підстанції, переріз та максимальну пропускну здатність ліній електропередач. Така модель дає можливість визначити складні взаємозв'язки між її вузлами та інтегрувати устаткування в єдину енергосистему для проведення її аналізу ефективності експлуатації та працездатності.

В третьому розділі «Метод оцінки ефективності експлуатації єдиної енергетичної системи через згортку її параметрів» було розроблено метод оцінки ефективності експлуатації єдиної енергосистеми на основі імітаційної моделі єдиної енергетичної системи для аналізу її експлуатації на базі згортки окремих критеріїв. Науковим результатом третього розділу можна вважати:

– подальший розвиток методу оцінки ефективності експлуатації енергосистеми, в основу якого покладено об'єми поставки та споживання електроенергії. Було додано можливість врахування об'ємів електроенергії, які необхідно додатково

залучити за аналогом кредитної банківської системи у іншої енергопередавальної організації для забезпечення потреб споживача.

– узагальнений показник згортки окремих критеріїв, а саме обсягу, якості та ефективності поставки електроенергії, що дало можливість в умовах споживчого управління отримати інтегральний показник для виявлення споживачем ефективної поставки серед можливих альтернатив.

В четвертому розділі «Стохастична модель єдиної енергетичної системи та метод аналізу працездатності при ймовірносних сценаріях збурень» досягнуто мету дисертаційного дослідження. Науковим результатом четвертого розділу можна вважати:

– стохастичну модель ефективності та працездатності єдиної енергетичної системи, яка складається з її імітаційної моделі, поточного ланцюгу об'єктів перетворення та транспортування, моделі випадкових збурень, які змінюють властивості вузлів та ребер ярусного графу та методу оцінки її експлуатації за рахунок показників її ефективності та працездатності, методу рекурсивного процесу пошуку шляхів отримання електроенергії від об'єкта споживача до устаткування електрогенерації;

– аналіз умов працездатності енергосистеми під час різних сценаріїв експлуатації, враховуючи потенційні виходи з ладу компонентів під час випадкових збурень, які приводять до руйнування обладнання.

Ключові слова: енергосистема, диспетчерське керування, діаграма, генерація, відновлювані джерела енергії, лінія електропередачі, аналіз даних енергоспоживання, ефективність, геліосистема, виробництво електроенергії, критерії ефективності, оцінка ефективності, зниження витрат, енергоефективність, модель оцінки ефективності та працездатності.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Kryvda V., Rudnitsky V., Suvorov V., Zubak V. Improving the efficiency of solar panels when using mppt – controller. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2022. No.36 (112). P. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.04>. ISSN 2221-3805. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)
2. Разінков В. О., Суворов В. О. Перспективи використання геліоенергетики для енергопостачання в місті Одеса. *Вісник ВПІ*. 2022. № 6. С. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36>. ISSN 1997-9266. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)
3. Kryvda V. I., Suvorov V. O., Zubak V. V. Modeling and method for assessing the efficiency of the power system. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023; Vol. 6 No. 3. P. 240–249. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.16>. ISSN 2663-0176. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)
4. Suvorov V., Zubak V. Model for monitoring and evaluation of the effectiveness of the electric power system of the country. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2023. № 38(114). P. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.2>. ISSN 2221-3805. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)
5. Babych S., Kryvda V., Zhanko K., Zubak V., Suvorov V. Development of models and methods for automated control of heat supply system with optimization of technical means structure. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023. Vol. 9. No. 2, P. 119 – 130. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.02.119>. ISSN: 2411-8028. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)
6. Максимов, М. В., Кривда, В. І., & Суворов, В. О. Model and method for analyzing the operability of the country's electric power system under non-projected disturbances. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2024. № 39 (115). P. 14-25. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.2>. ISSN 2221-3805. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Kryvda V.I., Rudnitsky V.G., Suvorov V.O., Zubak V.V. «Modeling of a group of solar panels with constant solar radiation.» All-Ukrainian Scientific Conference «ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING, AND ELECTROMECHANICS: application, research, education». 2021. P. 65.

URL: <https://figshare.com/ndownloader/files/27608126>

8. Kryvda V., Suvorov V. «Assessment of the current state and development of sources of distributed generation of the unified energy system of Ukraine.» Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Munich, Germany. 2022. P. 114-119.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-PROGRESS-INNOVATIONS-ACHIEVEMENTS-AND-PROSPECTS-6-8.11.22.pdf>.

9. Kryvda V., Suvorov V. «Overview of the problems and impact of the connection of distributed generation sources at different levels of control of the united energy system of Ukraine.» Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Boston, USA. 2022. P. 248-253.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/PROGRESSIVE-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-28-30.12.22.pdf>.

10. Suvorov V., Zubak V., Kryvda V. Evaluation of electricity supply and consumption efficiency. International Workshop of Scientific Students' Papers, 17th Edition. 2023.

URL: <https://elstud.webnode.ro/editii-elstud/2023/>

ABSTRACT

Suvorov V. O. Models and Methods for Analyzing the Efficiency and Operability of the Power System under Random and Planned Disturbances. – Qualification Work in Manuscript Form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics. – National University «Odesa Polytechnic», Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2024.

The dissertation is dedicated to the development of a method for analyzing the operational efficiency and operability of a unified power system by developing its simulation model to determine changes in the properties of electricity supply and consumption, based on a convolution of criteria for analyzing planned and random disturbances that can lead to the breakdown of individual components and nodes, reducing operability.

In the first chapter "Analysis of the current state of power system operation through the evaluation of its efficiency and operability under disturbances," the following results were obtained:

– It has been established that many elements of the unified power system, such as transformers, generators, transmission lines, etc., have a long service life, but over time they lose efficiency and may require replacement or serious repair. Not all elements of the power system receive regular technical maintenance under dispatch control, which can lead to random accidents. Many power systems have outdated equipment and technologies that do not meet modern efficiency standards.

– It has been found that the country faces a significant deficit of energy resources, limiting the development opportunities of traditional energy sources and increasing dependence on imports. Renewable energy sources, such as wind energy, solar energy, biofuels, etc., make up a small fraction of the country's energy balance. Due to insufficient infrastructure, Ukraine has significant potential for the development of renewable electricity generation, including through the use of solar panels, wind turbines, biogas installations,

which contributes to reducing dependence on traditional sources and improving energy security.

– It has been determined that current models and methods of power systems do not take into account cases where, under consumer management conditions, the consumer orders only the necessary amount of electricity, or the unified power system is subject to random disturbances.

In the second chapter "Simulation model of a unified power system for various scenarios of planned disturbances," the following results were obtained:

– It has been established that the application of graph theory allows creating a model of the country's power system structure in the form of a layered graph. This allows representing complex structural elements of the system such as generating units, substations, and transmission lines as nodes and edges in the form of simulation models that can be used for analysis, dispatch control, and optimization of its operation.

– For the first time, an imitation model of the power system in the form of a layered graph has been proposed, which takes into account the power generated and transmitted by the power network, the nominal power and quantity of transformers of electrical substations, the cross-section and maximum throughput of power lines. Such a model allows determining complex relationships between its nodes and integrating equipment into a unified power system for conducting its operational efficiency and operability analysis.

In the third chapter «Method for evaluating the operational efficiency of a unified power system through the convolution of its parameters», a method for evaluating the operational efficiency of a unified power system based on its simulation model was developed for analyzing its operation based on a convolution of individual criteria. The scientific result of the third chapter can be considered:

– Further development of the method for evaluating the operational efficiency of the power system, based on the volumes of electricity supply and consumption. The possibility of taking into account the volumes of electricity that need to be additionally involved, similar to the credit banking system, in another power transmission organization to meet consumer needs.

– The generalized indicator of the convolution of individual criteria, namely the volume, quality, and efficiency of electricity supply, which made it possible under consumer management conditions to obtain an integral indicator for identifying effective supply among possible alternatives.

In the fourth chapter «Stochastic model of a unified power system and method of operability analysis under probabilistic disturbance scenarios», the goal of the dissertation research was achieved. The scientific result of the fourth chapter can be considered:

– Stochastic model of the efficiency and operability of the unified power system, which consists of its simulation model, the current chain of transformation and transportation objects, a model of random disturbances that change the properties of nodes and edges of the layered graph, and a method for evaluating its operation through indicators of its efficiency and operability, a method of recursive process of searching for paths to obtain electricity from the consumer object to the power generation equipment.

– Analysis of the operational conditions of the power system under different operation scenarios, taking into account potential failures of components during random disturbances that lead to equipment breakdown.

Keywords: power system, dispatch control, diagram, generation, renewable energy sources, power line, data analysis of energy consumption, efficiency, solar system, electricity production, efficiency criteria, efficiency evaluation, cost reduction, energy efficiency, efficiency assessment model and operability.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published

1. Kryvda V., Rudnitsky V., Suvorov V., Zubak V. «Improving the efficiency of solar panels when using MPPT – controller». *Electrotechnic and Computer Systems*. 2022. No.36 (112). P. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.04>. ISSN 2221-3805.

2. Razinkov V.O., Suvorov V.O. «Prospects of using solar energy for power supply in the city of Odesa». *Bulletin of the VPI*. 2022. No. 6. P. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36>. ISSN 1997-9266.

3. Kryvda V.I., Suvorov V.O., Zubak V.V. «Modeling and method for assessing the efficiency of the power system». Herald of Advanced Information Technology. 2023; Vol. 6 No. 3. P. 240–249. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.16>. ISSN 2663-0176.

4. Suvorov V., Zubak V. «Model for monitoring and evaluation of the effectiveness of the electric power system of the country». Electrotechnic and Computer Systems. 2023. No. 38(114). P. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.2>. ISSN 2221-3805.

5. Babych S., Kryvda V., Zhanko K., Zubak V., Suvorov V. «Development of models and methods for automated control of heat supply system with optimization of technical means structure». Energy Engineering and Control Systems. 2023. Vol. 9. No. 2, P. 119 – 130. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.02.119>. ISSN: 2411-8028.

6. Maksimov M.V., Kryvda V.I., Suvorov V.O. «Model and method for analyzing the operability of the country’s electric power system under non-projected disturbances». Electrotechnic and Computer Systems. 2024. No. 39 (115). P. 14-25. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.2>. ISSN 2221-3805.

Published works of approbation nature:

7. Kryvda V.I., Rudnitsky V.G., Suvorov V.O., Zubak V.V. «Modeling of a group of solar panels with constant solar radiation». All-Ukrainian Scientific Conference «ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING, AND ELECTROMECHANICS: application, research, education». 2021. P. 65.

URL: <https://figshare.com/ndownloader/files/27608126>.

8. Kryvda V., Suvorov V. «Assessment of the current state and development of sources of distributed generation of the unified energy system of Ukraine». Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Munich, Germany. 2022. P. 114-119.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-PROGRESS-INNOVATIONS-ACHIEVEMENTS-AND-PROSPECTS-6-8.11.22.pdf>.

9. Kryvda V., Suvorov V. Overview of the problems and impact of the connection of distributed generation sources at different levels of control of the united energy system of

Ukraine. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Boston, USA. 2022. P. 248-253.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/PROGRESSIVE-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-28-30.12.22.pdf>.

10. Suvorov V., Zubak V., Kryvda V. «Evaluation of electricity supply and consumption efficiency». International Workshop of Scientific Students' Papers, 17th Edition. 2023.

URL: <https://elstud.webnode.ro/editii-elstud/2023>

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 14 |
| ВСТУП..... | 15 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЧЕРЕЗ ОЦІНКУ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПРИ ЗБУРЕННЯХ | 23 |
| 1.1 Структура електричної мережі України на різних рівнях системи електропостачання | 23 |
| 1.2 Оцінка сучасного стану розвитку джерел розосередженої генерації об'єднаної енергетичної системи України..... | 32 |
| 1.3 Структура електроенергетичних систем провідних країн Європи | 40 |
| 1.4 Оцінка ефективності експлуатації та працездатності електроенергетичної системи | 47 |
| 1.5 Постановка задачі дослідження..... | 53 |
| 1.6 Висновки до розділу..... | 55 |
| РОЗДІЛ 2. ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЄДИНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ДЛЯ РІЗНИХ СЦЕНАРІЇВ ЗАПЛАНОВАНИХ ЗБУРЕНЬ | 57 |
| 2.1 Особливості застосування теорії графів при моделюванні енергосистем | 58 |
| 2.2 Імітаційна модель енергосистеми..... | 62 |
| 2.3 Висновки до розділу..... | 80 |
| РОЗДІЛ 3. МЕТОД ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЄДИНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЧЕРЕЗ ЗГОРТКУ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ..... | 81 |
| 3.1 Модель для оцінки ефективності експлуатації енергосистеми | 83 |
| 3.2 Метод розрахунку ефективності поставки та споживання електроенергії | 87 |
| 3.3 Розрахунок ефективності експлуатації електроенергії | 91 |
| 3.4 Висновки до розділу..... | 100 |
| РОЗДІЛ 4. СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ЄДИНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ТА МЕТОД АНАЛІЗУ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПРИ ЙМОВІРНОСИХ СЦЕНАРІЯХ ЗБУРЕНЬ | 102 |
| 4.1 Аналіз випадкових та запланованих збурень | 103 |

| | |
|---|-----|
| 4.2 Стохастична модель єдиної енергосистеми | 109 |
| 4.3 Алгоритм зчитування вихідних файлів..... | 112 |
| 4.4 Алгоритм пошуку шляху до генерації в графі енергетичної структури | 113 |
| 4.5 Метод аналізу працездатності електроенергетичної системи | 115 |
| 4.6 Результати дослідження імітаційного експерименту | 116 |
| 4.7 Висновки до розділу..... | 128 |
| ВИСНОВКИ..... | 130 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 135 |
| ДОДАТОК А Властивості множини вершин ярусного графу | 152 |
| ДОДАТОК Б Властивості множини ребер ярусного графу | 161 |
| ДОДАТОК В Фрагмент програмного коду стохастичної моделі єдиної енергосистеми..... | 175 |
| ДОДАТОК Г Документи про впровадження результатів дослідження..... | 182 |
| ДОДАТОК Д Список публікацій здобувача..... | 187 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ЕЕС – електроенергетична система
- ЕО – енергетичне обладнання
- ПЕР – паливно-енергетичні ресурси
- ПЕК – паливно-енергетичний комплекс
- ОЕС – об'єднана електроенергетична система
- ОСР – оператор системи розподілу
- НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг
- ПС - підстанція
- ПУЕ – Правила улаштування електроустановок
- ПЛЕП - повітряна лінія електропередач
- ВДЕ – відновлювальні джерела енергії
- МЕА – Міжнародна енергетична асоціація
- ОЕСР – Організації економічного співробітництва та розвитку
- ТМП – точка максимальної потужності
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- ЯЕ – якість електропостачання
- АПВ – автоматичне повторне включення
- ОСП – оператор системи передачі

ВСТУП

У сучасному високотехнологічному світі надійне та безперебійне електропостачання стає критично важливим для різноманітних сфер життя. Вивчення моделей та методів аналізу ефективності експлуатації та працездатності електроенергетичних систем (ЕЕС) набуває першочергового значення.

Значна кількість споживачів електроенергії та постійно зростаючі потреби у новітніх технологіях ставлять під серйозний тиск енергетичну інфраструктуру [1]. Це змушує її постійно адаптуватися до нових викликів та забезпечувати найвищий рівень ефективності та працездатності.

Розвиток сучасних технологій у сфері енергетики вимагає постійного вдосконалення аналітичних і прогностичних методів. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни в системі та максимально ефективно управляти її ресурсами для забезпечення потреб споживачів. Такий підхід допомагає забезпечувати стабільність електропостачання, зменшувати ймовірність аварій та забезпечувати ефективне використання енергетичних ресурсів у вимірах навколишнього середовища.

Протягом різних історичних етапів розвитку енергетичної сфери України постійно зазнавали проблем дефіциту ресурсів, що вимагало вжиття заходів щодо регулювання споживання електроенергії шляхом введення адміністративних обмежень [2]. Ця потреба в обмеженнях частково пояснюється періодичною нестачею палива для електростанцій. Проте ситуація в енергетичному секторі України стає ще складнішою через те, що значна частина енергетичного обладнання (ЕО) та електричних мереж вже давно перевищила свій ресурс і потребує негайного оновлення через фізичний знос та технічну застарілість [3, 4].

У ситуації, коли власних паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) не вистачає, а ціни на енергоресурси, як внутрішні, так і імпортовані, систематично зростають, Україні дедалі більше потрібно активно працювати над енергозбереженням у всіх галузях національної економіки [5, 6]. Особливо це стосується паливно-енергетичного комплексу (ПЕК), який завжди вважався одним з найбільших споживачів палива та енергії всіх типів. Таке енергозбереження вимагає не лише

ефективних технологій та управлінських рішень, але й культурних змін у споживчому ставленні та виробничих процесах. Реалізація програм і заходів з енергозбереження в ПЕК стає нагальною не лише з економічних, але й екологічних міркувань, адже це сприятиме зменшенню залежності від імпортованих ресурсів і скороченню викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Розвиток та впровадження передових технологій і обладнання, а також соціально-економічні та політичні трансформації, спрямовані на досягнення сталого розвитку суспільства, призводять до поступових змін у методах та засобах управління енергосистемами. Відходячи від централізованих або вертикально-ієрархічних моделей, вони переходять до децентралізованих або багаторівневих підходів. В цих умовах особливо актуальною стає проблема ефективного управління та забезпечення надійності функціонування енергосистем на рівні систем розподілу та передачі електричної енергії [7]. Застосування сучасних методів та технологій управління дозволяє оптимізувати роботу систем передачі енергії, підвищувати їхню продуктивність, забезпечувати стабільність та зменшувати ризики виникнення аварійних ситуацій.

Оцінка ефективності експлуатації та працездатності енергосистем стає ключовим інструментом у досягненні амбіційних енергетичних цілей. Вона не лише дозволяє науково підходити до аналізу енергетичних комплексів, але й допомагає ідентифікувати ефективні та неефективні рішення, а також розробляти стратегії диспетчерського керування, спрямовані на зниження енерговитрат, оптимізацію ресурсного використання та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище.

Стабільність енергопостачання не лише забезпечує безперебійну роботу промислових підприємств та комерційних об'єктів [8], але й є гарантом безпеки та комфорту для мешканців та споживачів. Однак у сучасних умовах, коли технології швидко розвиваються, дослідження та вдосконалення моделей аналізу працездатності систем електроживлення стає критично необхідним.

Зростання вимог та технологічний прогрес створюють постійні виклики для енергетичної інфраструктури [9]. Щоб забезпечити її працездатність та ефективність

експлуатації в умовах постійних вимог та викликів, необхідно постійно розвивати і вдосконалювати моделі аналізу працездатності. Це дозволить оперативно реагувати на зміни у системі та максимально ефективно управляти її ресурсами. Тільки таким чином можна забезпечити стабільність та ефективність енергопостачання в умовах швидкого технологічного прогресу.

Серйозних проблем зазнає енергосистема в умовах військового стану. Щоденними ракетними атаками знищується критична інфраструктура, включаючи енергосистему країни: електричні станції, розподільні підстанції, лінії електропередач. Непередбачений вихід із ладу будь-якого об'єкта енергосистеми може призвести до значних перебоїв у роботі критично важливих споживачів.

Забезпечення електричних підстанцій та критично важливих споживачів електроенергією стає важливим завданням в умовах війни, що спонукає до подальшого дослідження ефективності експлуатації та працездатності єдиної енергосистеми.

В результаті аналізу літератури з досліджень за темою дисертації було виявлено науково-технічне протиріччя: в сучасних енергосистемах закладено моделі та методи, які керують кількістю згенерованої електроенергії при нормальних режимах роботи або при запланованих збуреннях. Аргументами таких моделей є об'єм згенерованої електроенергії, якість електроенергії, втрати при передачі та розподілу електроенергії та технологічні витрати. Але фактично сучасні моделі та методи енергосистеми не враховують випадки, коли в умовах споживчого управління, споживач замовляє тільки необхідний для нього об'єм електроенергії або єдина енергосистема підлягає випадковим збуренням. Це протиріччя криється у невідповідності об'єму поставки та споживання електроенергії, необхідної для функціонування критично важливих об'єктів, а також неможливості адаптуватися до різноманітних випадкових збурень. Розв'язання встановленого протиріччя можливе за рахунок розроблення імітаційної моделі та методів оцінки ефективності експлуатації та працездатності єдиної енергосистеми двома показниками. Перший показник – як згортки окремих критеріїв різної природи походження, а саме: показника об'єму поставки електроенергії, показник якості поставки електроенергії та коефіцієнта ефективності поставки та

споживання електроенергії. Другий – показник єдиної енергосистеми для оцінки її працездатності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, які виконано в Національному університеті «Одеська політехніка» і є складовою частиною держбюджетних НДР №205-55 за темою: «Розробка моделі і методу ефективного керування експлуатацією енергоустановок від поновлюваних джерел енергії для забезпечення балансу енергосистеми» (№ 0122U000565) та НДР № 228-55 за темою «Аналіз надійності експлуатації електроенергетичної системи» (№ 0122U201192).

Мета й завдання дослідження.

Мета дисертаційної роботи полягає в розробленні методу аналізу ефективності експлуатації та працездатності єдиної енергосистеми за рахунок розроблення її імітаційної моделі для визначення зміни властивостей поставки та споживання електроенергії, в основу якої покладено згортку критеріїв аналізу запланованих та випадкових збурень, які роблять можливим руйнування окремих складових та вузлів, які зменшують працездатність.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

– провести аналіз сучасного стану експлуатації енергетичних систем, перспективи розвитку джерел розосередженої генерації, проаналізувати сучасні моделі та методи оцінки ефективності експлуатації та працездатності енергетичних систем;

– розробити імітаційну модель єдиної енергосистеми для аналізу ефективності експлуатації та працездатності при різних сценаріях запланованих збурень;

– розробити метод оцінки ефективності експлуатації єдиної енергосистеми на основі імітаційної моделі єдиної енергосистеми для аналізу її експлуатації на базі згортки окремих критеріїв;

– розробити стохастичну модель єдиної енергосистеми та метод аналізу працездатності енергосистеми, який дозволяє оцінити її стани під час різних умов експлуатації, враховуючи випадкові збурення.

Об'єкт дослідження – ефективність експлуатації та працездатність енергосистеми.

Предмет дослідження – моделі та методи оцінки ефективності та працездатності єдиної енергосистеми країни, яка підлягає випадковим та запланованим збуренням.

Методи дослідження. Для проведення дисертаційного дослідження були використані: теоретичні основи «Теорії графа» для створення імітаційної моделі єдиної енергосистеми, яка може бути використана для аналізу, прогнозування та оптимізації роботи та дасть можливість в єдиній розрахунковій системі оцінити її працездатність при випадкових та запланованих збуреннях; числові методи оцінки ефективності експлуатації енергосистеми через один показник, який ґрунтується на згортці окремих показників різної природи походження; алгоритм, який описує рекурсивний процес пошуку шляхів від заданого об'єкта до електростанцій, враховуючи поточний ланцюг об'єктів та їх властивості; статистичний підхід для оцінки ризиків та визначення важливих елементів системи для її стабільності та працездатності.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано імітаційну модель єдиної енергосистеми у вигляді ярусного графа, вузлами якої є станції устаткування генерації, електричні підстанції системи передачі напругою від 330 кВ до 750 кВ, електричні підстанції системи розподілу напругою від 110 кВ до 220 кВ, ребрами якої є лінії електропередач напругою від 110 кВ до 750 кВ, яка враховує потужність згенерованої та переданої мережею електроенергію, номінальну потужність та кількість трансформаторів електричних підстанцій, переріз та максимальну пропускну здатність ліній електропередач, що дало можливість визначити складні взаємозв'язки між її вузлами та інтегрувати устаткування в єдину енергосистему для проведення її аналізу ефективності експлуатації та працездатності.

2. Отримав подальшого розвитку метод оцінки ефективності експлуатації енергосистеми, в основу якого покладено об'єми поставки та споживання електроенергії, в який було додано можливість врахування об'ємів електроенергії, які

необхідно додатково залучити за аналогом кредитної банківської системи у іншої енергопередавальної організації для забезпечення потреб споживача, крім того додатково введено узагальнений показник згортки окремих критеріїв, а саме обсягу, якості та ефективності поставки електроенергії, що дало можливість в умовах споживчого управління отримати інтегральний показник для виявлення споживачем ефективної поставки серед можливих альтернатив.

3. Вперше запропоновано стохастичну модель ефективності та працездатності єдиної енергосистеми, яка складається з її імітаційної моделі, поточного ланцюгу об'єктів перетворення та транспортування, моделі випадкових збурень, які змінюють властивості вузлів та ребер ярусного графу та методу оцінки її експлуатації за рахунок показників її ефективності та працездатності, методу рекурсивного процесу пошуку шляхів отримання електроенергії від об'єкта споживача до устаткування електрогенерації, що дало можливість аналізувати енергосистему для виявлення умов працездатності під час різних сценаріїв експлуатації, враховуючи потенційні виходи з ладу компонентів під час випадкових збурень, які приводять до руйнування обладнання.

Практичне значення одержаних результатів. На підставі розроблених моделей і методів створену імітаційну модель єдиної енергосистеми для подальшої оцінки ефективності експлуатації та працездатності.

Основні положення дисертаційного дослідження впроваджено:

– в ТОВ «ТК ПРОЕКТ», що дозволило підвищити швидкість аналізу структури існуючої енергосистеми під час реконструкції або проектування нових вузлів системи електропостачання;

- в ТОВ «ЕНЕРГОМАКС-ПРОЕКТ», що дозволило оцінити працездатність електроенергетичної системи в нормальних та аварійних режимах роботи;

– в навчальний процес підготовки бакалаврів та магістрів за освітніми програмами «Електропостачання та енергетичний менеджмент» та «Електротехніка та електромеханіка» на кафедрі електропостачання та енергетичного менеджменту Національного університету «Одеська політехніка» в курсах: «Інформаційні та

комунікаційні технології в електроінженерії», «Математичні моделі та методи оптимізації».

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені в дисертаційній роботі автором отримано самостійно. Автором розроблені нова імітаційна модель єдиної енергосистеми для прогнозування поведінки системи при різних сценаріях випадкових і запланованих збурень та методи оцінки ефективності експлуатації єдиної енергосистеми за допомогою показника згортки окремих критеріїв енергосистеми і аналізу її працездатності.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

в [10] – запропонована імітаційна модель єдиної енергосистеми у вигляді ярусного графа;

в [11, 12] – метод оцінки енергосистеми через узагальнений показник згортки параметрів обсягу поставки електроенергії, якості поставки та ефективності поставки електроенергії;

в [10] – створена стохастична модель ефективності та працездатності єдиної енергосистеми та метод оцінки моделі.

Апробація результатів роботи.

Результати проведеного дисертаційного дослідження були представлені, обговорені і отримали схвалення на таких конференціях: Всеукраїнська конференція «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка: застосування, дослідження, освіта», м. Одеса, Військова академія, 15 квітня 2021 року»; II міжнародна науково-практична конференція «SCIENTIFIC PROGRESS: INNOVATIONS, ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS», 06-08.11.2022 Мюнхен, Німеччина; IV міжнародна науково-практична конференція «PROGRESSIVE RESEARCH IN THE MODERN WORLD», 28-30.12.2022 Бостон, США; International Workshop of Scientific Students' Papers, 17th Edition ELSTUD 2023 - June, 29 - July, 01, 2023.

Публікації. Результати наукових досліджень представлено в 10 друкованих працях, з яких 6 – у фахових виданнях, а також 4 тези міжнародних та Всеукраїнських конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, основного змісту, що включає в себе 4 розділи, висновків, списку використаної літератури зі 106 найменування та додатків а, б, в, г, д. Загальний обсяг роботи становить 189 сторінок (з них 151 – основного тексту). В роботу входять також 27 рисунків і 13 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЧЕРЕЗ ОЦІНКУ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПРИ ЗБУРЕННЯХ

Для розв'язання мети дисертаційного дослідження в першому розділі потрібно проаналізувати основні складові енергосистеми, визначити особливості електроенергетичних мереж напругою 110 – 750 кВ України на рівнях системи передачі, системи розподілу та на рівні споживача, проаналізувати можливість розвитку відновлювальних джерел енергії, визначити особливості енергосистем провідних країн Європи, розглянути сучасні моделі та методи оцінки ефективності експлуатації енергосистеми та існуючі моделі та методи оцінки працездатності при різних сценаріях запланованих та випадкових збурень для можливості сформулювати постановку задачі дослідження.

1.1 Структура електричної мережі України на різних рівнях системи електропостачання

1.1.1 Об'єднана енергетична система України

Електроенергетика України - це дуже складний, потужний та багаторівневий технологічний комплекс, що забезпечує виробництво, передачу та розподіл електричної енергії між її споживачами.

Головною складовою електроенергетики України є об'єднана електроенергетична система (ОЕС), яка являється однією з найбільших енергооб'єднань Євросоюзу. ОЕС здійснює централізоване енергопостачання споживачів, взаємодіє з енергосистемами сусідніх країн (Румунія, Молдова, Болгарія), забезпечуючи експорт та імпорт електроенергії. Вона поєднує усі потужності, що генеруються в державі, розподільні мережі всіх областей та районів, які пов'язані між собою повітряними лініями електропередачі напругою 220, 330, 500 та 750 кВ.

У складі ОЕС діють близько 970 ліцензіатів, які виробляють електричну енергію, в тому числі 7 потужних енергогенеруючих компаній забезпечують близько 85 % всього виробництва, 7 регіональних електроенергетичних систем, 33 оператори системи розподілу (ОСР) та 206 ліцензіатів на постачання електричної енергії.

Оперативно-технологічне диспетчерське управління, підтримання балансу виробництва та споживання електричної енергії в ОЕС та організацію паралельної роботи з системами сусідніх країн виконує державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». НЕК «Укренерго» виконує функції оператора системи передачі (ОСП) та працює в паралельному режимі з іншими країнами. Зв'язок енергосистем між ОЕС України та енергосистем сусідніх країн здійснюється електричними мережами напругою від 110 кВ до 750 кВ.

Електричні мережі 220 – 750 кВ включають як магістральні, так і міждержавні мережі. Вони забезпечують видачу електроенергії від потужних енергоблоків електричних станцій та подальшу передачу електричної енергії до розподільних мереж областей та районів України (система розподілу електроенергії), а також експорт та імпорт електроенергії з енергосистемами сусідніх країн.

Трансформація напруги забезпечується за допомогою автотрансформаторів і трансформаторів напругою 750/330 кВ, 330/220 кВ, 400/330 кВ, 330/110(150) кВ, 220/110(150) кВ, 150/110 кВ. Система передачі електричної енергії складає близько 23,0 тис. км, з них 84 км лінія напругою 800 кВ; 4,121 тис. км припадає на електричні мережі з напругою 750 кВ; 567 км займають лінії 500 – 400 кВ; 13,4 тис. км – лінії електропередачі напругою 330 кВ; 4,0 тис. км – лінії напругою 220 кВ; 586 км – лінії напругою 110 - 150 кВ і 78 км припадає на електричні мережі напругою 35 кВ. А також кабельні та повітряні лінії напругою 110-0,4 кВ загальною довжиною 3,747 тис. км.

Відповідно до звіту Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) на балансі ДП «НЕК «Укренерго» перебуває: 103 підстанції (ПС) напругою 110 – 750 кВ трансформаторною потужністю 78 553,1. МВА.

З них:

- ПС напругою 220 кВ – 33 шт. з потужністю 4,424 тис. МВА,
- ПС напругою 330 кВ – 88 шт. з потужністю 41,502 тис. МВА,
- ПС напругою 400 кВ – 2 шт.,
- ПС напругою 500 кВ – 2 шт.,
- ПС напругою 750 кВ – 8 шт. з потужністю 16,738 тис. МВА,
- ПС напругою 110 кВ – 4 шт. (пристанційні вузли сонячних електростанцій)

[13].

Втрати в мережах оператора системи передачі складають 3,773 млн кВт*год за рік, що становить 2,58% від відпуску в мережу.

Система розподілу електричної енергії нараховує 752,923 тис. км повітряних і 73,787 тис. км кабельних ліній електропередачі напругою від 0,4 кВ до 150 кВ, а також 204,610 тис. трансформаторних підстанцій напругою 6 – 150 кВ. ОЕС України об'єднує сім регіональних ЕЕС: Дніпровську, Західну, Кримську (зараз знаходиться на території АРК, що непідконтрольна Україні), Південну, Південно-Західну, Північну і Центральну.

На рисунках 1.1 та 1.2 наведені карта ОЕС України та принципова структура електричних мереж ОЕС відповідно.

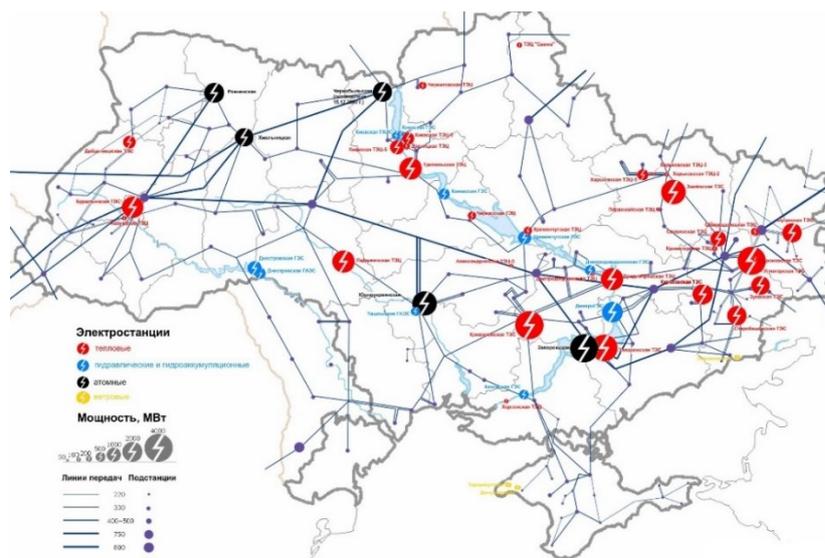


Рис. 1.1. Карта Об'єднаної енергетичної системи України [14]

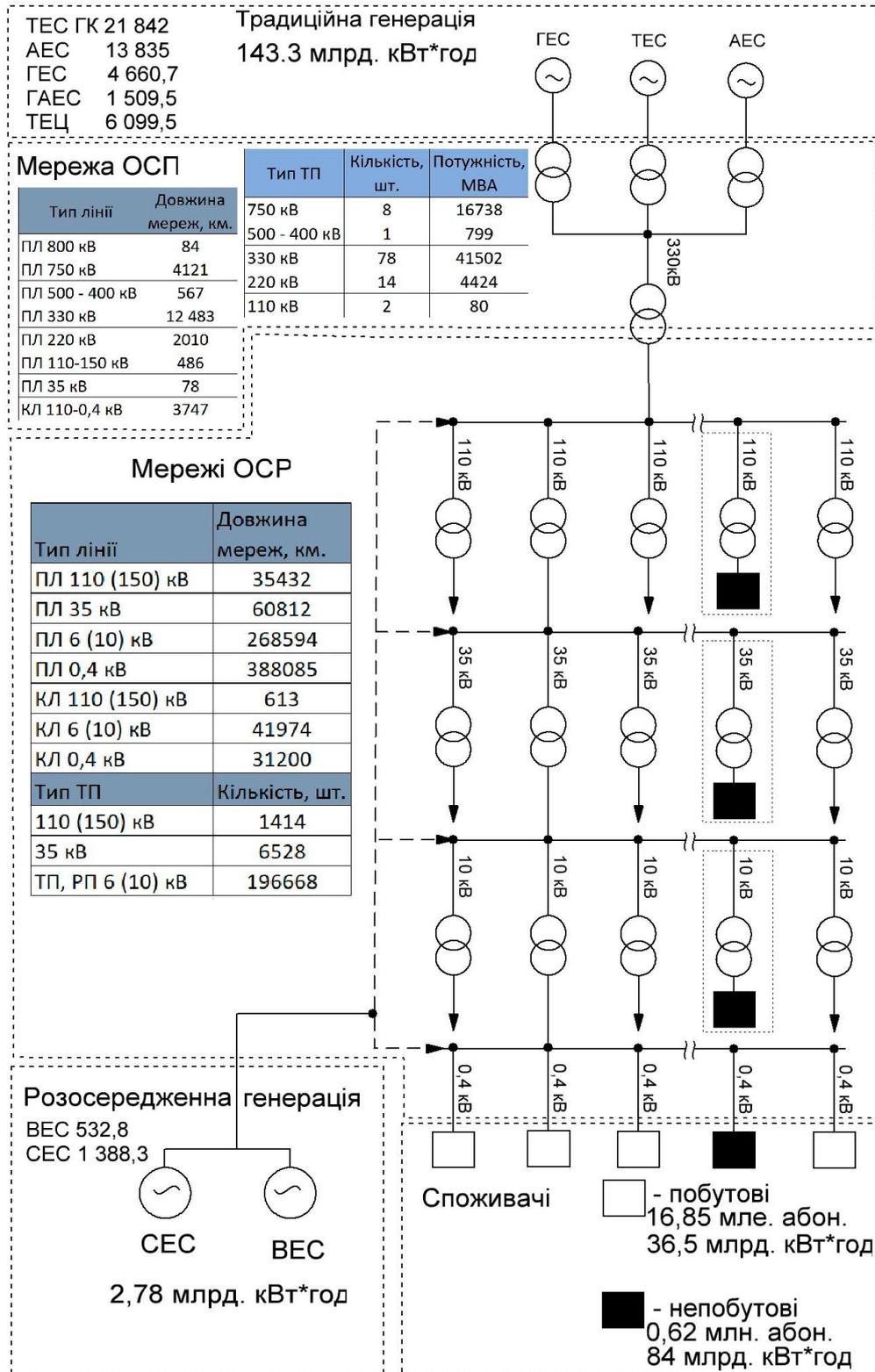


Рис. 1.2. Структура електричних мереж в ОЕС України [14]

За причинами відсутності фінансування для модернізації та проведення своєчасного ремонту електрообладнання електричних станцій та підстанцій, ліній

електропередач та за причинами тривалої експлуатації в зношеному та передаварійному стані знаходяться апарати захисту та автоматики і трансформаторні підстанції. В таблиці 1.1 наведені дані щодо термінів експлуатації та довжини повітряних ліній за класами напруги.

Таблиця 1.1

Довжина повітряних ліній електропередач за термінами експлуатації та за класами напруги [15]

| Клас напруги | Всього, км | | У т.ч. знаходяться в експлуатації (років) | | | |
|---------------|-----------------|------------------|---|----------------|---------------|-----------------|
| | по трасі | по ланцюгах | до 25 | 25-30 | 30-40 | більше 40 |
| 750 кВ | 4403,171 | 4403,171 | 692,65 | 45,09 | 2271,7 | 1393,731 |
| 500 кВ | 374,76 | 374,76 | 38,1 | – | 159,6 | 177,06 |
| 400 кВ | 338,95 | 338,95 | – | – | – | 338,95 |
| 330 кВ | 12970,84 | 13533,652 | 1341,335 | 370,168 | 2181,908 | 9640,241 |
| 220 кВ | 3017,385 | 3975,965 | 178,628 | | 344,457 | 3452,88 |
| 110 кВ | 448,728 | 549,78 | 52,73 | 20,5 | 40,505 | 436,045 |
| 35 кВ | 112,441 | 114,051 | 18,585 | 2,46 | 25,43 | 67,303 |
| Разом: | 21668,27 | 23290,329 | 2322,301 | 438,218 | 5023,6 | 15506,21 |

Згідно інформації, яка наведена в таблиці 1.1, лінії електропередач, які знаходяться в експлуатації менше ніж 25 років мають сумарну довжину 2322,3 тис. км, що складає близько 8%, лінії електропередач, що знаходяться в експлуатації в періоді від 25 до 30 років мають довжину 438,2 тис. км, що становить близько 6%, лінії електропередач, які знаходяться в експлуатації в періоді від 30 до 40 років мають протяжність 5023,6 тис. км, що складає близько 22,5% та 1550,6 тис. км ліній електропередач мають строк експлуатації більше 40 років та складають близько 64,2% від загальної протяжності ліній. Можна зробити висновок, що близько 86% ліній електропередач напругою від 35 кВ до 750 кВ перевищують строк встановленої експлуатації згідно Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [16].

Ситуація щодо ПС набагато краща, так як близько 50% трансформаторних підстанцій були збудовані та введені в експлуатацію в період незалежної України, період експлуатації яких не перевищує 30 років.

1.1.2 Структура електричних мереж України на рівні Оператора системи розподілу

Розподільні електричні мережі напругою 0,4 – 35 кВ представляють тупикову ланку в системі забезпечення споживачів електричною енергією України. Ці електричні мережі взаємодіють як зі споживачем, так і з районними та магістральними електричними мережами України. Сучасний стан та безперервне функціонування цих розподільних електричних мереж безперечно впливає на показники якості та надійності електроенергії та на ефективність роботи всієї ОЕС України.

Головною функцією електричних мереж напругою від 0,4 кВ до 150 кВ в енергосистемі країни є транспортування від системи передачі до побутових та непобутових споживачів електричної енергії. Тому, склад, конфігурація окремої системи розподілу визначається, по-перше, безпосередньо складом споживачів, які розташовані на території об'єкта ліцензійної діяльності.

До ОСР відносяться підприємства, які відповідають за безпечну, надійну та ефективну експлуатацію, також за своєчасне технічне обслуговування підпорядкованих мереж та за подальший, перспективний розвиток електричних мереж напругою від 0,4 кВ до 110 кВ. Усі ОСР надають послуги з розподілу електричної енергії від ДП «НЕК «Укренерго» до окремих, кінцевих споживачів. Відповідно до реєстру ліцензіатів НКРЕКП, в Україні існують 33 ОСР.

В країнах Євросоюзу на виконання Третього енергопакету з 2500 операторів систем розподілу реорганізацію або відокремлення пройшли лише близько 200 операторів.

Для виконання функції незалежності прийняття рішень розподільної компанії було передбачене функціональне відокремлення. Воно було спрямоване на забезпечення протидії зловживання монопольним становищем ОСР до учасників ринку електроенергії. ОСР не допускається створювати переваги постачальникам або виробникам електроенергії в складі вертикально інтегрованого суб'єкта господарювання порівняно з іншими учасниками ринку [15].

Основна функція ОСР в Україні – недискримінаційний доступ споживачів до системи розподілу та послуги з розподілу електричної енергії по регіонах України. Останні надаються розподільними компаніями на підставі договорів про надання послуг з розподілу. Договори про надання послуг з розподілу є публічними договорами приєднання та укладаються на основі типових договорів, затверджених НКРЕКП. Оплата послуг з розподілу електричної енергії здійснюється за тарифами, які регулюються НКРЕКП відповідно до встановленої методики та оприлюднюються операторами систем розподілу [15].

Нажаль, поки що в Україні лише виконуються вимоги Третього енергопакету, а в країнах Євросоюзу починається перегляд функцій, які виконуватимуться ОСР за Четвертим енергопакетом, який називається «Чиста енергія для всіх європейців».

У випадку, якщо Україна не застосує норми законодавства пакету «Чиста енергія для всіх європейців», держава понесе збитки економічного характеру, оскільки продукція, що не відповідатиме екологічним стандартам ЄС, буде неконкурентоспроможною на ринках Євросоюзу.

Отже, ОСР України відіграють важливу роль у роботі нового ринку електроенергії. Виступаючи посередником між оператором системи передачі та споживачами, вони отримують багато нових завдань. Однією з найголовніших задач є оновлення застарілої інфраструктури. У той же час розвиток технологій ставить перед ними і нові завдання, які зумовлені зростанням кількості проз'юмерів, людей, які поєднують ролі виробника і споживача.

Функції розподілу електричної енергії в ОЕС України виконують електричні мережі напругою від 0,4 кВ до 150 кВ (рисунки 1.2), що налічують близько

850 тис. км ліній електропередач та 200 тис. одиниць трансформаторних підстанцій [14]. Ця сукупність розділена, переважно, за адміністративно-територіальним принципом між ОСР. Кожен із 33 окремих ОСР здійснює господарську діяльність з розподілу електричної енергії на закріпленій території незалежно від інших [17], дотримуючись вимог ліцензії НКРЕКП [18].

Довжина повітряних ліній електропередач (ПЛЕП) напругою від 6 кВ до 150 кВ складає 374,9 тис. км та має по колах значення: 150 кВ – 10,7 тис. км; 110 кВ – 36,2 тис. км; 35 кВ – 66,4 тис. км; 10 кВ – 247,9 тис. км; 6 кВ – 19,1 км.[19] Незважаючи на значний розвиток мереж класу напруги 10 кВ як в сільській місцевості, так і в містах, в декількох районах міст зберігається ще мережа напруги 6 кВ, протяжність повітряних та кабельних ліній якої складає майже 15 % від довжини ліній напругою 10 кВ.

На сучасний час загальна довжина електричних мереж напругою від 0,4 кВ до 10 кВ складає: 0,4 кВ – 419,3 тис. км; 6-10 кВ – 310, 6 тис. км і має тенденцію до щорічного зростання [20].

Згідно Закону України «Про ринок електричної енергії» [15] ОСР є юридичною особою, яка відповідає за безпечну, надійну та ефективну експлуатацію об'єктів, технічне обслуговування та розвиток системи розподілу для задоволення попиту на послуги з розподілу електричної енергії в майбутньому з урахуванням вимог щодо охорони довкілля і забезпечення енергетичної ефективності. Під розвитком системи розподілу розуміють нове будівництво, реконструкцію або модернізацію об'єктів електроенергетики [21].

Маючи інформацію щодо структури та стану мереж ОСР, можна більш доцільно оцінити здатність електроенергетичних систем приймати чи передавати електричну енергію, яка генерується новими відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ), а також оцінити розгалуженість мережі на доступних для розміщення ВДЕ територіях.

1.1.3 Електрична мережа на рівні споживача

Кінцевими споживачами електричної енергії тобто споживачами, які купують електричну енергію для своїх власних потреб в енергосистемі України вважаються побутові, малі непобутові та непобутові споживачі.

Активний споживач електричної енергії – це такий споживач енергії, який є не тільки її пасивним покупцем, але й може деяким чином взаємодіяти з мережею енергопостачання, впливати на її стан та ціни на ринку, в основному через можливість самостійно генерувати та зберігати енергію.

Перевагами активного споживача є можливість самостійно генерувати енергію, що дозволяє забезпечувати більший рівень самостійності; можливість отримувати прибуток від продажу надлишкової енергії; оптимізація використання енергії в залежності від миттєвих цін; підвищення рівня надійності енергопостачання та якості електроенергії в системі; пристосування до графіка добового споживання через використання систем керування навантаженням, що дозволяє без створення незручностей для споживачів та суттєвої зміни графіка споживання позитивно впливати на мережу; вирівнювання та оптимізація графіка споживання.

Побутовий споживач - фізична особа, яка використовує електричну енергію для забезпечення власних побутових потреб, що не включають професійну та/або господарську діяльність або колективний побутовий споживач (юридична особа, створена шляхом об'єднання фізичних осіб - побутових споживачів, яка розраховується за електричну енергію за показами загального розрахункового засобу обліку в обсязі електричної енергії, спожитої для забезпечення власних побутових потреб таких фізичних осіб, що не включають професійну та/або господарську діяльність) [14]. Непобутові споживачі – це фізичні або юридичні особи, які купують електроенергію не для своїх власних побутових потреб, і які включають виробників та оптових споживачів [14].

Врахування можливості під'єднання установок розосередженої енергетики до вузлів, які знаходяться у власності абонентів мережі, з наявністю значного споживання, надає змогу розширити можливості вводу нової потужності в мережу.

На рисунку 1.3 наведена структура ринку електричної енергії України.

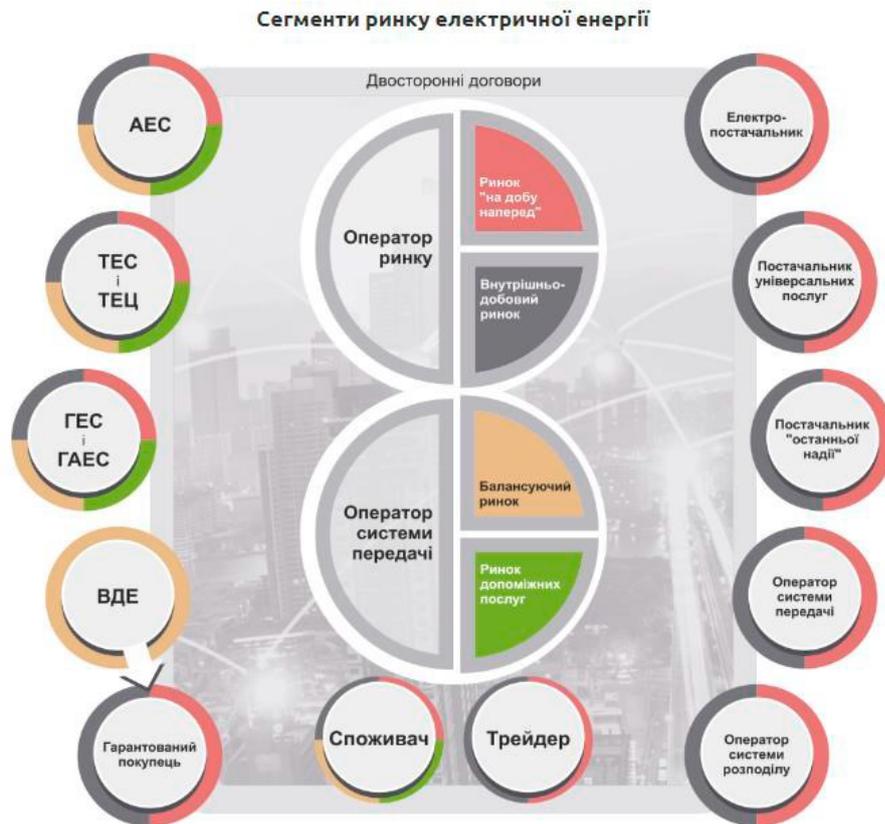


Рис. 1.3. Загальна структура ринку електричної енергії України [22]

1.2 Оцінка сучасного стану розвитку джерел розосередженої генерації об'єднаної енергетичної системи України

1.2.1 Загальні дані щодо використання джерел розосередженої генерації в країнах світу та перспектива побудови альтернативних джерел енергії

Останні тенденції та досвід використання альтернативної енергетики в енергетичних цілях є важливими для України, де альтернативна енергетика все ще перебуває на ранній стадії розвитку та потрібні ефективні механізми державної підтримки, що ґрунтуються на найкращій світовій практиці. Альтернативні джерела

енергії швидко розвиваються в постіндустріальних країнах і займають все більшу частку в світовому енергетичному балансі. Звісно, ці тенденції триватимуть і охоплюватимуть дедалі більше країн світу.

Аналітики Міжнародної енергетичної асоціації (МЕА) дійшли висновку, що в найближчому майбутньому світове виробництво електроенергії з альтернативних (поновлюваних) джерел енергії перевищить виробництво електроенергії з природного газу. Зрештою такі країни, як ЄС, Латинська Америка, США та Японія, інтенсифікують перехід своїх енергетичних систем від традиційних до поновлюваних джерел.

Згідно з аналізом Європейської асоціації біомаси (АЕВІОМ), загальна частка відновлюваної енергії в Європі у 2020 році становила 20,7%, а довгострокові прогнози Європейської ради з відновлюваної енергії показують, що всю теплову енергію в Європейському Союзі вироблятимуть з альтернативних джерел у 2050 році. МЕА також показує доволі оптимістичний прогноз розвитку альтернативної енергетики в країнах, які не є членами Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР). Швидке поширення альтернативної енергетики в цих країнах достатнє, щоб компенсувати будь-який спад у галузі в інших країнах, особливо в Європі та США, де ринки альтернативної енергетики сформувалися на ранніх стадіях і є досить структурованими та насиченими.

Сьогодні когенераційні установки, вітроенергетика, сонячні колектори та теплові насоси справді конкурентоспроможні порівняно з традиційними формами енергопостачання, вартісні характеристики їхнього створення та експлуатації знижуються, а ціни на традиційні джерела енергії органічного походження постійно зростають.

Головна перевага використання поновлюваних джерел енергії полягає в тому, що вони невичерпні та екологічно безпечні, сприяють поліпшенню екологічного стану і не призводять до зміни енергетичного балансу на планеті.

Недоліки альтернативних джерел енергії полягають у періодичності поставок і коливаннях енергетичного потенціалу. Сучасні технології, обладнання та

раціональне використання альтернативних джерел енергії практично усунули перешкоди для їхнього широкого застосування, і енергетика на основі альтернативних джерел енергії у світі розвивається швидкими темпами.

Оскільки альтернативні джерела енергії поки що не конкурентоспроможні порівняно з традиційними, їхній розвиток підтримується різними інструментами на національному рівні. У світі існують різні моделі державної підтримки, основними з яких є використання квот на використання відновлювальних джерел енергії (підхід Великої Британії) та субсидії і тарифна політика для нетрадиційних і відновлювальних енергетичних проєктів (підхід Німеччини). Державна підтримка, найімовірніше, буде тимчасовою, оскільки вартість альтернативної енергії падає, а ціна традиційної енергії зростає.

Серія доповідей МЕА «Market Report Series»; Renewables 2018 станом на кінець 2018 року показує стабільну динаміку збільшення енергетичних потужностей на основі альтернативних поновлюваних джерел енергії. Водночас, як видно з наведеної нижче діаграми (рисунок 1.4), спостерігається тенденція до виведення з експлуатації вугільних електростанцій (скорочення потужності майже на 30 млн кВт) та скорочення потужності електростанцій, що працюють на природному газі, майже на 20 млн кВт.

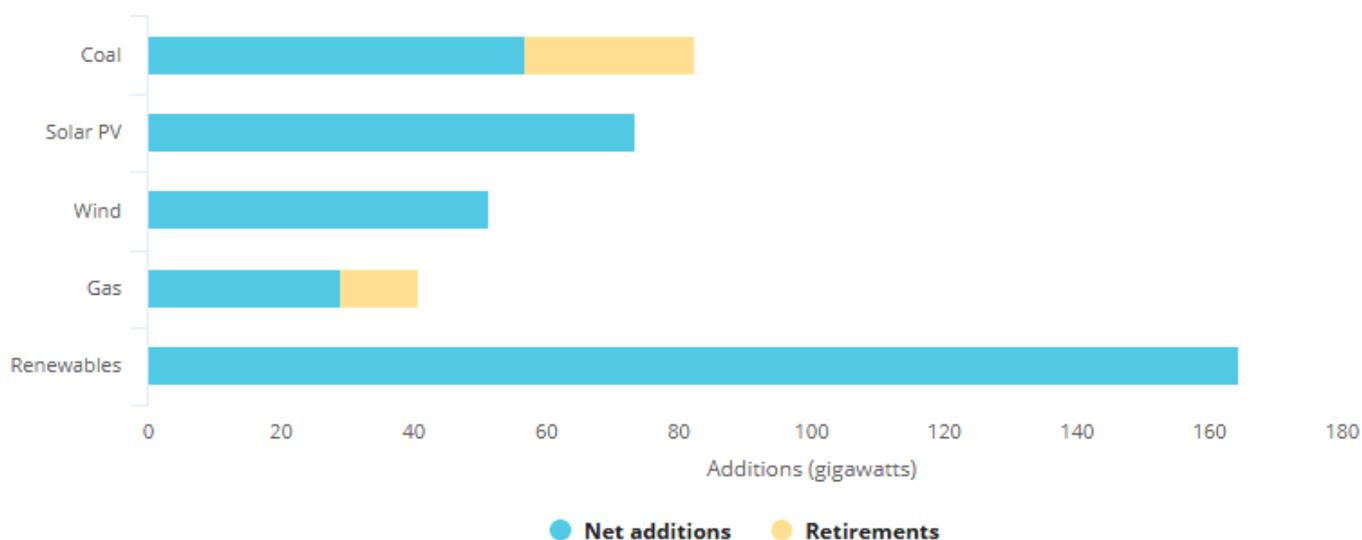


Рис. 1.4. Встановлена потужність за видами палива [23]

Згідно з основним сценарієм МЕА, загальна встановлена потужність сонячних електростанцій у світі до кінця 2024 року сягне 740 ГВт, що більше, ніж сукупна потужність Індії та Японії на сьогоднішній день.

Використання сонячної енергії представляє собою значну перспективу в розвитку альтернативних джерел енергії. Обсяг сонячної енергії, яка потрапляє на поверхню Землі протягом тижня, перевищує суму всіх світових запасів енергетичних ресурсів. Кожного дня на кожен квадратний метр землі припадає середньо 1 кіловатт сонячної енергії, що вимагає ефективного використання та конвертації через застосування різноманітних методів та технологій [24].

Основні методи підвищення ефективності сонячних панелей [24]:

- 1) застосування систем концентрації сонячного випромінювання;
- 2) використання систем стеження за Сонцем;
- 3) використання МРРТ - контролерів з різними алгоритмами відстеження точки максимальної потужності (ТМП) сонячних панелей;
- 4) розробка технологій виготовлення фотоелектричних модулів спрямованих на підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) і зменшення терміну їх деградації.

Ускладнене геополітичне оточення в Україні примушує поступово, але значно скорочувати використання природного палива для вироблення тепла та електроенергії. Значні пошкодження об'єднаної енергетичної системи країни підкреслюють важливість переходу до технологій розподіленої генерації або автономних джерел енергії для забезпечення енергетичної незалежності. Один з найбільш перспективних варіантів такої генерації енергії на півдні країни - використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних установок [25].

Ефективність роботи геліоустановок, незалежно від їх типу та конструкції, в основному залежить від інтенсивності сонячного випромінювання. Однією з відмінних особливостей сонячного випромінювання порівняно з іншими джерелами та системами конвертування енергії є складність контролю за кількістю енергії, що досягає поверхні. Цей параметр змінюється з часом і залежить від різних зовнішніх факторів.

ДП «НВЦ «Укренерго» презентувало розроблене НВЦР ІПС України техніко-економічне обґрунтування будівництва інфраструктури збору та подачі сонячної енергії потужністю до 1200 МВт (еквівалент Придніпровської електростанції) у Чорнобильській зоні відчуження. Проєкт передбачає будівництво підстанції 330/110 кВ, 11 підстанцій 110/10 кВ і близько 54 км ліній електропередачі 110 кВ. Це буде перший в Україні проєкт, що передбачає встановлення систем зберігання енергії для мінімізації впливу нестабільного виробництва відновлюваної енергії на роботу трансформаторних підстанцій в Україні. Використання систем накопичення енергії дасть змогу знизити витрати на підтримання балансу електромережі в пікові періоди, забезпечити безперервність і гнучкість електропостачання, більш раціонально використовувати національні та регіональні електромережі, знизити ризик перевантаження електромережі і значно підвищити рівень безпеки системи розподілу електроенергії як у поточному режимі, так і в аварійних і надзвичайних ситуаціях. Можна підвищити рівень безпеки розподільної системи.

1.2.2 Аналіз проблем встановлення джерел розосередженої генерації

Аналіз впливу розподіленої генерації на режим роботи електричної мережі показує, що вплив розподіленої генерації на режим приблизно можна порівняти зі стандартною похибкою вимірювання, тому що генерація і сумарне навантаження електричної мережі 110(35) кВ сильно відрізняються. Альтернативна енергетика зі встановленою потужністю до 500 кВт практично не впливає на режим роботи таких електричних мереж і не призводить до зміни втрат потужності; у випадку електричних мереж 10 кВ чутливість режиму до зміни потужності генерації, особливо під'єднаної до електрично віддалених вузлів, є високою. Діапазон генеруючих потужностей електростанцій, для яких гарантується позитивний вплив на рівень, обмежений режимом роботи енергосистеми до 100-200 кВт.

Питання підвищення надійності та якості електропостачання (ЯЕ) за рахунок використання відновлюваних джерел енергії поки що не розглядалося. Цей недолік

досліджень відображається в необґрунтовано високих стандартах втрат електроенергії, які мають відшкодовуватися власниками ВДЕ на енергетичному ринку та в контрактах на постачання електроенергії третім особам. Встановлення розподіленої генерації в розподільчій мережі має значний вплив на якість електроенергії.

По-перше, розподілені джерела живлення призводять до збільшення дози флікера. Це спричинено роботою та вимкненням потужних розподілених джерел живлення в розподільчій системі, раптовими змінами вихідної потужності розподілених джерел живлення та взаємодією між розподіленими джерелами живлення та регуляторами.

По-друге, відновлювальні джерела енергії можуть генерувати в електричних мережах гармоніки високих порядків, що характерно для паливних та фотогальванічних елементів, вітроустановок, тощо.

По-третє, розподілені джерела живлення впливають на провали напруги, які значною мірою пов'язані з типом генератора.

Як відомо, впровадження розподілених джерел живлення характеризується швидким збільшенням кількості силових електронних систем, що призводить до погіршення якості електроенергії. Причиною такого погіршення є наявність сильних нелінійних і несиметричних навантажень зі швидкими змінами режимів роботи, а також впровадження розподілених джерел живлення (що генерують гармоніки, інтергармоніки та субгармоніки в енергосистемі). Рисунок 1.5 ілюструє структурну схему впливу альтернативної енергетики на показники якості.



Рис. 1.5. Структурна схема впливу альтернативної енергетики на показники якості

У радіальній розподільній мережі падіння напруги відбувається вздовж напрямку подачі електроенергії споживачам від головної ділянки лінії електропередачі до кінцевої точки. Впровадження альтернативних джерел енергії в таку електромережу може призвести до зниження навантаження на фідер і підвищення напруги на лінії електропередачі. Коефіцієнт потужності розподіленого джерела живлення і тип генератора мають велике значення. Під час використання відносно потужних синхронних генераторів у деяких випадках допустимі рівні напруги можуть бути перевищені. Таким чином, величина зміни напруги залежить від розташування джерела ВДЕ, його потужності та виробництва або споживання.

Крім того, у розподільній мережі активні та реактивні навантаження вузлів змінюються в часі, спричиняючи постійні коливання рівня напруги в електричній мережі. У напрямку від основної частини ПЛЕП до кінця коливання напруги зазвичай вищі. Коли навантаження зосереджене здебільшого поблизу кінця лінії

електропередачі, коливання рівня напруги більш інтенсивні. Після підключення альтернативних джерел енергії до розподільчої мережі, розподільна мережа впливає на коливання напруги у вузлах, збільшуючи або зменшуючи їх. Якщо розподілене джерело живлення працює в координації з місцевим навантаженням, тобто його потужність збільшується або зменшується в міру збільшення або зменшення навантаження у вузлі, коливання напруги будуть компенсовані [26].

Встановлення ВДЕ може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності в електричних мережах, що в основному залежить від місць розташування, потужності, рівня впровадження джерел розосередженої генерації в електричній мережі, їхнього коефіцієнта потужності, а також від топології електричної мережі тощо.

Оскільки розподільна електрична мережа є радіальною мережею, то потік потужності від основної ділянки до кінцевого споживача є односпрямованим і в аварійних ситуаціях здебільшого використовується миттєвий струмовий захист [27]. Як правило, релейний захист в розподільчих мережах проектується з використанням реле максимального струму та пристроїв автоматичного повернення на головних фідерах фідерних підстанцій і запобіжників на відгалуженнях електричних мереж. Для забезпечення захисту розподільчих електричних мереж на практиці після відключення лінії електропередачі, на якій сталася аварія, пошкоджений елемент або вся ділянка лінії електропередачі ізолюється і лінія знову підключається. Однак, такий спосіб релейного захисту розподільчої мережі не передбачає наявності додаткових джерел живлення, таких як

- відновлювана енергетика широко використовується в системах розподілу разом з розподіленою генерацією, включаючи проблеми, пов'язані з використанням реклоузерів [28]. Безструмова пауза при спрацьовуванні автоматичного повторного включення (АПВ), як правило, становить лише кілька секунд і не завдає істотної шкоди споживачам. Якщо під час безструмової паузи АПВ не спрацьовує захист розподілених джерел живлення, такі джерела залишаються підключеними до мережі і намагаються підтримувати напругу в мережі.

- у разі відключення розподіленого джерела живлення під час безструмової паузи АПВ час, відведений на ліквідацію дуги, зменшується на час спрацьовування захисного реле розподіленого джерела живлення.

- підтримувати безпечну експлуатацію самого об'єкту. Якщо джерело відновлюваної енергії залишається підключеним до мережі, баланс потужності може порушитися і швидкість генератора може змінитися.

Тому необхідні дослідження для вирішення проблеми раціоналізації вибору місця розташування ВДЕ, і зокрема вибору точки видачі потужності в мережу. Значну увагу слід звернути на пропускну спроможність електромережі, наявність вузлів для введення потужності або, за їх відсутності, можливість будівництва нових. Наявність інших генеруючих одиниць, характер графіків їх споживання, розташування потужних та активних споживачів електричної енергії поблизу розглянутої точки мережі, а також характер генерації генеруючих одиниць, для яких планується введення в експлуатацію. Робота з моделювання поведінки розподіленої генерації в експлуатаційних умовах, дослідження ремонтних схем, аналіз питань стабільності та моделювання з точки зору розвитку мережі.

1.3 Структура електроенергетичних систем провідних країн Європи

1.3.1 Електроенергетична система Німеччини

Енергетична трансформація Німеччини, відома як *Energiewende*, довела свою ефективність у секторі електроенергетики країни, збільшуючи виробництво відновлювальної енергії. Незважаючи на те, що вугілля (головним чином, буре вугілля) є найбільшим джерелом електроенергії, відновлювальні джерела замінили значну частину енергії, яка раніше була вироблена за допомогою ядерних станцій протягом останнього десятиліття. У 2017 році вітрова енергія перевищила ядерну енергію та природний газ, ставши другим за обсягами джерелом електроенергії. Для подальшого розвитку відновлювальних джерел енергії згідно з енергетичними та кліматичними цілями Німеччини будуть необхідні заходи, що сприятимуть

електрифікації та інтеграції систем відновлювальних джерел, включаючи поліпшення оподаткування, регулювання ринку, а також розвиток інфраструктури передачі та розподілу електроенергії.

Виробництво електроенергії в Німеччині все ще в значній мірі ґрунтується на використанні кам'яного вугілля, природного газу та нафти. У 2018 році ці види палива разом склали 52% від загального обсягу електроенергії (хоча нафта мала дуже маленьку частку). Це розміщує Німеччину серед країн Міжнародного агентства енергетики (IEA) на середньому рівні за відносною часткою використання кам'яних палив у виробництві електроенергії.

Кам'яне вугілля відіграє ключову роль у виробництві електроенергії в Німеччині, забезпечуючи 38% від загального обсягу у 2018 році. Однак його частка зменшується, порівняно з майже 50% десятиліттям раніше (див. Рисунок 7.3). Крім того, ядерна енергія зменшилася майже наполовину протягом останнього десятиліття, головним чином через збільшене використання відновлюваних джерел енергії, які отримували значну підтримку через тарифи на відрахування (FiTs). Частка відновлювальної енергії зросла з 15% у 2008 році до 35% у 2018 році. Зокрема, енергія вітру стрімко зростає, подвоївши своє виробництво за останні п'ять років. Крім того, сонячна енергія та біоенергетика значно зросли протягом останнього десятиліття.

Вплив енергетичної трансформації на виробництво електроенергії в Німеччині буде відчутним протягом наступних десятиліть. Оскільки уряд планує закрити всі ядерні електростанції до кінця 2022 року і всі вугільні електростанції до 2038 року, тенденція розвитку енергетичного сектора продовжить підпорядковуватися збільшенню використання відновлювальної енергії. На рисунку 1.6 наведено графік виробництва електроенергії за різними джерелами.

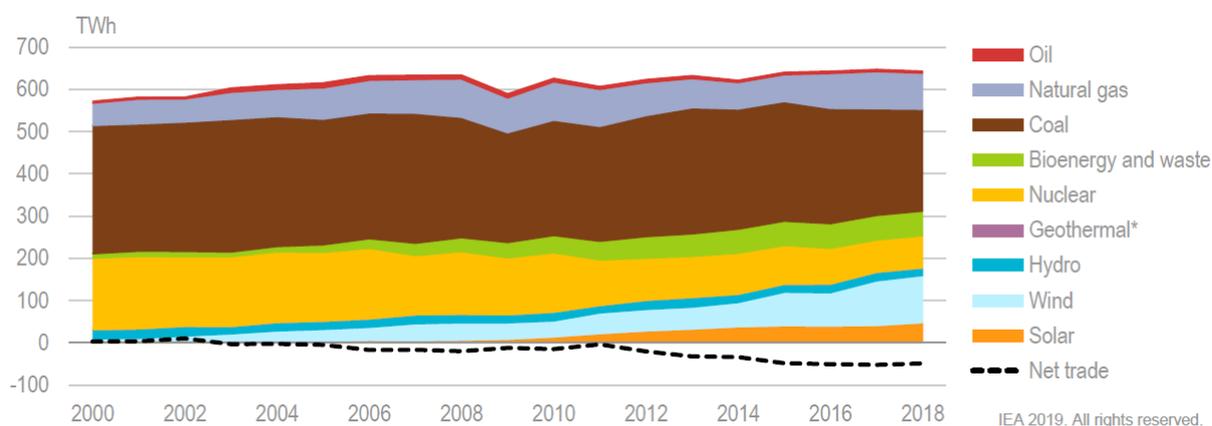


Рис. 1.6. Виробництво електроенергії Німеччини за джерелами [28]

1.3.2 Електроенергетична система Іспанії

У 2019 році загальний обсяг виробництва електроенергії в Іспанії становив 271,0 терават-годин (ТВт-год) і поступово зменшувався після досягнення свого піку у 2008 році, коли досяг 311,0 ТВт-год (Рисунок 1.7). В Іспанії діє ядерний парк, який забезпечує стаке базове навантаження близько 60 ТВт-год на рік з 1990 року, що становить 22% від загального виробництва електроенергії у 2019 році. Електростанції, що працюють на паливному маслі та дизельні генератори, в основному використовуються на островах і разом склали 5% від загального виробництва електроенергії в Іспанії у 2019 році. Виробництво електроенергії з вугілля зменшилося, особливо в останні роки, що відображає початок відмови від вугілля. У 2019 році вугілля становило лише 5% від загального виробництва електроенергії, що є значним зменшенням порівняно з 14% у попередньому році.

Газ відіграє ключову роль у міксі електроенергії країни, становлячи майже третину виробництва у 2019 році. Гнучкість газових електростанцій використовується для балансування при відмові від вугілля та коливання виробництва з відновлюваних джерел, таких як вітер та сонце, а також змінного виробництва від гідроелектростанцій.

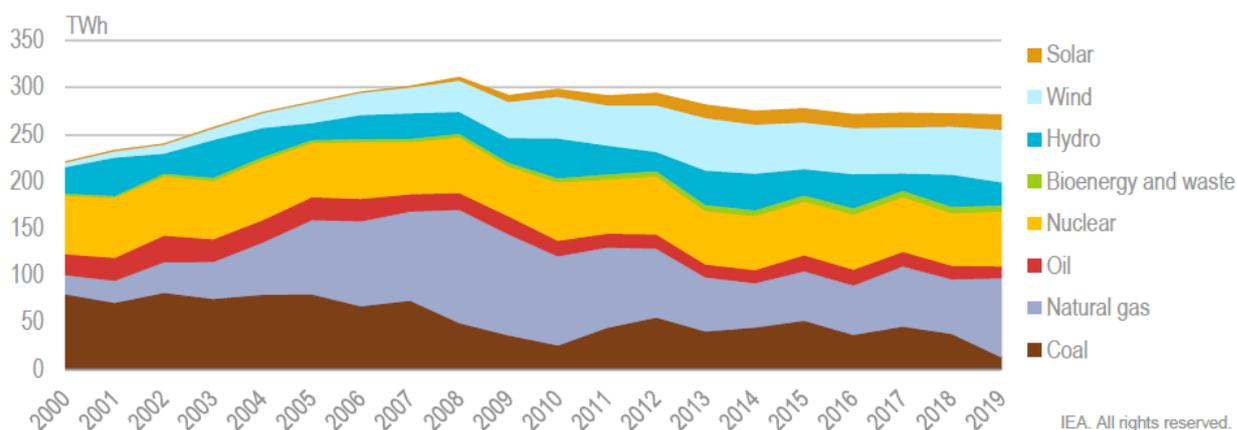


Рис. 1.7. Виробництво електроенергії Іспанії за джерелами [29]

ВДЕ стають все важливішим джерелом електроенергії в країні, досягаючи 38% у 2019 році. Це включає вітро-, гідро-, сонячну енергію, а також біоенергетику та використання відходів. Вітро (20,5%) та гідроелектроенергія (9,1%) склали найбільший внесок у 2019 році, тоді як сонячна енергія зазнала швидкого зростання від 2008 до 2014 року, після чого стабілізувалась на рівні близько 5,6%. Біоенергетика, переважно з твердої біомаси, разом з відходами та біогазом, складала 2,4% від загального виробництва у 2019 році.

Стосовно потужності, у 2019 році в Іспанії було використано 25 ГВт газових електростанцій, 26 ГВт вітроенергії, 13 ГВт гідроелектроенергії (окрім насосних), 7,9 ГВт вугільних станцій, 7,1 ГВт ядерної енергії та 8,9 ГВт фотовольтаїки, підключеної до мережі, на додаток до 2,3 ГВт концентрованої сонячної енергії. Також встановлено невелику потужність припливної енергії, що становила 4,8 МВт у 2019 році. У порівнянні з піковим попитом, в Іспанії наразі перевищена потужність генерації, навіть при закритті вугільних електростанцій.

Завдяки зростанню виробництва вітро- та сонячної енергії з 2000 року, у порівнянні з Міжнародним Енергетичним Агентством, Іспанія трохи відстає від середнього рівня використання кам'яних палив у її електроенергетичному міксі, тоді як за часткою використання відновлювальних джерел у 2019 році вона посідає 13-е місце.

1.3.3 Електроенергетична система Італії

Виробництво електроенергії Італії коливалося навколо середнього рівня 288 ТВт*год протягом періоду між 2011 та 2021 роками, і це було нижче, ніж в попередньому десятиріччі (Рисунок 1.8). За останні десять років роль відновлюваних джерел у енергоміксі зросла, тоді як роль нафти та вугілля зменшилася.

Однак енергомікс Італії в значній мірі ґрунтується на кам'яних паливах, які склали 58% від загального виробництва електроенергії у 2021 році. Це одна з найвищих часток серед країн-членів Європейського Агентства з Енергетики (ІЕА). Природний газ є основним джерелом для виробництва електроенергії, покриваючи 50% від загального виробництва у 2021 році, що є другою за величиною часткою серед країн-членів ІЕА. Частка природного газу зменшилася з 2010 по 2014 рік, коли вона скоротилася до мінімуму 34%, а потім знову зросла для компенсації сповільненого зростання відновлюваних джерел та зниження виробництва вугілля та нафти. Виробництво електроенергії з вугілля значно знизилось з піку в 18% у 2012 році до 5,6% у 2021 році, як частина плану з відмови від вугілля до 2025 року. Нафта скоротилася з 6,6% у 2011 році до 2,7% у 2021 році (Рисунок 1.8).

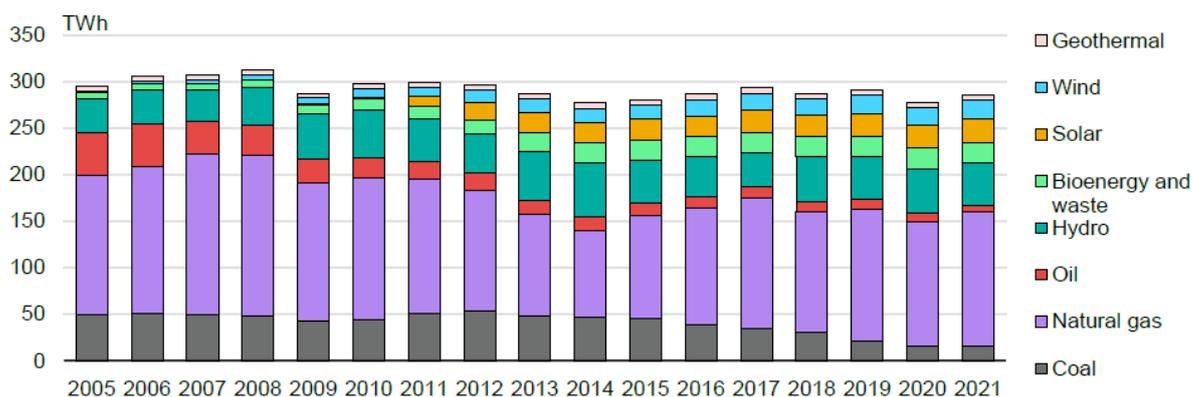


Рис. 1.8. Виробництво електроенергії Італії за джерелами [30]

У 2021 році Італія мала другий за величиною рівень залежності (23%) від виробництва електроенергії від імпорту російського палива серед країн-членів ІЕА, після Угорщини. Основними причинами цієї залежності є велика частка природного

газу у виробництві електроенергії та висока залежність Італії від імпорту природного газу з Росії (41% від чистого імпорту природного газу у 2021 році). Італія також залежить від імпорту вугілля з Росії (62% від чистого імпорту вугілля у 2021 році). Аналіз ІЕА показує, що додаткові 2 ГВт відновлювальних джерел (1 ГВт сонячної енергії та 1 ГВт вітру) зменшили б залежність Італії від Росії у виробництві електроенергії на 1%. Відновлювані джерела енергії склали 40% від виробництва електроенергії у 2021 році, що подібно до середнього рівня країн-членів ІЕА (40%). Гідроелектроенергія є другим джерелом виробництва електроенергії після природного газу. Вона переживала щорічну змінність через зміни в опадах, але зберігала стабільний середній рівень близько 16% від загального виробництва з 2011 року. Заохочувана генеральною регулятивною схемою FiT, електроенергія з сонячної енергії швидко зросла з 0,6% від загального виробництва електроенергії у 2010 році до 7,5% у 2013 році.

Після зміни схеми підтримки виробництво електроенергії від сонячної енергії зросло лише трохи і досягло 8,8% у 2021 році. Аналогічно, біоенергетика та відходи швидко зросли з 3,9% у 2010 році до 6,7% у 2013 році, а потім сповільнилися і досягли 7,5% у 2021 році. П'ятим джерелом електроенергії є вітер, який мав більш поступовий зріст і більш ніж подвоїв свою частку з 3% в 2010 році до 7,3% у 2021 році.

1.3.4 Електроенергетична система Португалії

Протягом періоду з 2009 по 2019 рік потужність виробництва електроенергії в Португалії збільшилася з 17,4 ГВт до 21,6 ГВт, переважно за рахунок росту потужності гідроелектростанцій з насосним накопиченням і вітрових електростанцій на суші. Гідроенергетика становить значну частку встановленої потужності Португалії (34% у 2019 році). Велика потужність насосних гідроелектростанцій відіграє важливу роль у збалансуванні постачання та попиту на електроенергію, особливо в умовах зростаючого виробництва електроенергії з відновлювальних джерел змінної енергії (ЗДЗЕ), зокрема вітру та сонячної енергії. З 2009 по 2019 рік максимальний

піковий попит на електроенергію в Португалії незначно зменшився з 9,0 ГВт до 8,65 ГВт.

Більшість електрогенеруючої потужності в Португалії становлять великі генераційні об'єкти, які підключені до системи передачі електроенергії. Проте зростає кількість генерації, що з'єднана з системою розподілу електроенергії. У 2019 році було підключено 5,3 ГВт генеруючої потужності на рівні розподільної мережі, що становить приблизно чверть від загальної встановленої потужності Португалії. З них 4,7 ГВт було відновлювальною генерацією (54% від вітру, 19% від гідро, 14% від сонячної енергії та 13% від біомаси), а решта 0,6 ГВт - в основному когенерація на природному газі.

Мережі низької напруги також спостерігають зростання підключення невеликої дистриб'юваної генерації та генерації для самоспоживання, переважно з використанням сонячної енергії. За період з 2015 по 2019 рік загальна встановлена потужність невеликої дистриб'юваної генерації збільшилась з 0,6 МВт до 44,8 МВт, що становить 0,2% від загальної потужності генерації. У той же період загальна встановлена потужність генерації для самоспоживання зросла з 6,4 МВт до 215,7 МВт, що складає 1,0% від загальної потужності генерації.

За період з 2009 по 2019 рік виробництво електроенергії в Португалії зросло з 49,5 терават-годин до 51,7 ТВт*год, і це супроводжувалося помітними щорічними змінами, що були обумовлені коливанням рівнів гідрогенерації, економічною активністю та торгівлею електроенергією (Рисунок 1.9). Завдяки помітним змінам у щорічних опадах, які є типовими для клімату Португалії, велика потужність гідроелектростанцій суттєво впливає на щорічний мікс виробництва електроенергії. За цей же період гідрогенерація коливалася від 5,6 ТВт*год до 16,2 ТВт-год.

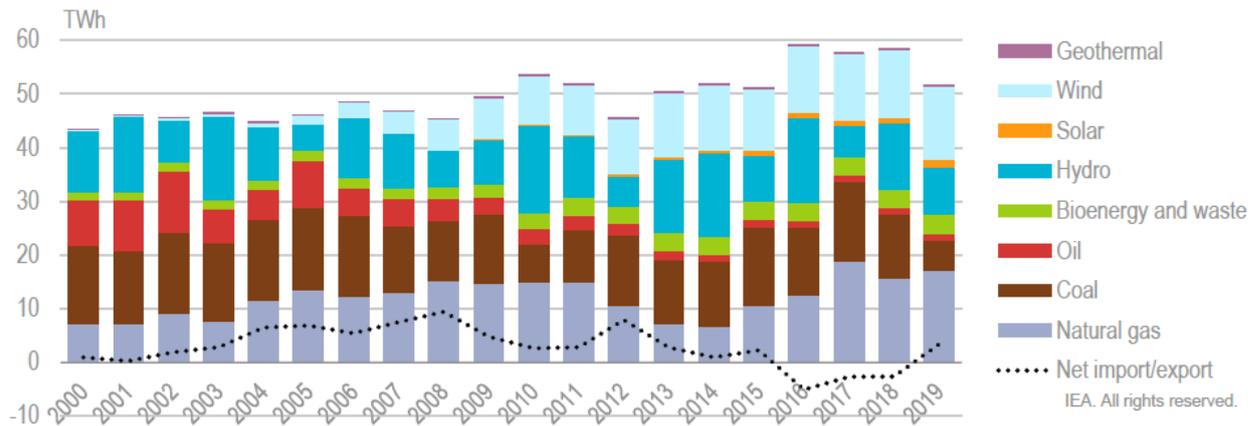


Рис. 1.9. Виробництво електроенергії Португалії за джерелами [31]

1.4 Оцінка ефективності експлуатації та працездатності електроенергетичної системи

У сучасному світі, збільшений попит на енергію, швидкі зміни кліматичних умов та обмеженість традиційних ресурсів вимагають нових підходів до енергетичних систем. Вирішення цих викликів відповідає нашій здатності ефективно управляти енергією, забезпечуючи стале й стабільне майбутнє для всесвітньої спільноти.

Оцінка ефективності енергетичної системи передбачає використання різноманітних методів та інструментів, які систематично досліджують, аналізують та вимірюють різні аспекти функціонування системи та її складових. Ці підходи сприяють визначенню рівня ефективності системи, виявленню потенційних проблем, проведенню порівняльного аналізу різних режимів роботи та розробці стратегій для оптимізації всіх складових енергетичного комплексу.

Впровадження систем зберігання електроенергії визнається одним з найбільш перспективних шляхів для підвищення ефективності енергетичних систем. Крім того, така ініціатива вирішує інші важливі завдання, такі як надання допоміжних послуг, наприклад, регулювання напруги та частоти у електроенергетичній системі країни [32-35].

Новаторський підхід до оцінки можливостей енергопостачання розподільчих систем полягає в тому, що потужність джерела електроживлення вважається основним

критерієм, а різні вимоги користувачів до надійності розглядаються як основні обмеження. Моделювання показує, що цей підхід може сприяти підвищенню економічної ефективності розподільчих систем, одночасно збільшуючи потужність електропостачання. Також виявлено, що послаблення обмежень на рівні надійності може значно покращити функціональні можливості джерела живлення [36]. Крім того, вплив збільшення потужності розподіленого виробництва на підвищення рівня надійності стає більш очевидним у випадку, коли навантаження на систему зростає.

Існує алгоритм для оцінки ефективності енергетичної системи після встановлення децентралізованих джерел генерації, який враховує обсяги зниження технологічних витрат електроенергії [37, 38]

$$\delta W = \Delta W - \Delta W(P_{DRG}), \quad (1.1)$$

де ΔW - технологічні витрати електроенергії за відсутності ВДЕ;

$\Delta W(P_{DRG})$ - технологічні витрати електроенергії в мережі за наявності ВДЕ потужністю P_{DRG} .

У дослідженні [39] розглядається модель для оцінки ефективності електропостачальної системи, яка передбачає аналіз структури системи та оцінку кожного її компонента за певними критеріями. Як загальний показник ефективності функціонування будь-якої наявної системи електропостачання пропонується використовувати рентабельність переробки електроенергії, що визначається відношенням чистого доходу від переробки електроенергії до витрат на цю переробку [40, 41]

$$P = \frac{\Delta\Pi}{E}, \quad (1.2)$$

де $\Delta\Pi$ - чистий дохід від переробки електроенергії; E - витрати підприємства на переробку електроенергії.

В роботах [42, 43] описується нова модель, яка дозволяє оцінити продуктивність та показники бюджетного профіциту для систем з кількома станами у випадку взаємодії між пошкодженням та обслуговуванням. В даній моделі досліджується вплив змін продуктивності систем з кількома станами на їх загальну продуктивність [44].

Потенціал підвищення енергоефективності можна легко реалізувати за допомогою ранньої енергетичної оцінки, яка враховує місцеві нормативи та умови, замість того, щоб намагатися застосовувати універсальні рішення, які часто неадекватно переносяться з інших контекстів та розробляються з урахуванням інших параметрів [44,46].

Виробничі технології та рівень життя базуються на прогресі та ефективному використанні енергії, а також на показнику споживання електричної енергії на душу населення [47]. У зв'язку з нерівновагою між попитом та виробництвом енергії, а також зростаючим навантаженням на навколишнє середовище, інтегрована енергетична система стала важливою складовою для задоволення зростаючого попиту на енергію [48]. Інтегрована енергетична система може розглядатися як комплексна система, що об'єднує виробництво, постачання та розподіл енергії, створена за допомогою органічної координації та оптимізації процесів виробництва, передачі, перетворення, зберігання та споживання енергії під час планування, будівництва та експлуатації [49]. Інтегрована енергетична система має важливе значення для підвищення ефективності використання енергії, зменшення викидів вуглецю та забезпечення створення екологічно чистої енергії [50].

Для оцінки ефективності роботи електростанцій в [51 – 53] існує показник, який ґрунтується на характеристиках показників продуктивності, визначених з аналізу доцільності та термодинамічної ефективності. Показник ефективності роботи електростанції у межах енергетичної системи оснований на використанні властивості обмеженості та можливості комбінування різних типів енергії з урахуванням їх різного впливу, що була запозичена з аналізу термодинаміки. Крім того, властивість послідовності та збалансованості розглядуваних варіантів була взята з аналізу

доцільності. Цей показник був прийнятий як основа для постановки задачі оптимізації генерації продукту електростанцією.

У дослідженнях [54, 55] описаний метод аналізу ефективності, який дозволяє ефективно розподіляти характеристики маневреності між різними електростанціями. При виявленні незбалансованості між загальним попитом системи та виробничим потенціалом, метод використовує концепцію маржинальної вартості енергії для досягнення балансу в системному попиті, що відповідає подальшому аналізу.

У контексті глобальних зобов'язань щодо зменшення викидів [56] та переходу до сталої енергетики, моделі енергетичних систем стають корисним інструментом для прогнозування та аналізу впливу різних стратегій на навколишнє середовище [57]. Розвиток технологій, таких як сонячна та вітряна енергія, акумуляторні системи та інтелектуальні мережі, потребує точних моделей для забезпечення ефективного впровадження та оптимізації їхнього функціонування.

Безперечно, моделювання стає критичним компонентом у розробці розумних мереж, де прогнозування та керування змінами в споживанні електроенергії [58] є суттєвими. Це дозволяє адаптувати систему до коливань у попиті та постачанні енергії, що забезпечує підвищення енергоефективності та стабільність системи навіть у змінних умовах.

У дослідженні [59] була розроблена математична модель для оцінки економічної доцільності та надійності покращення електропостачання за допомогою незалежного мультиплексування. Ця модель може бути складною та вимагати значної кількості вхідних даних, що може призвести до складностей у обчисленнях та управлінні нею. У багатьох випадках, особливо на етапі розробки, обмежена доступність даних для побудови та перевірки моделі може вплинути на її точність та достовірність.

Існує концепція моделі, що використовує змішане цілочисельне лінійне програмування для короткострокового планування у сфері роздрібної торгівлі, включаючи фотоелектричну установку, вітрову турбіну та паливний елемент [60]. Отримані результати за допомогою інтервальної оптимізації порівнювалися з сценарієм, де відсутня невизначеність. Проте слід зауважити, що невизначеність вимог

була проігнорована у цьому випадку. Серед недоліків цієї моделі можна відзначити, що при великій кількості параметрів та обмежень цілочисельне лінійне програмування може потребувати великої кількості змінних, що ускладнює модель та робить її менш зрозумілою.

У роздрібній торгівлі торговці виступають посередниками між виробниками та кінцевими споживачами, постачаючи електроенергію тим споживачам, які не проявляють бажання або не мають можливості брати участь у оптових ринках електроенергії [61], а також закупають електроенергію в значних обсягах і реалізують її споживачам [62]. Планування діяльності роздрібних торговців проводиться на короткостроковій або середньостроковій основі [63].

Для оцінки енергетичного комплексу також є двоетапна стохастична модель з ризиковими ухилами для короткострокового планування роздрібних торговців [64], при цьому контракт зі штрафом за відкликання (CWP) і контракт з опціоном (CWO) вважаються новими ресурсами для закупівлі електроенергії роздрібними продавцями [65]. Враховуючи особливості стохастичних моделей з ризиковими ухилами, їх ефективне вирішення може потребувати значних обчислювальних ресурсів, що може ускладнити їхнє застосування в реальних умовах короткострокового планування.

Для оптимізації системи електропостачання існує модель, спрямована на оптимізацію економічних показників, зменшення впливу на навколишнє середовище та збільшення соціальних переваг енергетичної мережі [66]. Економічна мета цієї моделі полягає в максимізації прибутку після корпоративного податку, екологічна мета – в мінімізації викидів парникових газів, а соціальна мета – в збільшенні соціальної вигоди. Проте ця модель може виявитися менш гнучкою у випадку потреби адаптації до змін на ринку або стратегії енергетичної мережі. Визначення параметрів, що впливають на економіку, навколишнє середовище та соціальні показники, може бути непередбачуваним та залежати від суб'єктивних оцінок.

Модель реакції на попит, яка поєднує ціну за час використання та стимул для відтворення змін навантаження перед та після впровадження реакції на попит [67, 68]. Крім того, пропонується метод аналізу впливу покращення надійності розподільної

мережі інтегрованою енергетичною системою на основі послідовного методу Монте-Карло. Щодо точності результатів, метод Монте-Карло може вимагати значної кількості ітерацій, щоб забезпечити достатню точність, що може виявитися витратним за ресурсами. Для великих систем метод Монте-Карло може також бути обчислювально неефективним.

Пропускна здатність системи передачі ТТС [69] визначається як максимальна потужність, яку система може передати, враховуючи набір обмежень безпеки та стабільності, що встановлені, і визначає верхню межу можливостей системи. Доступна здатність передачі АТС [70] є ключовим показником, який доповнює ТТС [71] і вказує на додаткову потужність передачі від поточного стану, відображаючи резерв передачі. Недавні наукові розробки в галузі ТТС і АТС призвели до створення єдиної теоретичної системи [72]. Вперше була розроблена математична модель доступної потужності передачі, яка враховує всі можливі моделі зростання навантаження, коли система наближається до межі безпеки.

У науковій літературі було покращено розуміння проблем управління енергією в мікрогрідах за допомогою різних методів дослідження [73]. Один з популярних підходів - метод метаевристичної оптимізації [74], що дозволяє враховувати складність та велику кількість змінних у системах енергопостачання. Одночасно з цим, у вивченні управління енергетичними ресурсами мікрогрідів також застосовуються різні методи лінійного [75] та нелінійного програмування [76]. Ці методи дозволяють точно моделювати та оптимізувати різні аспекти функціонування систем енергопостачання, враховуючи їхню складну структуру та взаємозв'язки. Крім того, дослідники виявляють інтерес до використання теорії ігор [77], що враховує аспекти конфліктів та взаємодій між різними агентами системи. Це дозволяє ураховувати стратегії різних учасників у контексті управління енергетичними ресурсами мікрогрідів.

Існує оптимізаційна модель для взаємопов'язаних мультимікромереж, яка враховує загальну вартість системи та пропонує ефективну стратегію енергоменеджменту для зниження експлуатаційних витрат [7]. Для досягнення оптимальної ефективності системи застосовується ієрархічна система управління

енергією, побудована на основі концепції мультиагентних систем MAS [759]. Модель на основі MAS дозволяє оптимально планувати роботу системи в багатовимірному просторі, у якому враховуються рішення всіх учасників [80]. Проте, через велику кількість агентів і їхніх взаємодій може виникати складність у аналізі та інтерпретації результатів моделі.

В [81] описується довгострокове моделювання електропостачання, що включає повну картину електроенергетичної системи і враховує різноманітні фактори, такі як переваги традиційної енергетики, низький рівень електрифікації у селищах та проблеми з постачанням енергії. Довгострокові моделі енергетичного планування зазвичай охоплюють великий проміжок часу та мають низький рівень деталізації, щоб уникнути складнощів у обчисленнях [82,83]. Хоча довгострокове моделювання є корисним для стратегічного планування енергетичної системи [84], структура енергетики та інших галузей може швидко змінюватися через технологічні прориви або несподівані події, що ускладнює точне прогнозування на довгий період і призводить до втрати актуальності та ефективності моделі.

Несвоєчасне та неефективне використання енергетичних стратегій може мати негативні наслідки, такі як енергетичні кризи, зростання вартості енергії, забруднення навколишнього середовища та залежність від зовнішніх енергетичних джерел. Отже, забезпечення ефективного використання енергії та підвищення її енергоефективності є стратегічною метою для суспільства та економіки країни.

Оцінка ефективності експлуатації енергосистеми за умов споживчого управління та укладених контрактів неможлива за допомогою існуючих методів. Отже, виникає потреба в адаптації методів до різних конфігурацій та режимів роботи системи.

Використання зазначених методів моделювання для оцінки надійності і працездатності ускладнюється при створенні імітаційних моделей з великою кількістю вузлів. Така складність може спричинити утруднення аналізу та взаємодії між компонентами системи.

1.5 Постановка задачі дослідження

Науковою задачею, яка ставиться в даній дисертаційній роботі, є розроблення методу аналізу ефективності експлуатації та працездатності єдиної енергосистеми за рахунок розроблення її імітаційної моделі для визначення зміни властивостей поставки та споживання електроенергії, в основу якої покладено згортку критеріїв аналізу запланованих та випадкових збурень, які роблять можливим руйнування окремих складових та вузлів, які зменшують працездатність.

Наукову задачу пропонується розв'язати у наступній послідовності:

1. Розробити імітаційну модель єдиної енергосистеми для аналізу ефективності експлуатації та працездатності при різних сценаріях запланованих збурень. Для вирішення поставленої задачі необхідно розробити модель енергосистеми у вигляді ярусного графу, вузлами якої є станції устаткування генерації, електричні підстанції системи передачі напругою від 330 кВ до 750 кВ, електричні підстанції системи розподілу напругою від 110 кВ до 220 кВ, ребрами якої є лінії електропередач напругою від 110 кВ до 750 кВ, що враховує потужність згенерованої та переданої мережою електроенергії, номінальну потужність та кількість трансформаторів електричних підстанції, переріз та максимальну пропускну здатність ліній електропередач, що дало можливість визначити складні взаємозв'язки між її вузлами та інтегрувати устаткування в єдину енергосистему для проведення її аналізу ефективності експлуатації та працездатності.

2. Розробити метод оцінки ефективності експлуатації єдиної енергетичної системи на основі імітаційної моделі єдиної енергетичної системи для аналізу її експлуатації на базі згортки окремих критеріїв. Для вирішення поставленої задачі необхідно вдосконалити метод оцінки ефективності експлуатації енергосистеми, в основу якого покладено об'єми поставки та споживання електроенергії. В даний метод необхідно додати можливість врахування об'ємів електроенергії, які необхідно додатково залучити за аналогом кредитної банківської системи у іншій енергопередавальній організації для забезпечення потреб споживача. Крім того

додатково необхідно ввести узагальнений показник згортки окремих критеріїв, а саме обсягу, якості та ефективності поставки електроенергії, що дало можливість в умовах споживчого управління отримати інтегральний показник для виявлення споживачем ефективної поставки серед можливих альтернатив.

3. Розробити стохастичну модель єдиної енергосистеми та метод аналізу працездатності енергосистеми, який дозволяє оцінити її стани під час різних умов експлуатації, враховуючи випадкові збурення. Для вирішення поставленої задачі необхідно розробити модель, яка буде складається з імітаційної моделі енергосистеми, поточного ланцюгу об'єктів перетворення та транспортування, моделі випадкових збурень, які змінюють властивості вузлів та ребер ярусного графу. Також необхідно розробити методу оцінки ефективності експлуатації енергосистеми за рахунок показників її ефективності та працездатності, методу рекурсивного процесу пошуку шляхів отримання електроенергії від об'єкта споживача до устаткування електрогенерації, що дало можливість аналізувати енергосистему для виявлення умов працездатності під час різних сценаріїв експлуатації, враховуючи потенційні виходи з ладу компонентів під час випадкових збурень, які приводять до руйнування обладнання.

Таке дослідження має велику перспективу для покращення ефективності експлуатації та працездатності енергосистеми в Україні, особливо в умовах військового стану. Моделі та методи аналізу ефективності експлуатації та працездатності енергосистеми можуть допомогти прогнозувати її стан під час випадкових та запланованих збурень, може сприяти розробленню окремих стратегій диспетчерського управління енергосистемою для покращення функціонування єдиної енергосистеми.

Отже, це дослідження може мати значний практичний вплив на розвиток енергетичного сектору та забезпечення ефективної експлуатації та працездатності енергосистеми.

1.6 Висновки до розділу

В першому розділі проведено аналіз структури енергетичних систем, перспективи розвитку ВДЕ та існуючі моделі і методи оцінки ефективності експлуатації та працездатності електроенергетичного комплексу.

Були визначені особливості електричних мереж різної напруги на рівнях підпорядкування ОСП, ОСР та на рівні споживача.

1. Розглянуто основні компоненти структури системи електропостачання країн. Були визначені особливості енергосистем різної напруги на рівнях підпорядкування ОСР та на рівні споживача.

2. Проаналізовано сучасний стан та можливість розвитку джерел розосередженої генерації об'єднаної енергетичної системи України та встановлено, що країна має значний дефіцит енергоносіїв, рівень використання альтернативних джерел енергії в енергетичному балансі країни значно низький.

3. Розглянуто існуючі моделі та методи оцінки ефективності системи електропостачання. Було встановлено, що оцінити ефективність експлуатації енергосистеми існуючими методами, враховуючи споживче управління та контракти неможливо, тому, виникає необхідність в адаптації методів до різних конфігурацій та режимів роботи системи.

4. Розглянуто наявні моделі та методи оцінки працездатності та надійності електроенергетичних систем і виявлено, що створення імітаційних моделей з великою кількістю вузлів та зв'язків є викликом у процесі моделювання.

Оцінка ефективності експлуатації та працездатності енергетичних систем стає важливим інструментом для досягнення амбіційних цілей у сфері енергетики. Цей процес не лише дозволяє проводити науковий аналіз енергетичних комплексів, але також допомагає виявляти ефективні та неефективні підходи та розробляти стратегії, спрямовані на зменшення енерговитрат, оптимізацію використання ресурсів та мінімізацію негативного впливу на довкілля під час випадкових та запланованих збурень.

РОЗДІЛ 2

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЄДИНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ДЛЯ РІЗНИХ СЦЕНАРІЇВ ЗАПЛАНОВАНИХ ЗБУРЕНЬ

Для розв'язання другої задачі дисертаційного дослідження, а саме розробити імітаційну модель єдиної енергосистеми для аналізу ефективності експлуатації та працездатності при різних сценаріях запланованих збурень, необхідно визначити особливості застосування графової теорії при моделюванні різних енергосистем та розробити імітаційну модель ефективності та працездатності єдиної енергосистеми на основі «Теорії графів» у вигляді ярусного графу.

Моделювання на основі графової теорії - це процес створення математичних моделей, які являють собою графи, де вузли (вершини) є об'єктами, а ребра – зв'язки між ними [85, 86]. Такі моделі можуть використовуватися для аналізу та прогнозування різних систем та процесів, де об'єкти та зв'язки між ними мають істотне значення.

Приклади застосування моделювання на основі графової теорії включають моделювання соціальних мереж, моделювання дорожньої мережі, моделювання генетичних мереж та багато інших [87 – 89].

Графова теорія надає інструменти для аналізу графових моделей, таких як вимір центральності вершин, визначення найкоротшого шляху між двома вершинами, виявлення спільнот у графі [90]. Ці інструменти можуть бути використані для прогнозування поведінки системи та оцінки ефекту зміни параметрів на систему.

Для створення графових моделей може бути використано безліч підходів, включаючи топологічні, стохастичні, імовірнісні та інші. Графові моделі можуть бути побудовані як статичні, так і динамічні, де зв'язки між вершинами змінюються з часом [91].

Моделювання на основі графової теорії має багато застосувань в електроенергетиці.

2.1 Особливості застосування теорії графів в системах електропостачання

Теорія графів є важливим інструментом для аналізу та моделювання систем електропостачання. Графи допомагають представити складну мережу компонентів системи електропостачання, таких як генератори, трансформатори, лінії передачі та споживачі, у вигляді вершин (вузлів) та ребер (зв'язків) між ними.

Основні концепції теорії графів, що застосовуються в системах електропостачання, включають наступне:

1) Представлення мережі. Систему електропостачання можна уявити як комплексну мережу з різними елементами, які взаємодіють між собою для передачі електроенергії. Застосування теорії графів допомагає представити цю мережу у вигляді графу, де вершини відображають різні елементи системи, а ребра відображають зв'язки між ними. Основні елементи системи електропостачання, які можуть бути представлені як вершини графу, включають:

- електростанції: вершини графу можуть представляти різні типи електростанцій, такі як теплові, гідроелектричні, вітрові або сонячні електростанції. Кожна вершина відповідає конкретній електростанції і містить інформацію про її виробництво електроенергії;

- підстанції: підстанції, які використовуються для передачі електроенергії між різними елементами системи, також можуть бути представлені вершинами графу. Це можуть бути підстанції різних рівнів напруги, які забезпечують з'єднання між електростанціями, трансформаторами та споживачами;

- трансформатори: вершини графу можуть відображати трансформатори, які використовуються для зміни рівня напруги між різними ділянками системи електропостачання. Трансформатори зазвичай використовуються для зниження напруги при передачі електроенергії від виробництва до споживачів та для підвищення напруги при передачі електроенергії від підстанцій до ділянок з великою відстанню;

- лінії передачі: ребра графу представляють лінії передачі, які з'єднують різні елементи системи електропостачання. Це можуть бути високовольтні лінії передачі, кабелі, опори та інші засоби передачі електроенергії.

2) Аналіз зв'язків. Аналіз зв'язків в системах електропостачання за допомогою теорії графів включає виявлення наявних зв'язків між різними елементами та визначення залежностей між ними. Для цього використовуються алгоритми пошуку в ширину BFS і пошуку в глибину DFS, які дозволяють визначити шляхи передачі електроенергії та ієрархію залежностей між елементами системи. Основні задачі:

- пошук шляхів передачі електроенергії: застосування алгоритму BFS або DFS на графі системи електропостачання дозволяє знайти всі можливі шляхи передачі електроенергії від джерел виробництва (електростанцій) до споживачів. Алгоритми проходять через вершини графу, досліджуючи всі можливі шляхи від однієї вершини до іншої. Це дозволяє визначити, які елементи системи є підключеними до електростанцій та яким чином електроенергія передається через систему;

- визначення залежностей між елементами: алгоритми BFS і DFS також допомагають виявити залежності між різними елементами системи електропостачання. Наприклад, при застосуванні BFS з певної вершини графу, всі вершини, які можуть бути досягнуті з цієї вершини, будуть мати відстань 1 від неї. Таким чином, можна визначити, які елементи залежать безпосередньо від конкретного елемента. DFS також допомагає виявити глибину залежності між елементами, оскільки він досліджує граф углиб.

Аналіз зв'язків дозволяє зрозуміти, як елементи системи електропостачання взаємодіють між собою та як зміни в одному елементі можуть вплинути на інші. Це допомагає вирішувати питання щодо оптимізації мережі, виявлення слабких місць, а також розроблення стратегій управління та підтримки системи електропостачання.

3) Виявлення надійності. Виявлення надійності систем електропостачання за допомогою теорії графів включає аналіз надійності та визначення критичних елементів, які впливають на неперервність постачання електроенергії. Використання графічного представлення дозволяє моделювати відключення або відмову окремих

елементів системи шляхом видалення вершин або ребер графу. До основних задач належать:

- моделювання відключень: графічне представлення системи електропостачання дозволяє виокремити окремі вершини або ребра графу, які відповідають елементам, які можуть вийти з ладу або бути відключеними. Видалення вершини означає відключення відповідного елемента, такого як електростанція, підстанція або трансформатор, з системи. Видалення ребра відображає відключення лінії передачі або зв'язку між елементами;

- аналіз впливу відключень: після моделювання відключень можна провести аналіз впливу на систему електропостачання. Це може включати визначення елементів, які залежать від відключених вершин або ребер, і визначення важливих шляхів передачі електроенергії, які можуть бути обривними у випадку відключень;

- визначення надійності та критичних елементів: застосування теорії графів дозволяє визначити надійність системи електропостачання та ідентифікувати критичні елементи, які мають найбільший вплив на неперервність постачання електроенергії. Критичні елементи можуть бути вершинами, відключення яких призводить до розриву постачання електроенергії до важливих споживачів або до ребер, що відповідають вразливим лініям передачі.

Аналіз надійності системи електропостачання за допомогою теорії графів допомагає вирішувати питання про запобігання відключень, планування резервування та вдосконалення структури системи для забезпечення неперервного постачання електроенергії.

4) Оптимізація мережі. Оптимізація мережі електропостачання за допомогою теорії графів включає застосування різних алгоритмів для знаходження оптимальних маршрутів передачі електроенергії, мінімізації втрат енергії та забезпечення ефективного функціонування системи. Основні алгоритми, які можуть бути використані, включають алгоритми пошуку найкоротших шляхів, максимального потоку та задачі комівояжера. Основні задачі:

- пошук найкоротших шляхів: застосування алгоритмів пошуку найкоротших шляхів, таких як алгоритм Дейкстри або алгоритм Беллмана-Форда, допомагає знайти найкоротші маршрути передачі електроенергії між різними елементами системи. Це дозволяє оптимізувати шляхи передачі енергії, зменшити втрати енергії та забезпечити більш ефективне розподілення електроенергії;

- максимальний потік: алгоритми максимального потоку, такі як алгоритм Форда-Фалкерсона або алгоритм Едмондса-Карпа, допомагають визначити максимальний обсяг електроенергії, який може бути переданий через систему електропостачання. Це дозволяє виявити перевантажені ділянки мережі та знайти оптимальний режим роботи системи з максимальним використанням доступного потенціалу;

- задача комівояжера: задача комівояжера полягає в пошуку найкоротшого шляху, що проходить через всі елементи системи електропостачання і повертається в початкову точку. Застосування алгоритмів, які вирішують цю задачу, допомагає оптимізувати послідовність обходу елементів мережі, зменшуючи витрати часу та енергії на переміщення.

Використання цих алгоритмів та методів теорії графів дозволяє забезпечити оптимальне функціонування системи електропостачання, зменшити втрати енергії, покращити надійність та забезпечити ефективне використання ресурсів. Оптимізація мережі є важливим кроком для підвищення продуктивності та стабільності системи електропостачання.

5) Планування розвитку. Планування розвитку систем електропостачання за допомогою теорії графів дозволяє здійснити аналіз структури мережі та виявити можливості для покращення її ефективності та надійності. Основні аспекти, які можна розглянути в контексті планування розвитку, включають виявлення слабких місць, дублюючих елементів та оцінку впливу нових технологій. До основних задач можна віднести наступні:

- виявлення слабких місць: аналіз структури графу дозволяє ідентифікувати слабкі місця в системі електропостачання, такі як ділянки з високою втратою енергії,

недостатньою потужністю або обмеженою пропускнуою здатністю. Виявлення цих слабких місць дозволяє спланувати розширення мережі або вдосконалення існуючих елементів для покращення ефективності та надійності системи;

- дублюючі елементи: аналіз графу також допомагає виявити дублюючі елементи в системі електропостачання, такі як альтернативні шляхи передачі електроенергії або резервні джерела живлення. Використання дублюючих елементів дозволяє забезпечити надійність та зменшити ризик відмови системи в разі виникнення проблем в одному з елементів;

- оцінка впливу нових технологій: застосування теорії графів дозволяє оцінити вплив впровадження нових технологій на систему електропостачання. Нові технології, такі як відновлювані джерела енергії, енергоефективні рішення або розумні мережі, можуть вимагати змін в структурі та функціонуванні мережі. Аналіз графу допомагає визначити оптимальні місця впровадження нових технологій та оцінити їх вплив на продуктивність та надійність системи.

Планування розвитку системи електропостачання з використанням теорії графів дозволяє зробити обґрунтовані рішення щодо розширення мережі, впровадження нових технологій та покращення ефективності системи, забезпечуючи надійне електропостачання.

2.2 Імітаційна модель енергосистеми

Імітаційну модель енергосистеми можна представити у вигляді ярусного графа.

Ярусний граф (також відомий як граф з підвісами або граф з рівнями) є видом графа, де вершини групуються на рівні або яруси відповідно до їхньої ієрархічності чи структурного відношення. Кожен рівень відображає певний рівень важливості або деталізації компонентів системи.

Така структура графа дозволяє візуально відображати ієрархію та організацію системи, а також розкриває її складні взаємозв'язки. Ярусний граф часто використовується для моделювання ієрархічних структур, таких як організаційні

структури, інформаційні системи, технічні мережі, системи управління, системи електропостачання тощо.

Один з основних варіантів ярусного графа - це граф зверху донизу, де вершини розташовані по ярусах зверху вниз, з верхнього ярусу до нижнього. Протилежний варіант - граф знизу вгору, де вершини розташовані по ярусах знизу вгору, від нижнього ярусу до верхнього. На рисунку 2.1 наведено приклад ярусного графу

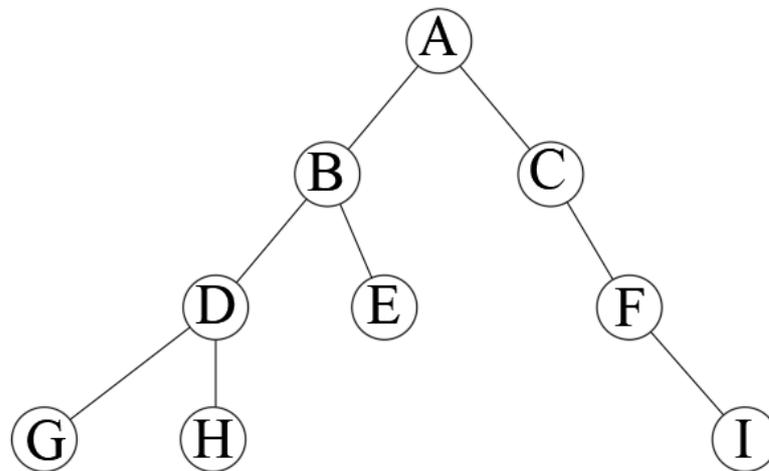


Рис. 2.1. Приклад ярусного графу

Ярусний граф має свої переваги та недоліки, які варто врахувати при його застосуванні, а саме:

- ярусний граф дозволяє візуально представити ієрархічну структуру системи чи організації. Це дозволяє легко розрізнити різні рівні важливості та залежностей між компонентами;

- графічне відображення у вигляді ярусного графа є дуже інтуїтивно зрозумілим та легко сприймається. Він допомагає швидко орієнтуватись у структурі системи та зв'язках між її компонентами;

- ярусний граф дозволяє зручно відстежувати та аналізувати взаємозв'язки між компонентами системи;

- ярусний граф може бути легко розширений або змінений, додаванням нових вершин або рівнів, що дозволяє зручно враховувати розвиток або зміни в структурі системи;

- при дуже великих системах з великою кількістю компонентів та взаємозв'язків ярусний граф може стати складним для розуміння та аналізу через велику кількість вершин та зв'язків;

- ярусний граф надає загальний огляд структури системи, але може бути обмежений у точності відображення деталей та взаємозв'язків між компонентами;

- ярусний граф може бути менш гнучким у порівнянні з іншими типами графів, оскільки він обмежений певною ієрархічною структурою та залежностями між рівнями;

- велика кількість компонентів та взаємозв'язків у системі може привести до втрати деякої деталізації при відображенні в ярусному графі.

Для створення імітаційної моделі електроенергетичної системи було використано ярусний граф $G = (V, E)$, який включає в себе

- множину $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина вершин;

- множину $E = \{e_{1,2}, e_{2,3}, \dots, e_{i,j}\}$ – множина ребер або дуг графу.

На верхньому ярусі «РІВЕНЬ ГЕНЕРАЦІЇ» розташовані вершини, що представляють основні генеруючі електричні станції або джерела електроенергії, такі як теплові електростанції, теплові електроцентралі, атомні електростанції, гідроелектростанції, гідроакumuлюючі електростанції.

В таблиці 2.1 наведена детальна інформація про вершини яруса «РІВЕНЬ ГЕНЕРАЦІЇ». Властивостями кожної вершини яруса є: ідентифікатор вершини, назва вершини, генеруюча потужність та тип електростанції.

Таблиця 2.1

Множина вершин *V* верхнього яруса «РІВЕНЬ ГЕНЕРАЦІЇ»

| Ідентифікатор вершини | Назва вершини | Генеруюча потужність, МВт | Тип електростанції |
|--------------------------|---------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| <i>V1</i> | Gen1 | 3000 | Атомна |
| <i>V2</i> | Gen2 | 6000 | Атомна |
| <i>V3</i> | Gen3 | 2000 | Атомна |
| <i>V4</i> | Gen4 | 2835 | Атомна |
| <i>V5</i> | Gen5 | 1800 | Теплова |
| <i>V6</i> | Gen6 | 302 | Гідроакumuлююча |
| <i>V7</i> | Gen7 | 500 | Теплова |
| <i>V8</i> | Gen8 | 700 | Теплова |
| <i>V9</i> | Gen9 | 1825 | Теплова |
| <i>V10</i> | Gen10 | 972 | Гідроакumuлююча |
| <i>V11</i> | Gen11 | 702 | Гідро |
| <i>V12</i> | Gen12 | 482,5 | Гідро |
| <i>V13</i> | Gen13 | 2351 | Теплова |
| <i>V14</i> | Gen14 | 510 | Теплова |
| <i>V15</i> | Gen15 | 636,2 | Теплова |
| <i>V16</i> | Gen16 | 2079 | Теплова |
| <i>V17</i> | Gen17 | 910 | Теплова |
| <i>V18</i> | Gen18 | 1532 | Теплова |
| <i>V19</i> | Gen19 | 2850 | Теплова |
| <i>V20</i> | Gen20 | 2265 | Теплова |
| <i>V21</i> | Gen21 | 3600 | Теплова |
| <i>V22</i> | Gen22 | 1270 | Теплова |

На наступному ярусі розташовані вершини, які представляють підстанції ОСП електроенергії напругою 750 кВ. В таблиці 2.2 наведена детальна інформація про вершини яруса «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 750 кВ». Властивостями кожної вершини яруса є: ідентифікатор вершини, назва вершини, кількість трансформаторів, номінальна потужність трансформаторів, навантаження підстанції.

Таблиця 2.2

Множина вершин V «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 750 кВ»

| Іденти-фікатор вершини | Назва вершини | Кількість трансфор- маторів, шт. | Номінальна потужність трансфор- маторів, МВт | Навантаження підстанції, кВт |
|---------------------------|------------------|--|---|------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>V30</i> | PS_750_1 | 3 2 | 333 125 | 999 |
| <i>V31</i> | PS_750_2 | 3 | 250 | 600 |
| <i>V32</i> | PS_750_3 | 2 | 999 | 1598 |
| <i>V33</i> | PS_750_4 | 2 2 | 1250 999 | 3600 |
| <i>V34</i> | PS_750_5 | 2 | 999 | 1598 |
| <i>V35</i> | PS_750_6 | 2 1 | 250 300 | 600 |
| <i>V36</i> | PS_750_7 | 1 | 999 | 799 |
| <i>V37</i> | PS_750_8 | 2 | 999 | 1500 |
| <i>V38</i> | PS_750_9 | 3 | 999 | 2398 |
| <i>V39</i> | PS_750_10 | Підстанція іншої держави | | |

На наступному ярусі розташовані вершини, які представляють підстанції ОСП електроенергії напругою 500 кВ. В таблиці 2.3 наведена детальна інформація про вершини яруса «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 500 кВ». Властивостями кожної вершини яруса

ε: ідентифікатор вершини, назва вершини, кількість трансформаторів, номінальна потужність трансформаторов, навантаження підстанції.

Таблиця 2.3

Множина вершин V «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 500 кВ»

| Ідентифікатор вершини | Назва вершини | Кількість трансформаторів, шт. | Номінальна потужність трансформаторів, МВт | Навантаження підстанції, кВт |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|--|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| V40 | PS_500_1 | 2 | 200 | 320 |
| V41 | PS_500_2 | 2 | 200 | 400 |
| | | 1 | 100 | |

На наступному ярусі розташовані вершини, які представляють підстанції ОСП електроенергії напругою 400 кВ. В таблиці 2.4 наведена детальна інформація про вершини яруса «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 400 кВ». Властивостями кожної вершини яруса ε: ідентифікатор вершини, назва вершини, кількість трансформаторів, номінальна потужність трансформаторов, навантаження підстанції.

Таблиця 2.4

Множина вершин V «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 400 кВ»

| Ідентифікатор вершини | Назва вершини | Кількість трансформаторів, шт. | Номінальна потужність трансформаторів, МВт | Навантаження підстанції, кВт |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|--|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| V42 | PS_400_1 | 2 | 200 | 980 |
| | | 2 | 400 | |

На наступному ярусі розташовані вершини, які представляють підстанції ОСП електроенергії напругою 330 кВ. В таблиці 2.5 наведено фрагмент детальної інформації про вершини яруса «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 330 кВ». Повний перелік вершин яруса наведено в додатку А. Властивостями кожної вершини яруса є: ідентифікатор вершини, назва вершини, кількість трансформаторів, номінальна потужність трансформаторів, навантаження підстанції.

Таблиця 2.5

Фрагмент множини вершин V «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 330 кВ»

| Іденти- фікатор вершини | Назва вершини | Кількість трансфор- маторів, шт. | Номінальна потужність трансфор- маторів, МВт | Навантаження підстанції, кВт |
|-------------------------------|---------------|---|---|------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| V43 | PS_330_1 | 3 | 250 | 600 |
| V44 | PS_330_2 | 2 | 125 | 200 |
| V45 | PS_330_3 | транзит | | |
| V46 | PS_330_4 | 2 | 325 | 488 |
| V47 | PS_330_5 | 2 | 200 | 320 |
| V48 | PS_330_6 | 3 | 200 | 500 |
| V49 | PS_330_7 | 2 | 125 | 200 |
| V50 | PS_330_8 | 2 | 250 | 600 |
| | | 1 | 300 | |
| V51 | PS_330_9 | 1 | 200 | 160 |
| V52 | PS_330_10 | 2 | 125 | 360 |
| | | 1 | 200 | |
| V53 | PS_330_11 | 2 | 125 | 200 |
| V54 | PS_330_12 | 3 | 125 | 300 |

На наступному ярусі розташовані вершини, які представляють підстанції ОСП напругою 220 кВ. В таблиці 2.6 наведено фрагмент детальної інформації про вершини яруса «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 220 кВ». Повний перелік вершин яруса наведено в додатку А. Властивостями кожної вершини яруса є: ідентифікатор вершини, назва вершини, кількість трансформаторів, номінальна потужність трансформаторів, навантаження підстанції.

Таблиця 2.6

Фрагмент множини вершин V «ПІДСТАНЦІЇ ОСП 220 кВ»

| Іденти- фікатор вершини | Назва вершини | Кількість трансфор- маторів, шт. | Номінальна потужність трансфор- маторів, МВт | Навантаження підстанції, кВт |
|-------------------------------|---------------|---|---|------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| V132 | PS_220_1 | 2 | 63 | 101 |
| V133 | PS_220_2 | 2 | 63 | 105 |
| V134 | PS_220_3 | 2 | 125 | 200 |
| V135 | PS_220_4 | 2 | 125 | 200 |
| V136 | PS_220_5 | 2 | 125 | 200 |
| V137 | PS_220_6 | 2 | 63 | 101 |
| V138 | PS_220_7 | 2 | 200 | 320 |
| V139 | PS_220_8 | 2 | 125 | 200 |
| V140 | PS_220_9 | 2 | 125 | 200 |
| V141 | PS_220_10 | 2 | 200 | 320 |

На наступному ярусі розташовані вершини, які представляють підстанції ОСР напругою 150 кВ. В таблиці 2.7 наведено фрагмент детальної інформації про вершини яруса «ПІДСТАНЦІЇ ОСР 150 кВ». Повний перелік вершин яруса наведено в додатку А. Властивостями кожної вершини яруса є: ідентифікатор вершини, назва вершини,

кількість трансформаторів, номінальна потужність трансформаторов, навантаження підстанції.

Таблиця 2.7

Множина вершин V «ПІДСТАНЦІЇ ОСР 150 кВ»

| Ідентифікатор вершини | Назва вершини | Кількість трансформаторів, шт. | Номінальна потужність трансформаторів, МВт | Навантаження підстанції, кВт |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|--|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| V167 | PS_150_1 | 1 | 16 | 12 |
| V168 | PS_150_2 | 1 | 25 | 19 |
| V169 | PS_150_3 | 2 | 40 | 168 |
| | | 1 | 90 | |
| | | 1 | 25 | |
| V170 | PS_150_4 | 2 | 25 | 40 |
| V171 | PS_150_5 | 1 | 200 | 160 |
| V172 | PS_150_6 | 2 | 25 | 40 |
| V173 | PS_150_7 | 2 | 25 | 40 |
| V174 | PS_150_8 | 2 | 40 | 64 |
| V175 | PS_150_9 | 2 | 40 | 64 |
| V176 | PS_150_10 | 2 | 40 | 64 |

На наступному ярусі розташовані вершини, які представляють підстанції ОСР напругою 110 кВ. В таблиці 2.8 наведено фрагмент детальної інформації про вершини яруса «ПІДСТАНЦІЇ ОСР 110 кВ». Повний перелік вершин ярусу наведено в додатку А. Властивостями кожної вершини яруса є: ідентифікатор вершини, назва вершини, кількість трансформаторів, номінальна потужність трансформаторов, навантаження підстанції.

Множина вершин V «ПІДСТАНЦІЇ ОСР 110 кВ»

| Ідентифікатор вершини | Назва вершини | Кількість трансформаторів, шт. | Номінальна потужність трансформаторів, МВт | Навантаження підстанції, кВт |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|--|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>V200</i> | PS_110_1 | 2 | 16 | 26 |
| <i>V201</i> | PS_110_2 | 2 | 25 | 40 |
| <i>V202</i> | PS_110_3 | 2 | 10 | 17 |
| <i>V203</i> | PS_110_4 | 2 | 32 | 50 |
| <i>V204</i> | PS_110_5 | 2 | 25 | 40 |
| <i>V205</i> | PS_110_6 | 2 | 32 | 48 |
| <i>V206</i> | PS_110_7 | 3 | 10 | 25 |
| <i>V207</i> | PS_110_8 | 1 | 40 | 53 |
| | | 1 | 25 | |
| <i>V208</i> | PS_110_9 | 2 | 25 | 40 |
| <i>V209</i> | PS_110_10 | 2 | 40 | 64 |

Після визначення вершин графа, необхідно визначити зв'язки або залежності між ними, тобто визначити ребра графа. Ребра графа відображають фізичні або функціональні зв'язки між компонентами системи електропостачання, і це дозволяє розкрити різноманітні аспекти функціонування системи.

Фізичні зв'язки між компонентами включають передачу електроенергії через кабельні або повітряні лінії електропередач, які з'єднують генеруючі станції, підстанції та споживачів.

Визначення ребер графа дозволяє створити повну імітаційну модель системи електропостачання, в якій кожне ребро графа відображає важливі зв'язки між компонентами.

В таблиці 2.9 наведено фрагмент детальної інформації та властивості множини ребр E ярусного графа. Властивостями кожного ребра ярусного графу є: ідентифікатор ребра, довжина, резервування, максимальні втрати в лінії, вартість 1 км, напруга в лінії. Повний перелік ребер ярусного графу наведено в додатку Б.

Таблиця 2.9

Множина вершин E ярусного графу

| Ідентифікатор ребра | Довжина, км | Перетин | Резервування | Максимальні втрати в лінії, кВт | Вартість 1 км, грн/км | Напруга в лінії, кВ |
|---------------------|-------------|-------------|------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| e (36,37) | 126 | 4хАС-500/64 | – | 7410 | 4х270000 | 750 |
| e (36,37) | 162 | 2хАС-300/39 | резерв по 330 кВ | 164023 | 2х220000 | 330 |
| e (3,36) | 261 | 5хАС-400/51 | – | 4339 | 5х230000 | 750 |
| e (33,40) | 198 | 2хАС-400 | – | 2975 | 4х230000 | 500 |
| e (13,42) | 197 | 2хАСО-500 | – | 34954 | 4х270000 | 400 |
| e (5,43) | 132 | 2хАС-300/39 | – | 21468 | 2х220000 | 330 |

На рисунку 2.2 наведено фрагмент ярусного графу електроенергетичного комплексу країни.

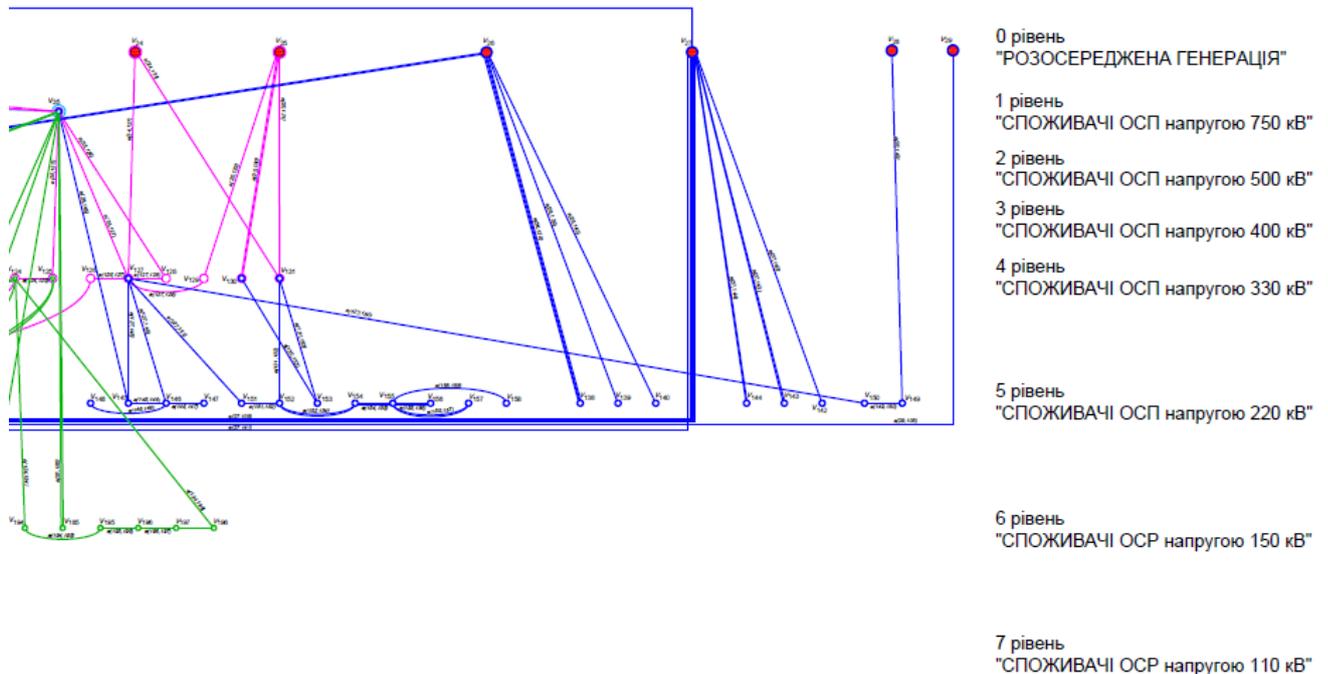


Рис. 2.2. Фрагмент ярусного графу електроенергетичної системи країни

Загалом імітаційна модель у вигляді ярусного графу складається з 385 вершин та 626 зв'язків (ребер).

Круговий ярусний граф є одним з видів графів, який має деякі специфічні властивості. Він складається з вершин та ребер, причому кожна вершина з'єднана з двома сусідніми вершинами утворюємої ними ребром, а також кожна пара вершин з'єднана ребром. Особливість кругового ярусного графу полягає в тому, що він може бути зображений у вигляді кола, де вершини розташовані на колі, а ребра - як радіуси, що з'єднують центр кола з вершинами.

До основних властивостей кругового графа належать:

- круговий ярусний граф складається з вершин і ребер. Вершини представлені точками на колі, а ребра – відрізками, які з'єднують ці вершини;
- кожна вершина графа з'єднана ребром з двома сусідніми вершинами. Це створює закритий контур, який охоплює всі вершини графа;
- оскільки вершини розташовані на колі, можна використовувати геометричні властивості кола для аналізу і вивчення графа;

– кругові ярусні графи можуть використовуватися для моделювання різних ситуацій, наприклад, в електронних ланцюгах, де вершини можуть представляти елементи, а ребра – зв'язки між ними.

До основних переваг кругового графу можна віднести: просту та інтуїтивно зрозумілу структуру, що робить його легким для вивчення та аналізу; завдяки простій структурі та замкнутому циклу кругового ярусного графа, аналіз його властивостей, таких як діаметр, радіус та інші метрики, може бути здійснений досить легко; можливість представлення кругового ярусного графа у вигляді кола дозволяє легко візуалізувати його структуру та взаємозв'язки між вершинами.

До основних недоліків кругового графа відносять: у кругового ярусного графа кількість ребер зростає пропорційно кількості вершин, що може призвести до збільшення обсягу даних та складнощів при обробці; у випадках, коли граф має велику кількість вершин та ребер, круговий ярусний граф може вимагати значних обсягів пам'яті для зберігання своєї структури; у деяких випадках структура кругового ярусного графа може бути занадто простою для адекватного моделювання складних систем або аналізу складних взаємозв'язків.

На рисунку 2.3 наведено приклад кругового графу.

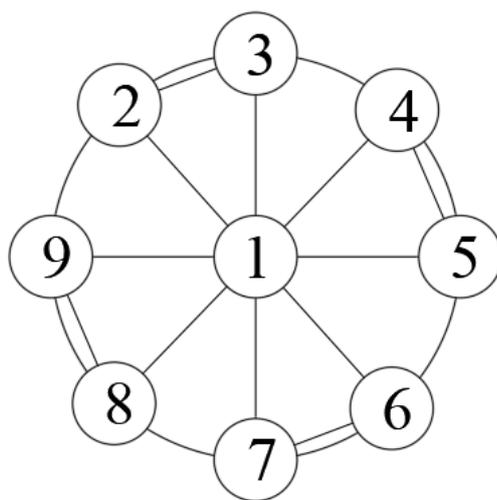


Рис. 2.3. Приклад кругового графу системи

На рисунку 2.4 наведено фрагмент кругового ярусного графу імітаційної моделі електроенергетичної системи.

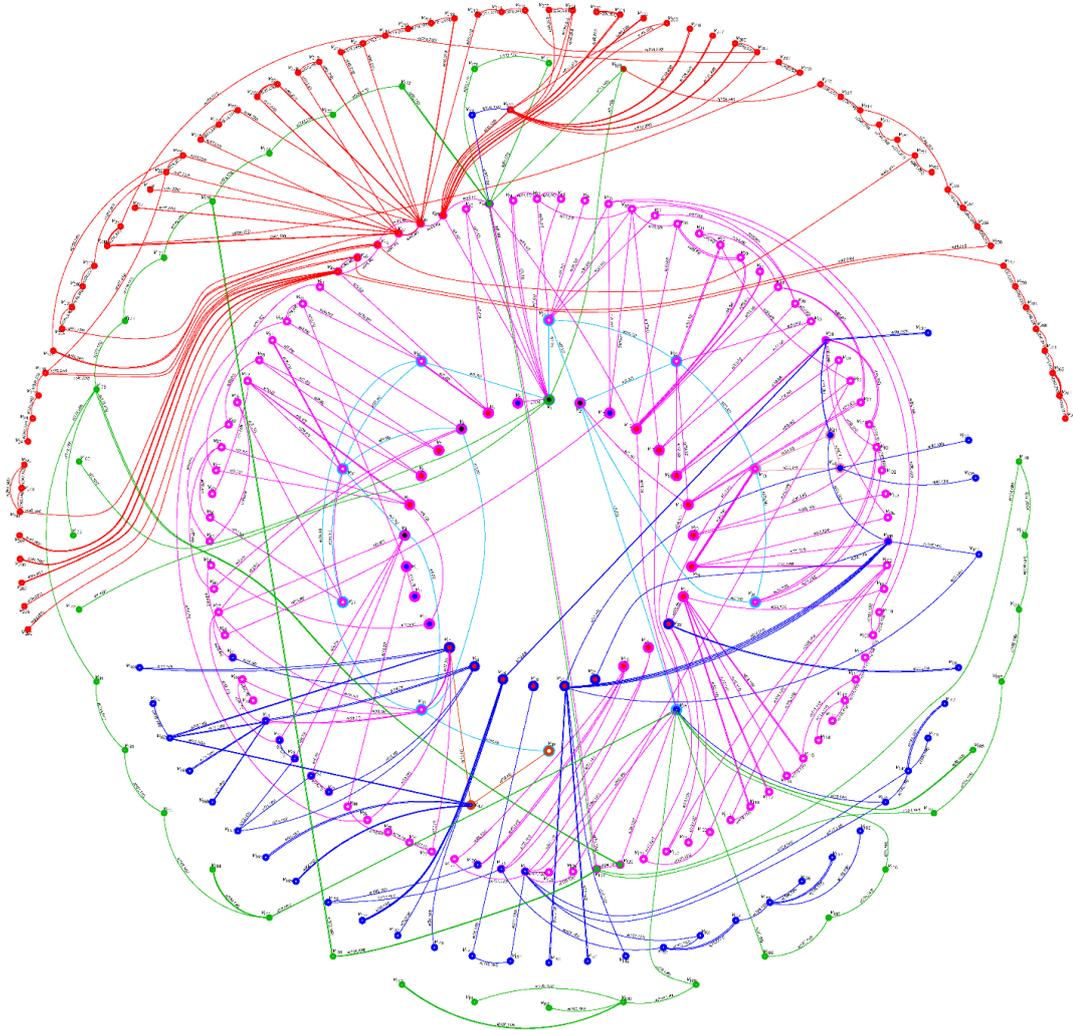


Рис. 2.4. Фрагмент кругового ярусного графу імітаційної моделі

Ще один з способів подання графа – у вигляді матриці суміжності AG . Даний спосіб використовується при роботі з графом на комп'ютері. Імітаційна модель складається з 385 вершин, тому матриця AG буде розміром 385×385 , яка містить множину елементів $AG = (a_{i,j})$. В цієї матриці індекси i, j змінюються від 1 до n , а значення $a_{i,j}$ приймає 1, коли між відповідними вершинами графу V_i, V_j існує ребро або приймає значення 0, якщо такого ребра не існує

$$a_{i,j} = \left[(v_i, v_j) \in E \right] = \begin{cases} 1, (v_i, v_j) \in E \\ 0, (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (2.1)$$

Для автоматизації побудови матриці суміжності був розроблений програмний код на мові програмування VBA, який вбудований в Microsoft Excel. Вихідними даними для побудови матриці суміжності є база даних ребер, яка наведена в додатку Б.

Програмний код для побудови матриці суміжності:

Sub matrix_sm()

Dim v As Integer, e As Integer, i As Integer, j As Integer

Worksheets("v").Cells.Clear

v = Worksheets("e").Cells(2, 12)

MsgBox ("Кількість вершин графу - " & v)

e = Worksheets("e").Cells(3, 12)

MsgBox ("Кількість ребер графу - " & e)

Worksheets("v").Cells(2, 2) = "V"

For i = 1 To v

For j = 1 To v

Worksheets("v").Cells(2, 2 + i) = i

Worksheets("v").Cells(2 + i, 2) = i

Worksheets("v").Cells(2 + j, 2 + i) = 0

Next j

Next i

For i = 1 To e

e1 = Worksheets("e").Cells(1 + i, 2)

e2 = Worksheets("e").Cells(1 + i, 3)

Worksheets("v").Cells(2 + e1, 2 + e2) = Worksheets("v").Cells(2 + e1, 2 +

e2) + 1

$Worksheets("v").Cells(2 + e2, 2 + e1) = Worksheets("v").Cells(2 + e2, 2 + e1) + 1$

Next i

End Sub

До основних недоліків матриці суміжності можна віднести, що для графів з великою кількістю вершин матриця суміжності може вимагати значної кількості пам'яті, особливо якщо більшість ребер відсутні та у разі розріджених графів, де більшість вершин не з'єднані, матриця суміжності міститиме багато нульових значень, що може бути неефективним для зберігання та обробки.

На рисунку 2.5 наведено фрагмент матриці суміжності імітаційної моделі.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| V | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 19 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 31 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 32 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 34 | 0 | 1 | 0 | 0</ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

даними для побудови матриці суміжності є база даних ребер, яка наведена в додатку Б.

Програмний код для побудови матриці інцидентності:

```
Sub matrix_inc()
```

```
    Dim v As Integer, e As Integer, i As Integer, j As Integer
```

```
    Dim e1 As String, e2 As String
```

```
    v = Worksheets("e").Cells(2, 12)
```

```
    MsgBox ("Кількість вершин графу - " & v)
```

```
    e = Worksheets("e").Cells(3, 12)
```

```
    MsgBox ("Кількість ребер графу - " & e)
```

```
    Worksheets("inc").Cells(2, 2) = "V"
```

```
    For i = 1 To v
```

```
        For j = 1 To e
```

```
            Worksheets("inc").Cells(2 + i, 2) = i
```

```
            e1 = Worksheets("e").Cells(1 + j, 2)
```

```
            e2 = Worksheets("e").Cells(1 + j, 3)
```

```
            Worksheets("inc").Cells(2, 2 + j) = e1 & "-" & e2
```

```
            Worksheets("inc").Cells(2 + i, 2 + j) = 0
```

```
        Next j
```

```
    Next i
```

```
    For i = 1 To e
```

```
        e1 = Worksheets("e").Cells(1 + i, 2)
```

```
        e2 = Worksheets("e").Cells(1 + i, 3)
```

```
        Worksheets("inc").Cells(2 + e1, 2 + i) = 1
```

```
        Worksheets("inc").Cells(2 + e2, 2 + i) = 1
```

```
    Next i
```

```
End Sub
```

До основних недоліків матриці інцидентності можна віднести, що для графів з великою кількістю вершин та ребер матриця інцидентності може вимагати значної

кількості пам'яті, особливо у разі розріджених графів, де більшість ребер відсутні та матриця інцидентності може бути складною для читання та редагування, особливо в разі великих графів, оскільки вона містить багато нульових значень, що ускладнює визначення зв'язків між вершинами та ребрами.

На рисунку 2.6 наведено фрагмент матриці інцидентності для імітаційної моделі моделі.

| V | 1-167 | 1-168 | 1-169 | 1-30 | 1-31 | 1-43 | 1-49 | 1-50 | 1-6 | 1-81 | 1-81 | 1-83 | 10-11 | 10-53 | 10-80 | 100-101 | 101-102 | 105-141 | 106-119 | 106-120 | 106-123 | 107-109 | 108-109 | 109-110 | 110-111 | 111-112 | 111-115 | 112-113 | 112-114 | 115-116 |
|----|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 42 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Рис. 2.6. Фрагмент матриці інцидентності $BG = (b_{i,j})$

На основі проведеного дослідження в рамках другого розділу можна сформулювати наукову новизну, яка полягає в запропонованій імітаційній моделі єдиної енергосистеми у вигляді ярусного графа, вузлами якої є станції устаткування генерації, електричні підстанції системи передачі напругою від 330 кВ до 750 кВ, електричні підстанції системи розподілу напругою від 110 кВ до 220 кВ, ребрами якої є лінії електропередач напругою від 110 кВ до 750 кВ. Модель враховує потужність згенерованої та переданої мережею електроенергії, номінальну потужність та кількість трансформаторів електричних підстанції, переріз та максимальну пропускну здатність ліній електропередач. Такий стан отриманих результатів дослідження дав можливість визначити складні взаємозв'язки між її вузлами та

інтегрувати устаткування в єдину енергосистему для проведення її аналізу ефективності експлуатації та працездатності.

2.3 Висновки до розділу

1. Використання «Теорії графів» для моделювання енергосистем дозволяє ефективно визначати структуру системи, взаємозв'язки між її складовими та потенційні проблемні зони.

2. Створення імітаційної моделі енергосистеми у вигляді графу дозволяє зручно візуалізувати та аналізувати складні взаємозв'язки між елементами енергосистеми.

3. Представлена імітаційна модель енергосистеми у вигляді ярусного графа, що допоможе зробити обґрунтовані рішення щодо розширення мережі, впровадження нових технологій та покращення ефективності експлуатації та працездатності системи.

4. Ярусний граф може бути легко інтегрований з сучасними технологіями для забезпечення диспетчерського управління енергосистемою. Це включає в себе системи моніторингу, аналізу даних та автоматизацію.

5. Представлена імітаційна модель може бути використана для аналізу працездатності енергосистеми, дозволяючи визначити ймовірність відмови обладнання та оцінити ризики для електроенергетичної системи в цілому.

РОЗДІЛ 3

МЕТОД ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЄДИНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЧЕРЕЗ ЗГОРТКУ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ

Для розв'язання третьої задачі дисертаційної роботи, а саме розробки методу оцінки ефективності експлуатації єдиної енергосистеми на основі її імітаційної моделі для аналізу експлуатації на базі згортки окремих критеріїв, необхідно визначити часткові критерії оцінки ефективності експлуатації енергосистеми та розробити метод розрахунку узагальненого показника ефективності експлуатації як згортки критеріїв енергосистеми різного походження в один узагальнений показник.

Сучасні системи енергопостачання є складними компонентами електроенергетичних систем, відмінними від інших технічних систем не лише за розмірами, але й за складністю взаємодії між окремими елементами та зовнішнім середовищем, а також між об'єктами генерації та споживання електроенергії. Ці системи включають в себе розгалужену мережу передачі, розподілу та зберігання електроенергії, а також різноманітні джерела енергії, від великих електростанцій до відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія [92, 93].

Складність таких систем полягає в їхній динамічності та непередбачуваності, оскільки попит на електроенергію постійно змінюється, а енергетичні мережі повинні негайно реагувати на ці зміни. Крім того, розвиток нових технологій, таких як сховища енергії та розумні мережі, створює нові виклики та можливості для оптимізації енергопостачання. Таким чином, розуміння складності та взаємодії в електроенергетичних системах стає ключовим для забезпечення стабільності, ефективності та сталого розвитку енергетики.

Кожна енергетична система будь-якої країни - це складна мережа генераційних, передавальних, розподільних та трансформаційних об'єктів, яка забезпечує електроенергією країну. Наявність потужних електроустановок в електроенергетичній системі призводить до тяжких економічних збитків та негативних соціальних наслідків в разі порушення роботи цих електроустановок. Збої в роботі генераційних чи передавальних об'єктів можуть викликати великі перебої в

енергопостачанні, що призводить до зупинки виробництва, втрати важливих даних, а також може загрожувати життю та здоров'ю людей [94].

Такі негативні наслідки можуть бути підсилені в умовах збільшення об'ємів споживання електроенергії та зростання залежності сучасного суспільства від надійного електропостачання. Тому важливо розвивати та підтримувати системи моніторингу, попередження та аварійного реагування, а також інвестувати в модернізацію і підвищення працездатності інфраструктури електропостачання. Забезпечення ефективної роботи електроенергетичних систем стає ключовим завданням для забезпечення сталого розвитку енергетики та економіки країни. Усі компоненти енергосистеми повинні відповідати відповідним стандартам ефективності експлуатації у процесах генерації, транспортування та трансформації електроенергії.

Головні виклики у забезпеченні ефективної роботи енергосистеми включають оцінку ефективності експлуатації його компонентів, постійний контроль та ефективне управління технологічними процесами, дотримання вимог до резервування тощо.

Низький рівень надійності ЕЕС безпосередньо впливає на ефективність та якість постачання електроенергії. Часті випадки аварій призводять до значного недовипуску електроенергії, що може досягати навіть кількох мільярдів кіловат-годин. Такий недовипуск електроенергії призводить до серйозних економічних втрат, включаючи зупинку роботи підприємств, систем опалення, водопостачання, транспорту та інших [95].

Для вирішення проблеми експлуатації ЕЕС необхідно постійно розвивати та впроваджувати нові та вдосконалювати існуючі методи та моделі оцінки ефективності експлуатації.

Ці методи та моделі є основою для прийняття технічних рішень, спрямованих на забезпечення надійної роботи та стимулювання інноваційного розвитку енергетичних мереж.

Шляхом системного аналізу та моделювання можна оцінити вплив різних факторів на роботу системи, передбачити можливі аварійні ситуації та розробити стратегії їх запобігання.

Крім того, важливо враховувати сучасні технології для автоматизації процесів моніторингу та управління електромережами. Такий підхід дозволить забезпечити оптимальне використання ресурсів, знизити витрати та підвищити загальну ефективність енергетичних систем.

3.1 Модель для оцінки ефективності експлуатації електроенергетичної системи

Оцінка ефективності експлуатації ЕЕС в сучасному світі є критично важливою для забезпечення стабільності енергосистеми та задоволення потреб споживачів.

Цей процес включає в себе аналіз різноманітних факторів, включаючи якість електроенергії, надійність постачання, вартість, ефективність використання ресурсів і вплив на навколишнє середовище.

Оцінка ефективності експлуатації енергосистеми виконується на підставі узагальненого критерія ефективності, який формується за методом згортки частинних критеріїв, а саме:

- об'єм поставки електроенергії (C_{Π});
- якості поставки електроенергії (C_f);
- ефективність поставки електроенергії ($C_{\text{эф.}}$).

Критерій об'єму поставки електроенергії можна визначити за наступною формулою

$$C_{\Pi} = \frac{P_{\text{м}} \cdot W_{\text{с.е}}}{W_{\text{п.е}}}, \quad (3.1)$$

де $P_{\text{м}}$ – ймовірність безвідмовної роботи мережі;

$W_{\text{с.е}}$ – об'єм споживаної електроенергії, МВА · год;

$W_{п.е}$ – об'єм електроенергії, що постачається, МВА · год.

Критерій якості поставки електроенергії визначається як

$$C_f = \frac{\omega_\phi}{\omega_n}, \quad (3.2)$$

де ω_n – нормоване значення частоти електроенергії, Гц;

ω_ϕ – фактичне значення частоти, Гц.

Фактичне значення частоти визначається так:

$$\omega_\phi = \frac{\Delta S}{\frac{S_r}{S_{сп}}(-m_r + k_n)}, \quad (3.3)$$

де m_r – коефіцієнт саморегулювання частоти по повній потужності в енергосистемі;

k_n – коефіцієнт регулюючого ефекту навантаження по повній потужності;

$S_{сп}$ – величина повної потужності, що споживається навантаженням в енергосистемі, МВА;

S_r – величина повної потужності, яка генерується та транспортується енергосистемою, МВА.

Величина повної потужності, що споживається в енергосистемі залежить від показників якості електроенергії, а саме частоти та напруги (ω, U).

Регулюючий ефект навантаження по повній потужності визначається за наступною формулою

$$\frac{\partial S_{сп}(\omega, U)}{\partial \omega} = \frac{\partial S_{сп}}{\partial \omega} + \frac{\partial S_{сп}}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial \omega}. \quad (3.4)$$

Значення $\frac{\partial S_{\text{сп}}}{\partial \omega}$ та $\frac{\partial S_{\text{сп}}}{\partial U}$ визначаються властивостями споживачів, а коефіцієнт

$\frac{\partial U}{\partial \omega}$ залежить від характеристик генераторів, мережі, автоматичних регуляторів частоти.

Енергосистема має значну кількість та різноманітність споживачів, кожен з яких відрізняється за ступенем залежності навантаження від частоти, що відображається у формулі 3.5.

$$S_{\text{сп}} = S + S_1 \frac{\omega}{\omega_0} + S_2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + \dots + S_n \frac{\omega^n}{\omega_0^n}, \text{ МВА}, \quad (3.5)$$

де S, S_1, S_2, \dots, S_n – повна потужність для окремої категорії споживачів, МВА;

ω_0 – номінальна частота обертів навантаження, в.о;

ω – частота обертів навантаження, в.о.

В формулі 3.5 наводяться категорії споживачів, залежність навантаження яких від частоти характеризується дробовим показником степеню.

Кожен елемент у правій частині формули 3.5 відображає типовий характер категорії споживача. Елемент S відображає стале навантаження, яке є характерним для споживачів, чиє живлення не залежить від частоти. Щодо другого елемента, він характеризує навантаження з постійним моментом опору та інші аналогічні властивості.

Коефіцієнт регулюючого ефекту навантаження по повній потужності визначається, як похідна виразу в формулі 3.6 за частотою в точці $\omega = \omega_0$.

$$k_{\text{н}} = \left. \frac{\partial S_{\text{н}}}{\partial \omega} \frac{\omega_0}{S_{\text{н}0}} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{S_1 + 2S_2 + \dots + nS_n}{S + S_1 + S_2 + \dots + S_n}. \quad (3.6)$$

Значення k_H може значно змінюватись протягом доби через зміни в характері навантаження та залежності напруги від частоти. Розрахунок величини складний навіть у випадку відомого характеру навантаження, оскільки потрібно визначити відношення $\frac{\partial U}{\partial \omega}$. Тому значну увагу приділяють експериментальному визначенню k_H .

Згідно з [96] для енергосистеми невеликої потужності до 100 МВт приймається значення $k_H = 2,0$.

Для оцінки ефективності поставки та споживання електроенергії вводиться коефіцієнт ефективності, який визначається за формулою

$$C_{\text{еф}} = \frac{W_{\text{с.е}}}{W_{\text{п.е}} + W_{\text{б}} + (W_{\text{б}} \cdot C)}, \quad (3.7)$$

де $W_{\text{с.е}}$ – об'єм споживаної електроенергії на прийнятому інтервалі часу;

$W_{\text{п.е}}$ – об'єм електроенергії, що постачається електропередавальною організацією;

$W_{\text{б}}$ – об'єм електроенергії, який береться в борг за банківською системою у іншої електропередавальної організації;

C – відсоток, який вводиться за користування електроенергією.

Частинні критерії C_n , C_f , $C_{\text{еф}}$ відносяться до однієї групи, що виражають ефективність поставки електроенергії, тому для таких критеріїв виконується згортка в узагальнений критерій за методом ідеальної точки.

Метод ідеальної точки застосовується у задачах багатокритеріальної оптимізації. Він ґрунтується на припущенні про існування ідеальної точки, у якій досягають екстремумів всі критерії [96 – 98].

Однак ідеальна точка зазвичай не знаходиться, тому потрібно визначити наближену до неї точку з множини припустимих рішень. Для цього визначаються координати ідеальної точки та її метрика, яка дозволяє визначити відстань до оптимальної точки [99, 100]. Координати ідеальної точки визначаються шляхом

вирішення однокритеріальних задач за кожним з критеріїв оптимізації. Якщо ідеальна точка належить до множини припустимих рішень, то задача вважається вирішеною.

У цьому випадку відстань до ідеальної точки визначається через розв'язання однокритеріальної задачі та визначення точки з числа припустимих, що найближча до ідеальної.

Загальний критерій ефективності експлуатації електропостачання формується на основі частинних критеріїв C_n , C_f , $C_{\text{сф}}$ за методом ідеальної точки

$$C_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - C_{\text{ид},i})^2}, i = \overline{1, n}, \quad (3.8)$$

де C_i - значення частинних критеріїв;

$C_{\text{ид},i}$ - значення частинних критеріїв в ідеальній точці – фіктивній точці в n -вимірному просторі, в якій значення частинних критеріїв досягають екстремуму (у даному випадку мінімуму).

3.2 Метод розрахунку ефективності електропостачання поставки та споживання електроенергії

Для визначення часткових критеріїв, які згадуються у формулах (3.1 – 3.3), аналізується добовий графік постачання та споживання повної електричної енергії, який зображений на рисунку 3.1.

Добовий графік постачання та споживання повної електричної енергії розбивається на три інтервали за часом, а саме:

- інтервал I з 7.00 до 11.00;
- інтервал II з 11.00 до 13.00;
- інтервал III з 13.00 до 18.00.

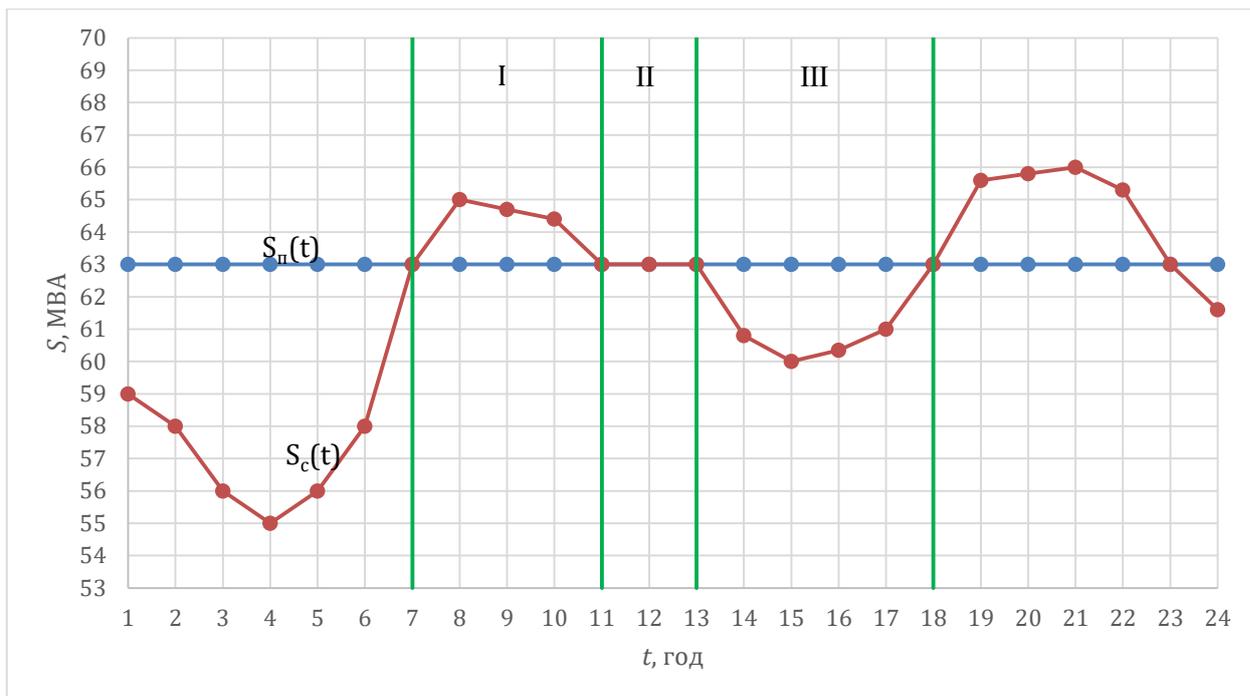


Рис. 3.1. Добовий графік постачання та споживання повної електричної енергії

Розрахунок частинних показників на інтервалі I. Згідно з графіком на рисунку 3.1 (інтервал I), кількість спожитої електроенергії перевищує обсяг, що постачається. Це призводить до дефіциту електроенергії для споживача, що свідчить про неефективне постачання електроенергії.

1) Показник об'єму поставки електроенергії визначається за формулою (3.1).

Об'єм електроенергії, що постачається знаходиться за формулою

$$W_{п.е}^I = S_{п.е}^I (t_{11} - t_7), \text{ MVA} \cdot \text{год.} \quad (3.9)$$

Об'єм споживаної електроенергії розраховується за формулою

$$W_{с.е}^I = \sum_{i=7}^{11} \left(\frac{S_{с.е.i}^I + S_{с.е.i+1}^I}{2} (t_{i+1} - t_i) \right), \text{ MVA} \cdot \text{год.} \quad (3.10)$$

2) Показник якості поставки електроенергії розраховується за формулою (3.2), згідно з якою знаходиться відношення фактичного значення частоти до нормованого.

3) Показник ефективності поставки електроенергії визначається за формулою (3.7).

Об'єм електроенергії, що постачається розраховується за формулою (3.9)

Об'єм споживаної електроенергії розраховується за формулою (3.10)

Об'єм електроенергії, який позичається, визначається так:

$$W_{\sigma}^I = W_{c.e}^I - W_{п.е}^I \text{ МВА} \cdot \text{год.} \quad (3.11)$$

Відсоток (С), який вводиться за позичення електроенергії вводиться за тарифами електропередавальної організації, що дає в борг певний об'єм електроенергії.

Розрахунок частинних показників на інтервалі II. На інтервалі II кількість електроенергії, що постачається, рівна кількості електроенергії, що споживається. Цей сценарій є оптимальним з точки зору ефективності експлуатації електропостачання.

1) Показник об'єму поставки електроенергії розраховується за формулою (3.1).

Об'єми електроенергії, що постачається та споживається, знаходяться за формулою

$$W_{п.е}^{II} = W_{c.e}^{II} = S_{п.е}^{II} (t_{13} - t_{11}), \text{ МВА} \cdot \text{год.} \quad (3.12)$$

2) Показник якості поставки електроенергії розраховується за формулою (3.2), згідно з якою знаходиться відношення фактичного значення частоти до нормованого.

3) Показник ефективності поставки об'єму електроенергії визначається за формулою (3.7).

Об'єми електроенергії, що постачається та споживається, знаходяться за формулою (3.12).

Оскільки у другому інтервалі обсяг спожитої електроенергії дорівнює обсягу, який може передати електропередавальна організація, не потрібно брати електроенергію в борг.

Розрахунок частинних показників на інтервалі III. Згідно з графіком на рисунку 1 (інтервал III) об'єм електроенергії, що постачається перевищує об'єм електроенергії, який споживається.

Так як споживач не використовує в повному обсязі поставлений йому об'єм електроенергії, утворюється надлишок, який характеризує неефективне постачання.

1) Показник об'єму поставки електроенергії визначається за формулою (3.1).

Об'єм електроенергії, що постачається знаходиться за формулою

$$V_{п.е}^{III} = S_{п.е}^{III} (t_{18} - t_{13}), \text{ МВА} \cdot \text{год.} \quad (3.13)$$

Об'єм споживаної електроенергії розраховується так:

$$V_{с.е}^{III} = \sum_{i=13}^{18} \left(\frac{S_{с.е.i}^{III} + S_{с.е.i+1}^{III}}{2} (t_{i+1} - t_i) \right), \text{ МВА} \cdot \text{год.} \quad (3.14)$$

2) Показник якості поставки електроенергії розраховується за формулою (3.2), згідно з якою знаходиться відношення фактичного значення частоти до нормованого.

3) Показник ефективності поставки об'єму електроенергії визначається за формулою (3.7).

Об'єм електроенергії, що постачається, знаходиться за формулою (3.13).

Об'єм споживаної електроенергії розраховується за формулою (3.14).

3.3 Розрахунок ефективності експлуатації електроенергії

Ефективність постачання електроенергії оцінюється за узагальненим критерієм ефективності електропостачання (C_r). Для визначення C_r необхідно розрахувати частині критерії (C_{Π} , C_f , $C_{\text{сф}}$), на основі яких виконується згортка в C_r .

Приклад розрахунку узагальненого критерія C_r розглядається на основі вихідних даних з рисунку 3.1.

Згідно з графіком добового постачання та споживання електроенергії на рисунку 1 повна потужність, яку постачає електропередавальна організація протягом доби складає $S_{\Pi} = 63$ МВА.

Для інтервала I об'єм електроенергії, що постачається становить $W_{\Pi.е}^I = 252$ МВА·год. Об'єм споживаної електроенергії $W_{\text{с.е}}^I$ становить 257,162 МВА·год. Ймовірність безвідмовної роботи вузла енергосистеми P_m становить 0,946. Тоді, за формулою (3.1) показник об'єму поставки електроенергії становить $C_{\Pi} = 0,965$.

Для визначення показника якості поставки електроенергії (C_f) розраховується фактичне значення частоти за формулою (3.3), яке складає $\omega_{\text{ф}} = 48,968$ Гц.

Показник якості поставки електроенергії за формулою (3.2) складає $C_f = 0,979$.

Показник ефективності енергопостачання з урахуванням банківського відсотку 10 % та кількістю електроенергії, що береться в борг, 5,162 МВА·год за формулою (3.7) складає $C_{\text{сф}} = 0,978$.

Загальний показник ефективності електропостачання на інтервалі I за формулою (3.8) становить $C_r = 0,078$.

Результати розрахунків узагальненого показника ефективності поставки електроенергії на інтервалах I – III наводяться в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати розрахунків ефективності експлуатації електроенергії

| Розрахункові значення | Інтервали | | |
|--------------------------|-----------|-------|---------|
| | I | II | III |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| $S_{Г}$, МВА | 63 | 63 | 63 |
| $S_{сп}$, МВА | 65 | 63 | 60 |
| $W_{п.е}$ МВА·год | 252 | 126 | 315 |
| $W_{с.е}$ МВА·год | 257,162 | 126 | 304,588 |
| $\omega_{ф}$, Гц | 48,968 | 50 | 51,429 |
| $\omega_{н}$, Гц | 50 | 50 | 50 |
| W_{δ} МВА·год | 5,162 | 0 | 0 |
| $C_{п}$, в. о. | 0,965 | 0,946 | 0,915 |
| C_{f} , в. о. | 0,979 | 1 | 1,029 |
| $C_{еф}$, в. о. | 0,978 | 1 | 0,967 |
| C_{r} , в. о. | 0,078 | 0,054 | 0,147 |

На інтервалі I показник об'єму поставки електроенергії $C_{п} = 0,965$, $W_{п.е} < W_{с.е}$, тобто об'єм електроенергії, що споживається перевищує об'єм електроенергії, який постачається. Це свідчить про неефективне постачання електроенергії.

Показник якості поставки електроенергії C_{f} складає 0,979, що свідчить про відхилення частоти від нормованої (50 Гц) на 2,1 %.

Показник ефективності поставки та споживання електроенергії, що складає 0,978, показує неефективність поставки, так як $W_{п.е} < W_{с.е}$, то виникає необхідність брати електроенергію в борг у іншої електропередавальної організації за банківської системою під відсоток. Брак об'єму електричної енергії становить $W_{\delta} = 5,162$ МВА·год.

На інтервалі II розглянуто ідеальний випадок поставки та споживання електричної енергії, так як $W_{п.е} = W_{с.е}$, звідси частинний показник об'єму поставки електроенергії $C_{п}$ складає 0,946.

Показник якості поставки електроенергії дорівнює 1, тобто $\omega_{ф} = \omega_{н} = 50$ Гц. Це свідчить про те, що не має відхилень напруги і електроенергія постачається та споживається за однаковою частотою.

Показник ефективності поставки та споживання електроенергії дорівнює 1 та вказує на те, що поставка та споживання електроенергії є максимально ефективною.

На інтервалі III показник об'єму поставки електроенергії $C_{п} = 0,915$ при $W_{п.е} > W_{с.е}$ свідчить про неефективне постачання електроенергії.

Показник якості поставки електроенергії, який складає 1,029 свідчить про відхилення частоти від нормованої (50 Гц) на 2,9%.

Показник ефективності поставки та споживання електроенергії $C_{еф} = 0,967$ показує, що поставка та споживання електроенергії є неефективним, так як утворюється надлишок електроенергії, який не споживається у розмірі 10,412 МВА.

За формулами (3.1), (3.2), (3.7), (3.8) для добового графіка, представленого на рисунку 3.1 розраховується погодинні показники об'єму поставки електроенергії, якості поставки електроенергії, ефективності поставки електроенергії та узагальнений показник ефективності експлуатації.

Результати погодинного розрахунку наводяться в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Результати розрахунків погодинної ефективності експлуатації енергосистеми

| Розрахункові значення | | S_T | $S_{сп}$ | $W_{п.е}$ | $W_{с.е}$ | $\omega_{ф}$ | $\omega_{н}$ | $W_{б}$ | $C_{п}$ | C_f | $C_{эф}$ | C_r |
|-----------------------|----|-------|----------|-----------|-----------|--------------|--------------|---------|---------|-------|----------|-------|
| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Години | 1 | 63 | 59 | 63 | 59,5 | 51,87 | 50 | 0 | 0,893 | 1,037 | 0,944 | 0,2 |
| | 2 | 63 | 58 | 63 | 58,5 | 52,3 | 50 | 0 | 0,878 | 1,046 | 0,929 | 0,239 |
| | 3 | 63 | 56 | 63 | 57 | 53,11 | 50 | 0 | 0,856 | 1,062 | 0,905 | 0,301 |
| | 4 | 63 | 55 | 63 | 55,5 | 53,49 | 50 | 0 | 0,833 | 1,07 | 0,881 | 0,356 |
| | 5 | 63 | 56 | 63 | 55,5 | 53,11 | 50 | 0 | 0,833 | 1,062 | 0,881 | 0,348 |
| | 6 | 63 | 58 | 63 | 57 | 52,3 | 50 | 0 | 0,856 | 1,046 | 0,905 | 0,285 |
| | 7 | 63 | 63 | 63 | 60,1 | 50 | 50 | 0 | 0,902 | 1 | 0,954 | 0,144 |
| | 8 | 63 | 65 | 63 | 64 | 48,97 | 50 | 1 | 0,961 | 0,979 | 0,983 | 0,077 |
| | 9 | 63 | 64,7 | 63 | 64,9 | 49,13 | 50 | 1,9 | 0,975 | 0,983 | 0,969 | 0,073 |
| | 10 | 63 | 64,4 | 63 | 64,6 | 49,28 | 50 | 1,6 | 0,97 | 0,986 | 0,973 | 0,071 |
| | 11 | 63 | 63 | 63 | 63,7 | 50 | 50 | 0,7 | 0,957 | 1 | 0,988 | 0,055 |
| | 12 | 63 | 63 | 63 | 63 | 50 | 50 | 0 | 0,946 | 1 | 1 | 0,054 |
| | 13 | 63 | 63 | 63 | 63 | 50 | 50 | 0 | 0,946 | 1 | 1 | 0,054 |
| | 14 | 63 | 60,8 | 63 | 61,6 | 51,06 | 50 | 0 | 0,925 | 1,021 | 0,978 | 0,118 |
| | 15 | 63 | 60 | 63 | 60,4 | 51,43 | 50 | 0 | 0,907 | 1,029 | 0,959 | 0,163 |
| | 16 | 63 | 60,35 | 63 | 60,2 | 51,27 | 50 | 0 | 0,904 | 1,025 | 0,956 | 0,165 |
| | 17 | 63 | 61 | 63 | 60,7 | 50,97 | 50 | 0 | 0,911 | 1,019 | 0,963 | 0,145 |
| | 18 | 63 | 63 | 63 | 62 | 50 | 50 | 0 | 0,931 | 1 | 0,984 | 0,085 |
| | 19 | 63 | 65,6 | 63 | 64,6 | 48,65 | 50 | 1,6 | 0,97 | 0,973 | 0,973 | 0,084 |
| | 20 | 63 | 65,8 | 63 | 65,7 | 48,54 | 50 | 2,7 | 0,987 | 0,971 | 0,957 | 0,085 |
| | 21 | 63 | 66 | 63 | 65,9 | 48,43 | 50 | 2,9 | 0,99 | 0,969 | 0,954 | 0,087 |
| | 22 | 63 | 65,3 | 63 | 65,6 | 48,81 | 50 | 2,6 | 0,985 | 0,976 | 0,958 | 0,081 |
| | 23 | 63 | 63 | 63 | 64,1 | 50 | 50 | 1,1 | 0,963 | 1 | 0,981 | 0,056 |
| | 24 | 63 | 61,6 | 63 | 62,3 | 50,68 | 50 | 0 | 0,935 | 1,014 | 0,989 | 0,09 |

На рисунку 3.2 наводиться графік погодинної зміни узагальненого показника ефективності експлуатації енергосистеми.

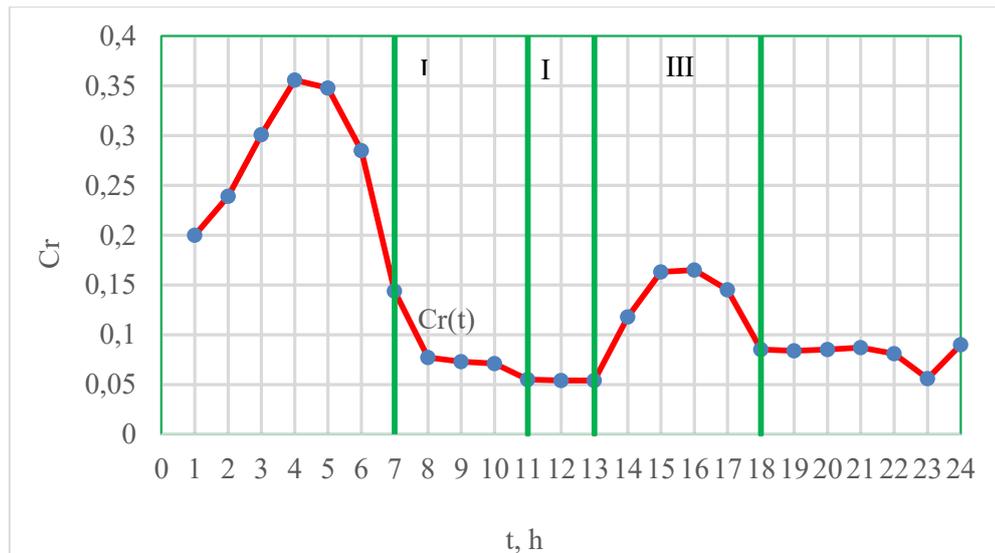


Рис. 3.2. Графік погодинної зміни узагальненого показника ефективності експлуатації енергосистеми

На рисунку 3.3 наводиться приклад добового графіка постачання та споживання повної електричної енергії для випадка, коли протягом доби об'єм електроенергії, що споживається перевищує об'єм електроенергії, що постачається.

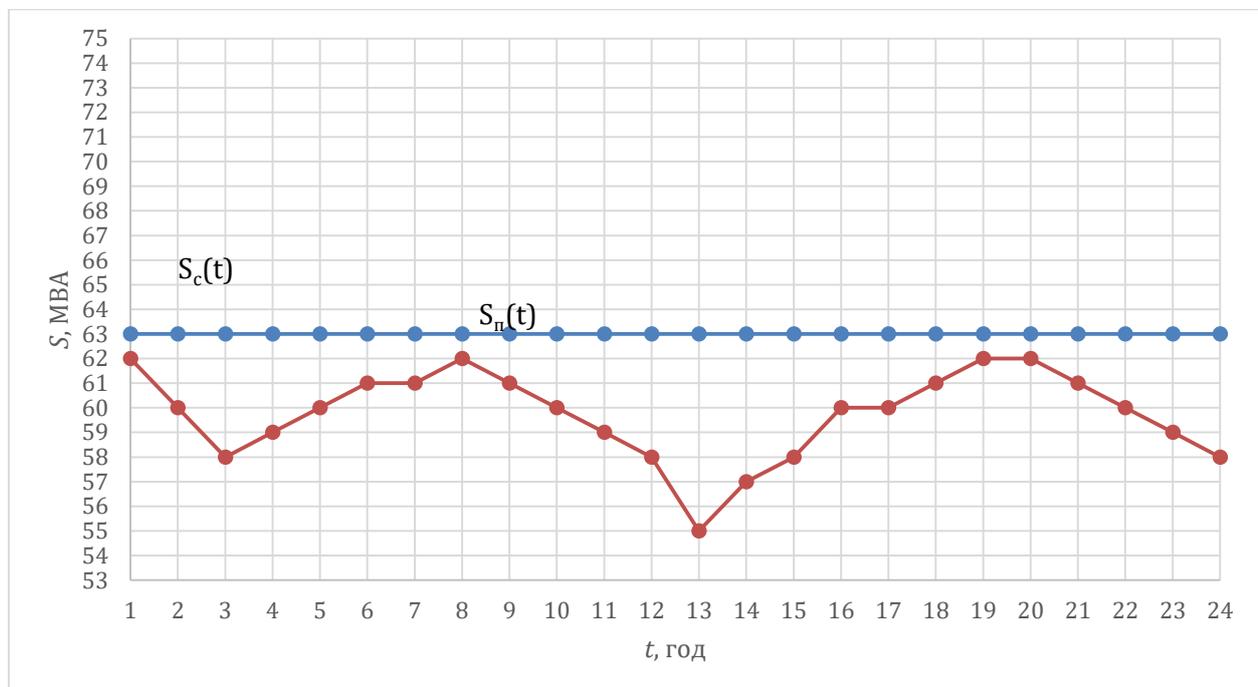


Рис. 3.3. Приклад добового графіка постачання та споживання повної електричної енергії

Згідно з графіком на рисунку 3.3, кількість спожитої електроенергії перевищує обсяг електроенергії, що постачається. Це призводить до дефіциту електроенергії для споживача та виникає необхідність брати електроенергію в борг у іншої електропередавальної організації за банківської системою під відсоток, що свідчить про неефективне постачання елеткроенергії.

За формулами (3.1), (3.2), (3.7), (3.8) для добового графіка, представленого на рисунку 3.3 розраховується погодинні показники об'єму поставки електроенергії, якості поставки електроенергії, ефективності поставки електроенергії та узагальнений показник ефективності експлуатації.

Результати погодинного розрахунку наводяться в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Результати розрахунків погодинної ефективності експлуатації енергосистеми

| Розрахункові значення | S_{Γ} | $S_{\text{сп}}$ | $W_{\text{п.е}}$ | $W_{\text{с.е}}$ | ω_{ϕ} | $\omega_{\text{н}}$ | $V_{\text{б}}$ | $C_{\text{п}}$ | C_f | $C_{\text{еф}}$ | C_r | |
|-----------------------|--------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|---------------------|----------------|----------------|-------|-----------------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| Години | 1 | 63 | 66 | 63 | 65,5 | 48,429 | 50 | 2,5 | 0,984 | 0,969 | 0,96 | 0,087 |
| | 2 | 63 | 65 | 63 | 64,5 | 48,968 | 50 | 1,5 | 0,969 | 0,979 | 0,975 | 0,077 |
| | 3 | 63 | 64 | 63 | 64,5 | 49,492 | 50 | 1,5 | 0,969 | 0,99 | 0,975 | 0,066 |
| | 4 | 63 | 65 | 63 | 65,5 | 48,968 | 50 | 2,5 | 0,984 | 0,979 | 0,96 | 0,077 |
| | 5 | 63 | 66 | 63 | 67 | 48,429 | 50 | 4 | 1,006 | 0,969 | 0,938 | 0,099 |
| | 6 | 63 | 68 | 63 | 69 | 47,302 | 50 | 6 | 1,036 | 0,946 | 0,913 | 0,177 |
| | 7 | 63 | 70 | 63 | 71 | 46,111 | 50 | 8 | 1,066 | 0,922 | 0,89 | 0,254 |
| | 8 | 63 | 72 | 63 | 72,5 | 44,857 | 50 | 9,5 | 1,089 | 0,897 | 0,874 | 0,318 |
| | 9 | 63 | 73 | 63 | 71,5 | 44,206 | 50 | 8,5 | 1,074 | 0,884 | 0,884 | 0,306 |
| | 10 | 63 | 70 | 63 | 69 | 46,111 | 50 | 6 | 1,036 | 0,922 | 0,913 | 0,201 |
| | 11 | 63 | 68 | 63 | 67 | 47,302 | 50 | 4 | 1,006 | 0,946 | 0,938 | 0,122 |
| | 12 | 63 | 66 | 63 | 65,5 | 48,429 | 50 | 2,5 | 0,984 | 0,969 | 0,96 | 0,087 |
| | 13 | 63 | 65 | 63 | 64,5 | 48,968 | 50 | 1,5 | 0,969 | 0,979 | 0,975 | 0,077 |

Продовження таблиці 3.3

| Розрахункові значення | S_r | $S_{сп}$ | $W_{п.е}$ | $W_{с.е}$ | $\omega_{ф}$ | $\omega_{н}$ | $V_б$ | $C_{п}$ | C_f | $C_{эф}$ | C_r | |
|-----------------------|-------|----------|-----------|-----------|--------------|--------------|-------|---------|-------|----------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| Години | 14 | 63 | 64 | 63 | 64 | 49,492 | 50 | 1 | 0,961 | 0,99 | 0,983 | 0,066 |
| | 15 | 63 | 64 | 63 | 64,5 | 49,492 | 50 | 1,5 | 0,969 | 0,99 | 0,975 | 0,066 |
| | 16 | 63 | 65 | 63 | 66 | 48,968 | 50 | 3 | 0,991 | 0,979 | 0,952 | 0,078 |
| | 17 | 63 | 67 | 63 | 67,5 | 47,873 | 50 | 4,5 | 1,014 | 0,957 | 0,932 | 0,125 |
| | 18 | 63 | 68 | 63 | 69 | 47,302 | 50 | 6 | 1,036 | 0,946 | 0,913 | 0,177 |
| | 19 | 63 | 70 | 63 | 71 | 46,111 | 50 | 8 | 1,066 | 0,922 | 0,89 | 0,254 |
| | 20 | 63 | 72 | 63 | 70,5 | 44,857 | 50 | 7,5 | 1,059 | 0,897 | 0,895 | 0,267 |
| | 21 | 63 | 69 | 63 | 68 | 46,714 | 50 | 5 | 1,021 | 0,934 | 0,925 | 0,162 |
| | 22 | 63 | 67 | 63 | 66 | 47,873 | 50 | 3 | 0,991 | 0,957 | 0,952 | 0,1 |
| | 23 | 63 | 65 | 63 | 64,5 | 48,968 | 50 | 1,5 | 0,969 | 0,979 | 0,975 | 0,077 |
| | 24 | 63 | 64 | 63 | 65 | 49,492 | 50 | 2 | 0,976 | 0,99 | 0,967 | 0,067 |

На рисунку 3.4 наводиться графік погодинної зміни узагальненого показника ефективності експлуатації енергосистеми для данного випадку.

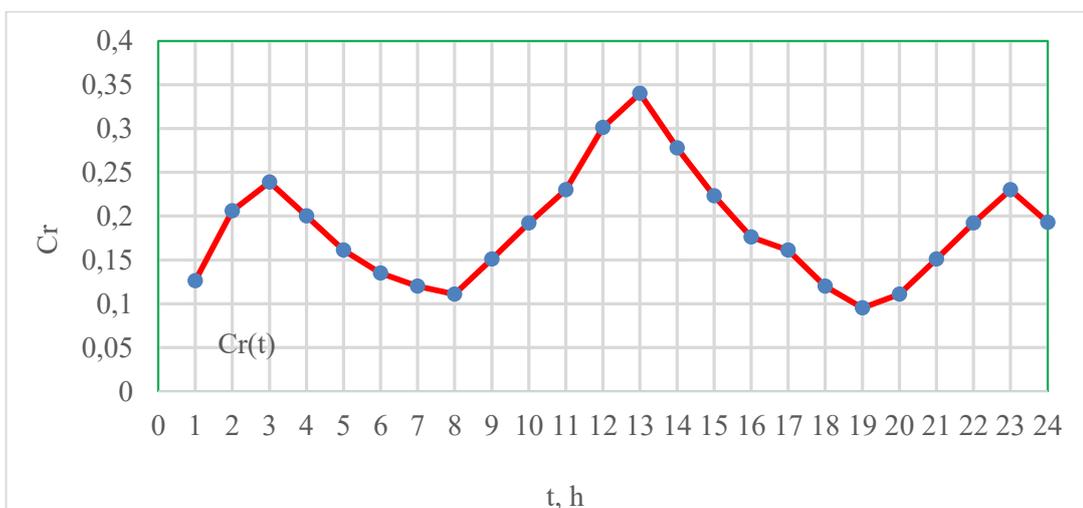


Рис. 3.4. Графік погодинної зміни узагальненого показника ефективності експлуатації енергосистеми

На рисунку 3.5 наводиться приклад добового графіка постачання та споживання повної електричної енергії для випадка, коли протягом доби об'єм електроенергії, що постачається перевищує об'єм електроенергії, що споживається.

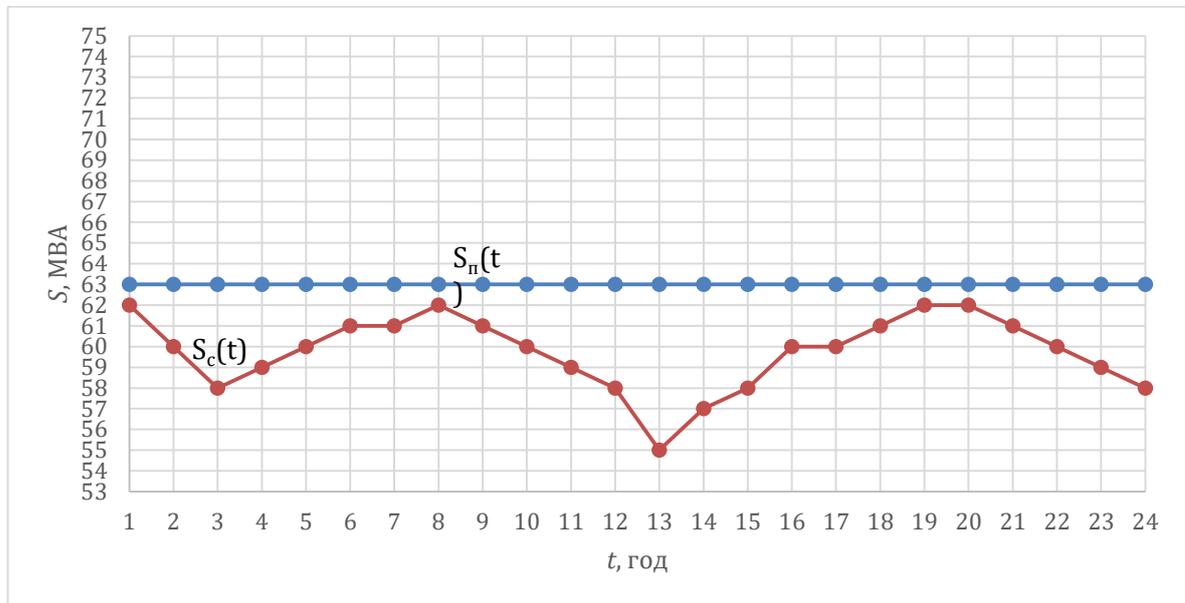


Рис. 3.5. Приклад добового графіка постачання та споживання повної електричної енергії

Згідно з графіком на рисунку 3.5 поставка та споживання електроенергії є неефективним, так як утворюється надлишок електроенергії, який не споживається.

За формулами (3.1), (3.2), (3.7), (3.8) для добового графіка, представленого на рисунку 3.5 розраховується погодинні показники об'єму поставки електроенергії, якості поставки електроенергії, ефективності поставки електроенергії та узагальнений показник ефективності експлуатації.

Результати погодинного розрахунку наводяться в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Результати розрахунків погодинної ефективності експлуатації енергосистеми

| Розрахункові значення | | S_T | $S_{сп}$ | $W_{п.е}$ | $W_{с.е}$ | $\omega_{ф}$ | $\omega_{н}$ | $V_б$ | $C_{п,}$ | $C_f,$ | $C_{эф}$ | C_r |
|-----------------------|----|-------|----------|-----------|-----------|--------------|--------------|-------|----------|--------|----------|-------|
| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Години | 1 | 63 | 62 | 63 | 61 | 50,492 | 50 | 0 | 0,916 | 1,01 | 0,968 | 0,126 |
| | 2 | 63 | 60 | 63 | 59 | 51,429 | 50 | 0 | 0,886 | 1,029 | 0,937 | 0,206 |
| | 3 | 63 | 58 | 63 | 58,5 | 52,302 | 50 | 0 | 0,878 | 1,046 | 0,929 | 0,239 |
| | 4 | 63 | 59 | 63 | 59,5 | 51,873 | 50 | 0 | 0,893 | 1,037 | 0,944 | 0,2 |
| | 5 | 63 | 60 | 63 | 60,5 | 51,429 | 50 | 0 | 0,908 | 1,029 | 0,96 | 0,161 |
| | 6 | 63 | 61 | 63 | 61 | 50,968 | 50 | 0 | 0,916 | 1,019 | 0,968 | 0,135 |
| | 7 | 63 | 61 | 63 | 61,5 | 50,968 | 50 | 0 | 0,923 | 1,019 | 0,976 | 0,12 |
| | 8 | 63 | 62 | 63 | 61,5 | 50,492 | 50 | 0 | 0,923 | 1,01 | 0,976 | 0,111 |
| | 9 | 63 | 61 | 63 | 60,5 | 50,968 | 50 | 0 | 0,908 | 1,019 | 0,96 | 0,151 |
| | 10 | 63 | 60 | 63 | 59,5 | 51,429 | 50 | 0 | 0,893 | 1,029 | 0,944 | 0,192 |
| | 11 | 63 | 59 | 63 | 58,5 | 51,873 | 50 | 0 | 0,878 | 1,037 | 0,929 | 0,23 |
| | 12 | 63 | 58 | 63 | 56,5 | 52,302 | 50 | 0 | 0,848 | 1,046 | 0,897 | 0,301 |
| | 13 | 63 | 55 | 63 | 56 | 53,492 | 50 | 0 | 0,841 | 1,07 | 0,889 | 0,34 |
| | 14 | 63 | 57 | 63 | 57,5 | 52,714 | 50 | 0 | 0,863 | 1,054 | 0,913 | 0,278 |
| | 15 | 63 | 58 | 63 | 59 | 52,302 | 50 | 0 | 0,886 | 1,046 | 0,937 | 0,223 |
| | 16 | 63 | 60 | 63 | 60 | 51,429 | 50 | 0 | 0,901 | 1,029 | 0,952 | 0,176 |
| | 17 | 63 | 60 | 63 | 60,5 | 51,429 | 50 | 0 | 0,908 | 1,029 | 0,96 | 0,161 |
| | 18 | 63 | 61 | 63 | 61,5 | 50,968 | 50 | 0 | 0,923 | 1,019 | 0,976 | 0,12 |
| | 19 | 63 | 62 | 63 | 62 | 50,492 | 50 | 0 | 0,931 | 1,01 | 0,984 | 0,095 |
| | 20 | 63 | 62 | 63 | 61,5 | 50,492 | 50 | 0 | 0,923 | 1,01 | 0,976 | 0,111 |
| | 21 | 63 | 61 | 63 | 60,5 | 50,968 | 50 | 0 | 0,908 | 1,019 | 0,96 | 0,151 |
| | 22 | 63 | 60 | 63 | 59,5 | 51,429 | 50 | 0 | 0,893 | 1,029 | 0,944 | 0,192 |
| | 23 | 63 | 59 | 63 | 58,5 | 51,873 | 50 | 0 | 0,878 | 1,037 | 0,929 | 0,23 |
| | 24 | 63 | 58 | 63 | 60 | 52,302 | 50 | 0 | 0,901 | 1,046 | 0,952 | 0,193 |

На рисунку 3.6 наводиться графік погодинної зміни узагальненого показника ефективності експлуатації енергосистеми для данного випадку.

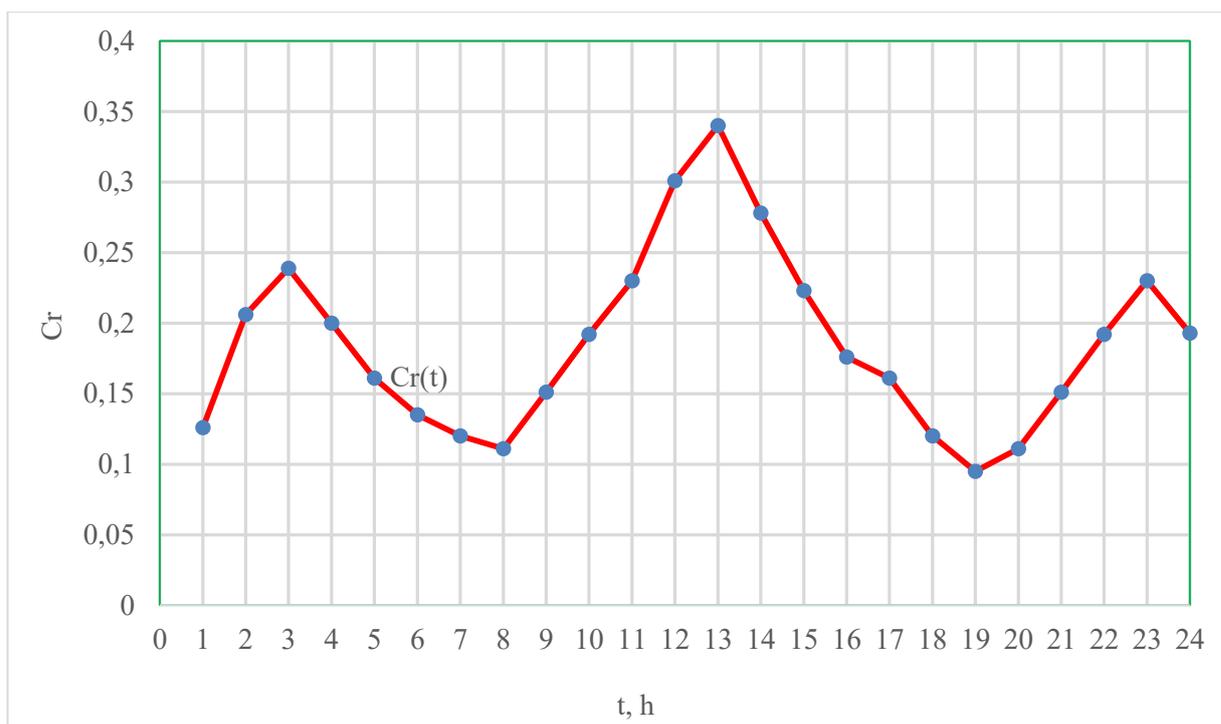


Рис. 3.6. Графік погодинної зміни узагальненого показника ефективності експлуатації енергосистеми

На основі проведеного дослідження в рамках третього розділу дисертаційної роботи було отримано подальший розвиток метод оцінки ефективності експлуатації енергосистеми, в основу якого покладено об'єми поставки та споживання електроенергії. Було додано можливість врахування об'ємів електроенергії, які необхідно додатково залучити за аналогом кредитної банківської системи у іншої енергопередавальної організації для забезпечення потреб споживача. Крім того додатково введено узагальнений показник згортки окремих критеріїв, а саме обсягу, якості та ефективності поставки електроенергії, що дало можливість в умовах споживчого управління отримати інтегральний показник для виявлення споживачем ефективної поставки серед можливих альтернатив.

3.4 Висновки до розділу

1. Для оцінки ефективності постачання та споживання електроенергії розроблено модель і метод оцінки ефективності електропостачання, що дає можливість оцінити

ефективність експлуатації енергосистеми одним показником, який ґрунтується на згортці окремих показників різного роду походження у загальний показник.

В якості окремих показників постачання та споживання електроенергії запропоновані наступні: показник об'єму постачання та споживання електроенергії, показник якості постачання та споживання електроенергії та показник ефективності постачання та споживання електроенергії.

2. Порівнюючи традиційний метод визначення ефективності поставки електроенергії з методом, який пропонується в роботі, можна зробити висновок, що в деяких випадках отримані дані неадекватні. Так, наприклад на інтервалі I (рисунок 3.1), ефективність поставки електроенергії за традиційним методом складає $C_{\text{ef}} = 1,13 > 1$, тому неможливо адекватно оцінити цей показник, а за запропонованим методом, коли необхідна електроенергія береться в борг за банківською системою на цьому ж інтервалі ефективність складає $C_{\text{ef}} = 0,978$, що дає можливість адекватно оцінити отримані результати.

3. При розрахунку критерія об'єму поставки електроенергії, було помічено вагомий вплив показника ймовірності безвідмовної роботи мережі, яка визначається по статистичним даним раптових та постійних відмов елементів електроенергетичної системи.

Для збільшення ймовірності безвідмовної роботи мережі необхідно передбачити ряд заходів щодо мінімізації раптових та постійних відмов таких, як завчасно виконувати технічне обслуговування електроустановок та ліквідувати аварійні режими роботи.

РОЗДІЛ 4

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ЄДИНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ТА МЕТОД АНАЛІЗУ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПРИ ЙМОВІРНОСНИХ СЦЕНАРІЯХ ЗБУРЕНЬ

Для розв'язання четвертої задачі дисертаційного дослідження, а саме розробки стохастичної моделі єдиної енергосистеми та методу аналізу працездатності енергосистеми, який дозволяє оцінити її стани під час різних умов експлуатації, враховуючи випадкові збурення, необхідно визначити причини появи випадкових збурень в єдиній енергосистемі, розробити стохастичну модель єдиної енергосистеми та розробити метод аналізу працездатності створеної стохастичної моделі, який включає в себе алгоритм зчитування вихідних даних, алгоритм пошуку шляху в ярусному графі енергосистеми та оцінку її працездатності.

Поняття працездатності функціонування застосовується до систем, для яких неможливо сформулювати критерій відмови у формі «все або нічого». Серед таких систем є й електроенергетична.

На сучасному етапі розвитку електроенергетики, окрім удосконалення технологій, стає все важливішими питання раціональної організації експлуатації та працездатності електроенергетичних систем. Це пояснюється швидким старінням об'єктів електроенергетики, таких як електростанції та електричні мережі; зростанням навантажень або генерації енергії; підвищенням вимог до екологічної безпеки об'єктів електроенергетики; високою щільністю розподільчих мереж різних рівнів напруги; об'єднанням електричних мереж у єдині національні енергосистеми; впровадженням ринкових відносин і лібералізацією в галузі електроенергетики; прагненням використовувати найбільш економічні джерела електроенергії; збільшенням використання відновлюваних джерел енергії; та великими системними аваріями [101-105].

У зв'язку з надлишковістю електроенергії, відмова деяких (іноді навіть багатьох) елементів призводить лише до часткової деградації функціональних

можливостей електроенергетичної системи. Показник працездатності функціонування визначається здатністю енергосистемою виконувати свої основні функції з пониженим рівнем продуктивності та ефективності. Це виражається у погіршенні працездатності електропостачання, збільшенні технологічних втрат електроенергії та погіршенні її якості.

Перехід від державної до приватної власності на ринку електричної енергії призвів до зміни відносин, що зробив акцент на збільшенні відповідальності за невиконання умов договорів з електропостачання [106].

Для ЕЕС важливо забезпечувати надійне функціонування навіть у випадку різних внутрішніх та зовнішніх перешкод, які можуть призвести до послідовного розвитку аварій [107]. Це ставить під сумнів життєздатність системи, тобто її здатність залишатися працездатною після появи збурень, що можуть мати серйозні наслідки. Можливі наслідки непрацездатності настільки значні, що потрібне постійне вдосконалення методів прогнозування розвитку, проектування, будівництва, монтажу, експлуатації та діагностики електроенергетичних систем. Це дозволить максимально враховувати працездатність і ефективно використовувати призначені на це ресурси.

4.1 Аналіз випадкових та запланованих збурень

Збуренням у контексті ЕЕС можна розуміти будь-яке непередбачене або негативне події чи стани, які можуть впливати на нормальне функціонування системи. Це може включати в себе широкий спектр ситуацій, наприклад як відмови устаткування.

Збурення може мати різний ступінь впливу на систему, від локальних проблем до системних аварій, що призводять до великих перебоїв у постачанні електроенергії. Важливо розрізнити між випадковими збуреннями, які виникають в результаті природних чи технічних обставин, та цілеспрямованими атаками чи діями, спрямованими на штучне спричинення проблем у роботі системи.

Управління збуреннями в енергосистемах включає в себе розробку стратегій та технологій для прогнозування, запобігання, виявлення та відновлення від них, з метою забезпечення стабільності та надійності роботи системи.

До випадкових збурень можна віднести наступні:

- відключення електроенергії через надзвичайні обставини;
- технічні несправності та випадкові відмови;
- втрати зв'язку або кібератаки;
- нестабільність в постачанні палива;
- перепади навантаження.

Відключення електроенергії через надзвичайні обставини означає втрату електричної енергії через виняткові події, які перевищують звичайні стандарти або очікувані ризики. Це може бути викликано різними факторами, такими як природні катастрофи, що включають землетруси, повені, урагани та сніжні бурі.

Сильні землетруси можуть призвести до руйнування електромереж та обладнання електростанцій через пошкодження мачт, проводів, трансформаторів та інших інфраструктурних елементів.

Повені можуть затопити електромережі та електростанції, що призводить до короткого замикання та відключення електропостачання в постраждалих районах.

Сильні вітри та інтенсивний сніг можуть призвести до обриву ліній електропередачі, пошкодження опор та ізоляторів, що призводить до відключення електропостачання.

Технічні несправності та випадкові відмови у енергосистемах виникають через різноманітні причини, які можуть бути пов'язані з непередбаченими дефектами в обладнанні, відмовою електрообладнання або системними помилками, що включають в себе виробничі дефекти, неякісні матеріали або недоліки у конструкції обладнання. Наприклад, несправності у трансформаторах, розподільних пристроях або генераторах можуть призвести до відмов та відключень. Також електрообладнання може відмовити через фізичне зношення, перевищення ресурсу експлуатації, неправильне використання або недостатнє технічне обслуговування.

Наприклад, перегрів проводів, коротке замикання у високовольтних лініях можуть спричинити відмови у роботі системи.

Системні помилки можуть включати в себе програмні помилки у системах керування, мережеві проблеми або неправильне налаштування обладнання. Наприклад, помилки в програмному забезпеченні автоматизованих систем керування можуть призвести до непередбачених відмов або неправильних дій.

Втрати зв'язку або кібератаки можуть значно ускладнити роботу електроенергетичних систем та створити серйозні проблеми для їх нормального функціонування.

Випадкові втрати зв'язку можуть виникнути внаслідок різних причин, таких як технічні проблеми, природні катастрофи або випадкові пошкодження інфраструктури зв'язку. У разі втрати зв'язку оператори електромереж можуть втратити здатність ефективно керувати та моніторити стан електромережі. Це може призвести до затримок у виявленні та вирішенні проблем, а також збільшити ризик виникнення аварійних ситуацій.

Кібератаки представляють серйозну загрозу для електроенергетичних систем, оскільки можуть спричинити непередбачені перешкоди у їх роботі. Це може включати в себе вторгнення в системи керування, зміну налаштувань, видалення даних, відмову в обслуговуванні та інші шкідливі дії. Кібератаки можуть призвести до відключення електропостачання, перешкоджати нормальному функціонуванню систем керування та моніторингу, а також створювати загрозу для безпеки та конфіденційності даних.

Нестабільність в постачанні палива є серйозною загрозою для нормальної роботи електростанцій та, відповідно, для працездатності електроенергетичної системи в цілому.

Істотна частина електроенергетичної потужності зазвичай виробляється на теплових електростанціях, які працюють на вугіллі, газі або нафті. Якщо постачання цих видів палива стає нестабільним, електростанції можуть зазнавати недостачі палива. Це може призвести до зниження їх потужності, оскільки вони не можуть

працювати на повну потужність без відповідного палива. Зменшення виробництва електроенергії може вплинути на стабільність енергопостачання та призвести до проблем з напругою в мережах.

У випадку довготривалої нестачі палива електростанції можуть бути тимчасово відключені. Це може відбутися як запобіжний захід, щоб уникнути серйозних пошкоджень обладнання або аварійних ситуацій, які можуть виникнути через роботу на мінімальних ресурсах. Тимчасове відключення електростанцій може призвести до стресу для електроенергетичної системи, особливо якщо це відбувається в періоди пікового навантаження або погодних умов, коли попит на електроенергію є найвищим.

Перепади навантаження в ЕЕС становлять значну загрозу для їх стабільності та працездатності. Погодні умови, такі як спека або холод, можуть призводити до раптових змін у споживанні електроенергії. Наприклад, влітку під час спеки підвищується використання кондиціонерів та вентиляторів, що може призвести до значного збільшення навантаження на електромережі. Ці навантаження можуть перевищувати максимальні показники, для яких були розраховані мережі.

Якщо електромережі не здатні витримати такі різкі зміни у споживанні електроенергії, це може призвести до перенавантаження мереж. Перенавантаження може бути особливо небезпечним у великих містах або індустріальних районах, де попит на електроенергію є високим. Це може призвести до перегрівання обладнання, коротких замикань, відключень електропостачання та навіть до аварій.

У разі неможливості впоратися з навантаженням, оператори електромереж можуть прийняти рішення про відключення частини мережі або навіть цілих районів. Це може бути необхідною заходом для запобігання серйозним аваріям та збереження працездатності електромереж.

Випадкові збурення можуть мати серйозні наслідки для ЕЕС, тому важливо вивчати їх вплив і розробляти стратегії для їх управління та мінімізації ризиків.

Збурення в ЕЕС можуть бути як випадковими, так і запланованими. Заплановані збурення спеціально організовуються для проведення ремонтних робіт, модернізації

обладнання, перевірки навантажувальних характеристик та інших технічних процедур.

Плановані відключення для технічного обслуговування є необхідною складовою процесу ефективного управління електроенергетичними системами. Вони дозволяють проводити ремонтні та профілактичні роботи, які забезпечують надійність та ефективність електроенергетичних систем.

Під час планованих відключень проводяться перевірка та обслуговування різних компонентів електрообладнання. Це включає в себе перевірку роботи вимикачів, контакторів, реле, захисних пристроїв, кабельних ліній тощо. Під час цих процедур можуть виявлятися потенційні проблеми та вирішуватися на ранніх стадіях, щоб уникнути серйозних аварій.

Трансформатори та генератори є ключовими складовими електроенергетичних систем. Під час планованих відключень проводиться технічне обслуговування цих пристроїв, включаючи перевірку ізоляції, вимірювання параметрів, очищення та змащення. Ці заходи допомагають підтримувати нормальну роботу трансформаторів та генераторів і попереджують їхню можливу відмову в майбутньому.

Випробування режимів роботи є важливою складовою процесу забезпечення надійності та ефективності електроенергетичних систем. Цей процес дозволяє перевірити реакцію системи на різні навантажувальні умови та непередбачені ситуації, що допомагає виявити потенційні проблеми та удосконалити захисні системи.

Під час випробувань може бути проведена симуляція відмов обладнання для перевірки реакції системи на такі ситуації. Це може включати відключення ключових елементів електроенергетичної системи, таких як генератори, трансформатори, лінії передачі тощо. Симулювання відмов допомагає визначити, як система реагує на такі непередбачені обставини та які заходи потрібно приймати для забезпечення безпеки та надійності роботи системи.

Випробування режимів роботи також включає перевірку дії захисних систем електроенергетичної системи. Це може охоплювати тестування роботи реле захисту,

автоматичних вимикачів, систем автоматизації та керування. Під час цих випробувань перевіряється реакція системи на різні внутрішні та зовнішні збурення, а також виявляються можливі проблеми або несправності в роботі захисних систем.

Під час випробувань може бути проведена перевірка реакції системи на різні навантажувальні умови. Це може включати збільшення або зменшення потужності, перевірку стабільності напруги та частоти, оцінку ефективності роботи системи при різних навантаженнях.

Переведення обладнання в резервний режим є важливим етапом у забезпеченні надійності та безперебійності роботи електроенергетичних систем. Цей процес може бути запланованим для проведення технічного обслуговування, ремонту, або модернізації системи.

Періодичне технічне обслуговування є ключовим для забезпечення нормальної роботи електроенергетичних систем. Під час обслуговування можуть проводитися ремонтні роботи, заміна зношених частин, перевірка та налаштування обладнання. Переведення обладнання в резервний режим дозволяє забезпечити безпечний доступ до обладнання для обслуговування без впливу на постачання електроенергії.

Іноді система потребує модернізації для підвищення ефективності, надійності або відповідності новим технологічним вимогам. Переведення обладнання в резервний режим може бути необхідним для встановлення нового обладнання або модифікації існуючого.

Переведення обладнання в резервний режим забезпечує безпеку робітників, які проводять технічне обслуговування або ремонтні роботи. Це також дозволяє уникнути виникнення аварійних ситуацій та забезпечує надійність постачання електроенергії для споживачів.

Переведення обладнання в резервний режим дозволяє здійснити планування та організацію робіт з технічного обслуговування чи модернізації системи. Це дозволяє мінімізувати час відключення електроенергії та підтримувати безперебійність постачання електроенергії для споживачів.

Перевірка роботи аварійних систем є важливою складовою процесу забезпечення безпеки та надійності електроенергетичних систем. Аварійні системи призначені для реагування на надзвичайні ситуації і запобігання серйозним аваріям чи пошкодженням обладнання.

Під час планованих відключень можуть бути проведені тести, щоб перевірити реакцію аварійних систем на симулювання надзвичайних ситуацій. Це може включати активацію автоматичних вимикачів, систем автоматизованого управління, а також перевірку роботи захисних пристроїв і систем аварійного відключення.

Під час перевірки роботи аварійних систем також проводиться оцінка їх відповідності стандартам безпеки та нормативним вимогам. Це допомагає переконатися, що аварійні системи працюють ефективно і надійно в умовах, коли вони найбільше потрібні.

Під час тестування аварійних систем можуть виявлятися потенційні проблеми або несправності в їх роботі. Це дозволяє вчасно вжити заходів для усунення таких проблем і підвищити рівень безпеки та надійності системи.

Проведення перевірки роботи аварійних систем також дозволяє підготувати персонал до дій у надзвичайних ситуаціях. Це може включати навчання персоналу процедурам евакуації, використання аварійних вимикачів та інших систем безпеки.

Заплановані збурення мають строго визначений графік і зазвичай повідомляються споживачам заздалегідь. Це дозволяє зменшити негативний вплив на користувачів електроенергії та забезпечити безперебійну роботу системи в майбутньому.

4.2 Стохастична модель енергосистеми

Використання методів моделювання стає викликом при побудові інформаційних та імітаційних моделей з великою кількістю вузлів. Така складність може призвести до ускладнення аналізу та взаємодії між компонентами системи.

Однак, розроблення імітаційної моделі електроенергетичної структури країни за допомогою теорії графів стає наочним та ефективним підходом для подальших аналізів різних показників експлуатації електроенергетичного комплексу.

Представимо імітаційну модель електроенергетичної системи як дискретну структуру у вигляді ярусного графу.

Крок 1. Ініціалізація моделі. Для цього проводиться зчитування даних з вихідного джерела – файлу з описом трансформаторів, підстанцій, генерації та ліній електропередач.

Після зчитування даних потрібно створити граф $G = (V, E)$. Граф складається з вершин (V) та ребер (E). У цьому випадку вершинами будуть трансформатори підстанцій та генерації, а ребра представлятимуть лінії електропередач між ними.

Для кожного трансформатора, підстанції та генерації створюється вершина у графі. Для кожної лінії електропередач створюється ребро між відповідними вершинами графа.

Після створення графа можна ініціалізувати з файлу вихідних даних додаткові параметри, такі як витрати передачі енергії по кожній лінії, потужність трансформаторів тощо.

Після цього модель готова до подальших обчислень або використання.

Крок 2. Імітація сценарію виходу з ладу об'єкта. Для кожного об'єкта імітаційної моделі $o \in (V, E)$ виконується функція розрахунку життів

$$lifes_o = function(0, lifesOrig_o), \quad (4.1)$$

де *function* – функція вибору розрахунку життів за кількістю випадкових випадів цього об'єкту із загальної множини o .

Крок 3. Розрахунок шляхів та аналіз. Проводиться пошук всіх можливих шляхів $P(v, z \text{ Енергооб'єктів})$ для кожної вершини $v \in V$ з типом "трансформатор" та напругою менше 150 кВ.

Далі проводиться аналіз всіх можливих шляхів P . Проводиться розрахунок втрат для кожного шляху $p \in P$:

$$losses_p = \sum lineLoses_l, \quad (4.2)$$

де $lineLoses_l$ - втрати на лінії l .

Крок 4. Збір статистики. Проводиться розрахунок статистичних показників:

- середніх втрат

$$avgLosses = (\sum losses_p) / |P|, \quad (4.3)$$

- кількості вузлів, які залишились без шляху

$$noPathCount = \sum [paths_v = \emptyset] \text{ для } v \in V. \quad (4.4)$$

Крок 5. Виведення результатів. Після збору статистичних показників проводиться виведення отриманих результатів.

Для цього визначається формат, у якому будуть представлені результати. Це може бути текстовий файл, CSV файл, база даних або будь-який інший формат, зручний для подальшого аналізу. Далі, на основі результатів розрахунків створюють структуру даних, яка буде містити інформацію про життєві цикли кожного об'єкту у графі. Після цього записуються отримані дані у визначений формат.

Крок 6. Очищення ресурсів. Проводиться видалення об'єктів та звільнення виділеної пам'яті для кожного об'єкта системи. Для цього проводиться видалення вершин та ребер графа, створених структур даних, тимчасових змінних та інших об'єктів, що були створені під час роботи програми.

Детальний програмний код наведено в додатку В.

Після видалення об'єктів виділена пам'ять для цих об'єктів вільна для подальшого використання. Якщо програма використовує зовнішні ресурси, такі як

файли або з'єднання з базою даних, то ці ресурси також очищаються і закриваються після завершення роботи програми.

4.3 Алгоритм зчитування вихідних файлів

Зчитування вихідних даних для ініціалізації моделі проводиться покроково за наступним алгоритмом:

Крок 1. Ініціалізація структури для зберігання даних. Проводиться створення порожніх векторів для кожного типу об'єктів електроенергетичної системи таких, як «генерація», «трансформатори», «трансформатори та генерація», «лінії», «енергооб'єкти».

Вектор «генерація» буде містити дані про всі електростанції, які генерують електроенергію у системі. Кожен елемент цього вектора може містити інформацію про потужність.

Вектор «трансформатори» буде містити дані про всі трансформатори у системі, які перетворюють напругу з одного рівня на інший. Кожен елемент вектора може містити дані про потужність, тип трансформатора, первинну та вторинну напруги навантаження, втрати та вартість втрат.

Вектор «лінії» буде містити дані про всі лінії, які забезпечують передачу електроенергії в системі. Кожен елемент цього вектора може містити інформацію про довжину, максимально допустимий струм, втрати, вартість 1 км лінії.

Вектор «енергооб'єкти» буде містить об'єкти, які можуть бути присутні у системі електропередачі, таких як підстанції, акумулятори енергії тощо. Цей вектор може містити різноманітну інформацію в залежності від конкретного типу об'єктів.

Крок 2. Зчитування даних з файлу вихідних даних вузлів «object.csv». Проводиться зчитування кожного рядка з файлу вихідних даних та розбір і обробка даних для кожного об'єкту, а саме: конвертація ідентифікатора об'єкта, видалення пробілів і символів, обробка назви об'єкта, конвертація інформації про кількість та

потужність трансформаторів, обчислення навантаження та обробка даних про втрати, конвертація напруги.

Крок 3. Створення об'єктів енергетичної системи. Проводиться розгалуження умов на основі зчитаних даних: якщо об'єкт є електростанцією (визначається за даними навантаження та відсутністю трансформаторів), створюється вектор «Генерація», якщо об'єкт є трансформатором (визначається за наявністю даних трансформатора або конкретними ідентифікаторами), створюється вектор «Трансформатор».

Далі проводиться додавання створених об'єктів до відповідних векторів.

Крок 4. Зчитування даних з файлу вихідних даних ребер «лінії.csv». Проводиться зчитування і обробка даних для кожної лінії електропередачі, а саме: конвертація ідентифікаторів з'єднань, дистанції, резервування, втрат на лінії та максимального допустимого струму.

Далі проводиться створення об'єктів «Лінія» на основі зчитаних даних. Якщо резервування відсутнє, створюється новий об'єкт «Лінія», інакше оновлюється остання лінія у векторі «лінії» та додається лінія до векторів «лінії» та «енергооб'єкти».

Крок 5. Формування результативної структури «Вихідні дані». Проводиться створення структури «вихідні дані» та заповнення її даними з векторів.

Крок 6. Повернення оброблених даних. Функція повертає структуру «Вихідні дані», яка містить всі зчитані та оброблені дані.

4.4 Алгоритм пошуку шляху до генерації в графі енергетичної структури

Цей алгоритм описує рекурсивний процес пошуку шляхів від заданого об'єкта «енергооб'єкт» до електростанцій, враховуючи поточний ланцюг об'єктів та їх властивості, такі як «життя» та напруга. У процесі рекурсії виключаються об'єкти з закінченим терміном «життя» та вже відвідані об'єкти, щоб уникнути зациклення та

неправильного повторення шляхів. Далі розглянемо детальніше алгоритм пошуку шляхів:

Крок 1. Проводиться ініціалізація списку «Шляхи». Якщо об'єкт «енергоОб'єкт.життя» ≤ 0 , то проводиться повернення функції «Шляхи» - порожній список шляхів.

Крок 2. Проводиться обхід з'єднань об'єктів «енергоОб'єкт». Для кожного з'єднання i у функції «енергоОб'єкт.з'єднання» проводиться приведення типу об'єкту до *Line* «лінія = енергоОб'єкт.з'єднання[i]». Якщо «лінія.життя» ≤ 0 , то дане з'єднання ігнорується.

Крок 3. Проводиться обхід з'єднань об'єктів «лінія». Для кожного з'єднання k у функції «лінія.з'єднання» проводиться перевірка: якщо «лінія.з'єднання[k] = енергоОб'єкт», то ігнорується зв'язок з самим собою.

Крок 4. Проводиться перевірка типу з'єднання. Якщо лінія.з'єднання[k].тип = 2 (Електростанція), то шлях = [енергоОб'єкт, лінія, лінія.з'єднання[k]]. Виконується додавання шляху за допомогою функції Шляхи.Додати шлях.

Якщо лінія.з'єднання[k].тип = 3 (Трансформатор), то проводиться приведення до типу «трансформатор» трансформатор = лінія.з'єднання[k].

Якщо «трансформатор.життя» ≤ 0 , то дане з'єднання ігнорується.

Крок 5. Проводиться перевірка історії шляху. Для цього об'єкту Об'єктІзІсторії = False, зЕнергоОб'єктів = зЕнергоОб'єктів.

Для кожного об'єкту j у «зЕнергоОб'єктів» перевіряється умова: якщо зЕнергоОб'єктів[j] = лінія.з'єднання[k], то Об'єктІзІсторії = Так.

Крок 6. Проводиться рекурсивний пошук шляху. Якщо лінія.з'єднання[k].напруга \geq енергоОб'єкт.напруга або лінія.з'єднання[k].напруга = -1 і Об'єктІзІсторії = Ні, то виконується функція зЕнергоОб'єктів.Додати енергоОб'єкт та можливіШляхи = wayToPP(лінія.з'єднання[k], зЕнергоОб'єктів).

Для кожного шляху j у можливіШляхи: можливийШлях = можливіШляхи[j], виконуються функції можливийШлях.Вставити_на_початок лінія та енергоОб'єкт.

Далі проводиться додавання до можливих шляхів за допомогою функції *Шляхи.Додати можливийШлях*.

Крок 7. Проводиться повернення результату за допомогою функції *Повернути.Шляхи*.

4.5 Метод аналізу працездатності електроенергетичної системи

Використання імітаційної моделі електроенергетичної структури у вигляді ярусного графу не лише забезпечує зручний інструментарій для оцінки працездатності цієї системи при різних режимах роботи, але й відкриває широкі можливості для детального аналізу взаємодії компонентів, ідентифікації потенційних слабких місць та розробки оптимальних стратегій управління, що забезпечує ефективну та надійну роботу електроенергетичної системи в умовах сучасного енергетичного ринку в умовах військового стану.

Розглянемо детальний опис методу аналізу працездатності електроенергетичної системи.

Крок 1. Відкриття файлу «output.txt» для подальшого запису результатів програми.

Крок 2. Зчитування даних з вихідних csv файлів. Проводиться зчитування даних про електроенергетичну структуру (генерація, трансформатори, лінії) та збереження в структурі «вихідні дані» за допомогою функції «зчитування вихідних даних».

Крок 3. Формування графа електроенергетичної системи. Проводиться ідентифікація кожного елемента графа (генерація, трансформатори, лінії). Якщо ідентифікатор лінії співпадає з ідентифікатором трансформатора або генерації, створюється з'єднання між ними.

Крок 4. Імітація різних сценаріїв виходу з ладу елементів графа. Проводиться різноманітна кількість ітерацій, що імітують вихід з ладу елементів, зменшуючи життя випадково вибраних елементів в системі на одиницю. На кожній ітерації відновлюється початковий стан життя елементів.

Крок 5. Пошук шляхів до генерації. Для кожного вузла графа з напругою споживача викликається функція «пошук шляхів» для знаходження всіх можливих шляхів від споживача до генерації. Далі проводиться вибір найкращого шляху на основі найменших втрат.

Крок 6. Розрахунок та збір статистики. Рахується кількість трансформаторів, для яких було знайдено шлях та для яких шлях не знайдено. Підраховуються загальні втрати системи та загальне навантаження. Проводиться підрахунок повної потужності генераторів системи, що залишились в робочому стані.

Крок 7. Виведення статистики. Для кожного сценарію виводяться дані: кількість знайдених шляхів, кількість випадків без шляху, загальна кількість оброблених трансформаторів, повне навантаження, повна потужність генераторів.

Крок 8. Завершення програми. Проводиться виведення результатів у файл та завершення роботи програми.

4.6 Результати дослідження імітаційного експерименту

Імітаційна модель ЕЕС в даному випадку є досить об'ємною і складною системою, яка включає в себе значну кількість вершин і ребер. Розглянемо детальніше склад та характеристики цієї моделі:

1. Кількість вершин: у моделі міститься 385 вершин. Ці вершини відображають різні об'єкти в електроенергетичній системі, такі як генератори, підстанції та споживачі.

2. Об'єкти генерації: імітаційна модель включає 29 об'єктів генерації, які можуть виробляти електроенергію.

3. Електричні підстанції з напругою 750 кВ – 9 об'єктів, 500 кВ – 3 об'єкта, 400 кВ – 1 об'єкт, 330 кВ – 89 об'єктів, 220 кВ – 35 об'єктів, 150 кВ та 110 кВ – 219 об'єкти. Напруга відображається як один з параметрів, що впливає на потік електроенергії та структуру передачі.

4. Ребра (лінії електропередачі): модель містить 626 ребер, які відображають лінії електропередачі. Ці ребра вказують на зв'язки між різними вершинами та визначають шляхи, по яких потік електроенергії прямує від генераторів до споживачів через різні електричні підстанції.

5. Електрична потужність, яка генерується складає 44514,7 МВт.

Ця імітаційна модель є потужним інструментом для аналізу та вдосконалення електроенергетичних систем. Вона дозволяє враховувати різні аспекти роботи системи, такі як потужність, напруга, витрати енергії та потенційні ризики в разі відмови окремих компонентів. Аналіз цієї моделі може допомогти в розробці ефективних стратегій управління енергетичними системами для забезпечення їх надійності та ефективності в умовах різних режимів роботи та експлуатації.

Для створеної імітаційної моделі електроенергетичної структури проводилися 100, 200 та 300 ітерацій, що імітують випадкові та заплановані збурення різних елементів моделі, а саме:

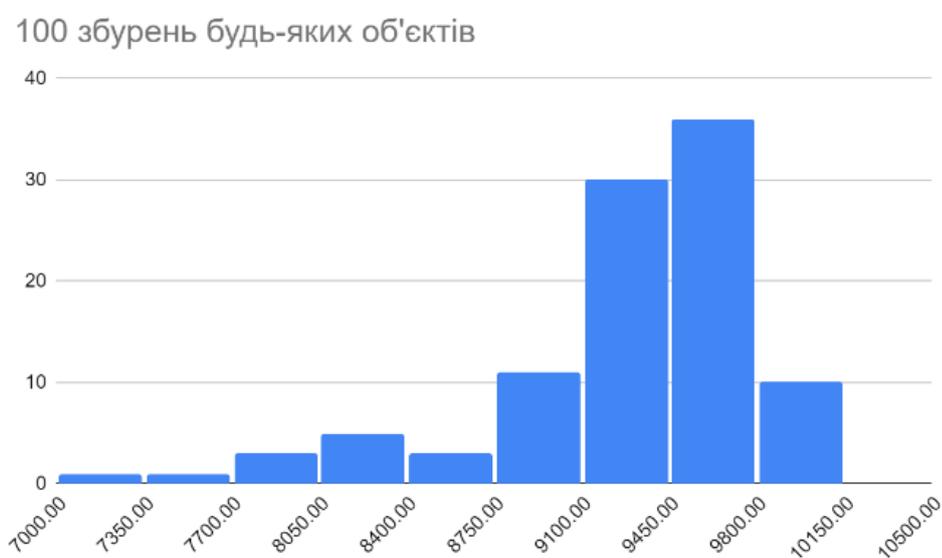
- імітація виходу з ладу будь-якого об'єкту моделі (генерація, електричні підстанції, споживачі);
- імітація виходу з ладу будь-якого об'єкту моделі, крім генерації;
- імітація виходу з ладу тільки ліній електропередачі;
- імітація виходу з ладу тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів;
- імітація виходу з ладу тільки трансформаторів електричних підстанцій;
- імітація виходу з ладу тільки трансформаторів споживачів.

Результати моделювання аналізу працездатності електроенергетичної системи при випадкових та запланованих збуреннях наведені на рисунках 4.1 – 4.6 у вигляді гістограм, які показують кількість електроенергії, що можливо передати від генерації до споживача та кількість можливих випадків передачі електроенергії при різних імітаціях виходу з ладу елементів.

На гістограмах видно, як змінюється ефективність передачі електроенергії в залежності від різних сценаріїв виходу з ладу окремих компонентів системи.

Випадкові та заплановані збурення можуть значно впливати на надійність та стабільність роботи системи, що підтверджується аналізом отриманих даних.

Дані графіки є важливим інструментом для розуміння впливу різних факторів на ефективність та надійність роботи електроенергетичних систем. Вони допомагають ідентифікувати слабкі місця в системі та розробляти стратегії їх підвищення надійності.



a)



б)

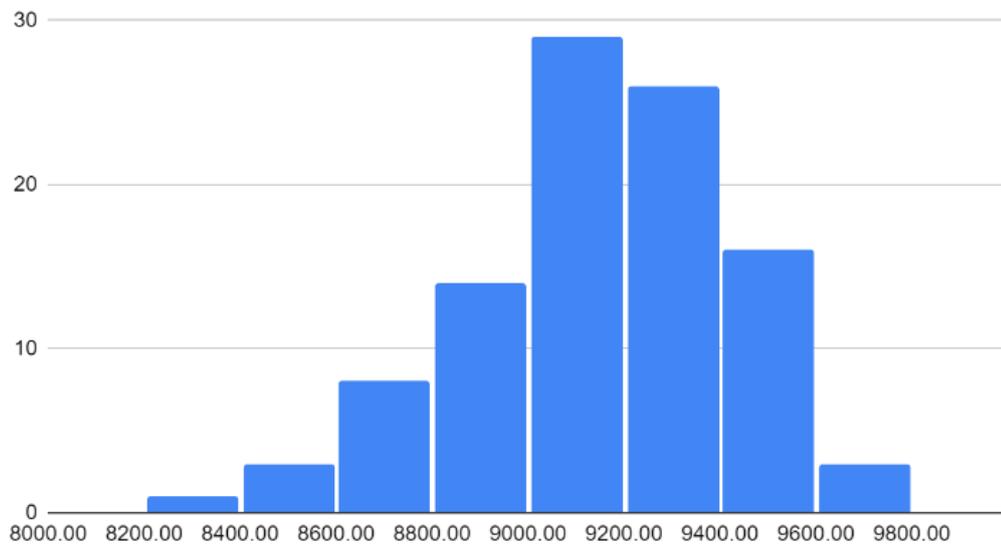


в)

Рис. 4.1. Результати аналізу працездатності при нанесенні 100 випадкових та запланованих збурень: а) будь-якого об'єкту моделі (генерація, електричні підстанції, споживачі); б) будь-якого об'єкту моделі, крім генерації; в) тільки ліній електропередачі

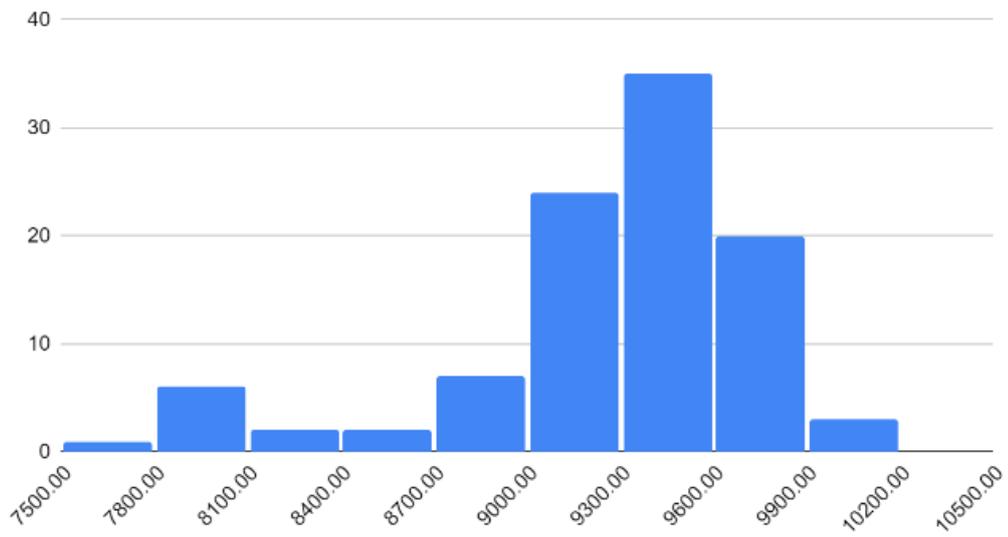
На рисунку 4.2 наводяться результати аналізу працездатності при нанесенні 100 випадкових та запланованих збурень тільки по трансформаторам споживачів, тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів та тільки трансформаторів електричних підстанцій.

100 збурень тільки по споживачам

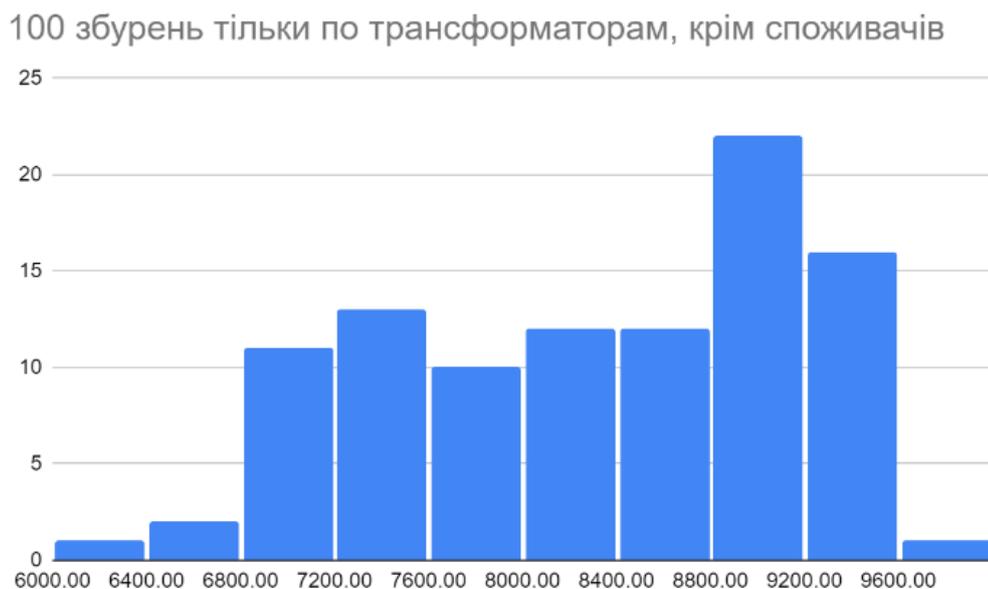


а)

100 збурень тільки по трансформаторам



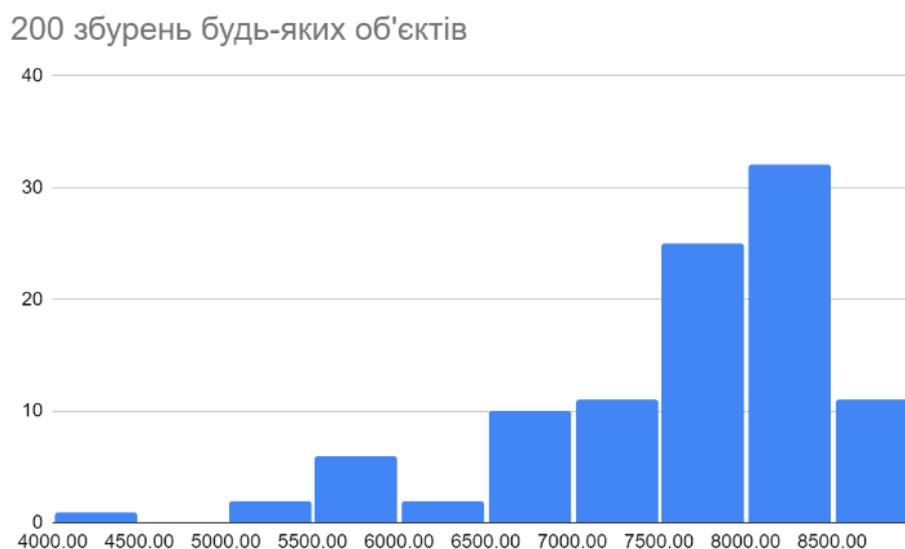
б)



в)

Рис. 4.2. Результати аналізу працездатності при нанесенні 100 випадкових та запланованих збурень: а) тільки трансформаторів споживачів; б) тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів; в) тільки трансформаторів електричних підстанцій

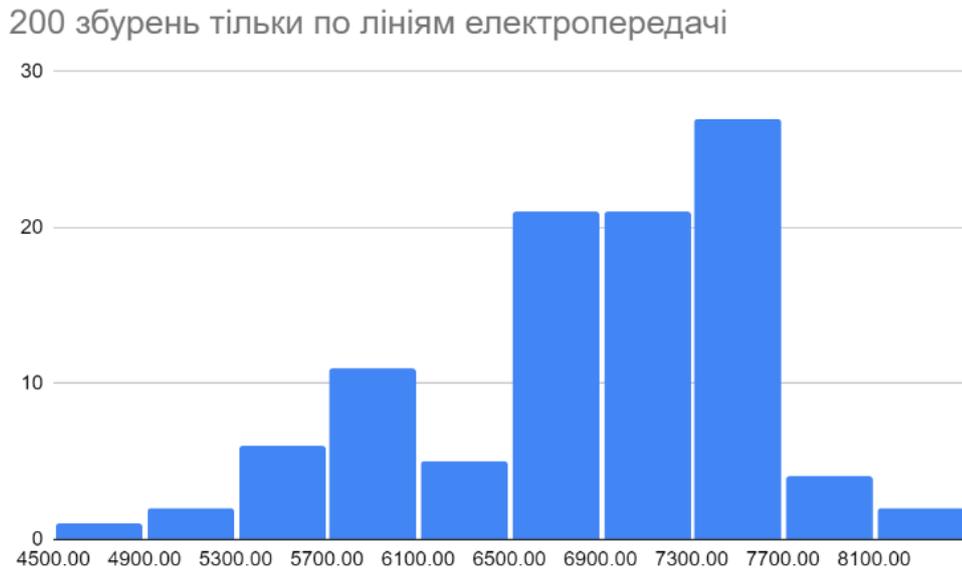
На рисунку 4.3 наводяться результати аналізу працездатності при нанесенні 200 випадкових та запланованих збурень будь-якого об'єкту моделі, будь-якого об'єкту моделі, крім генерації та тільки ліній електропередачі.



а)



б)



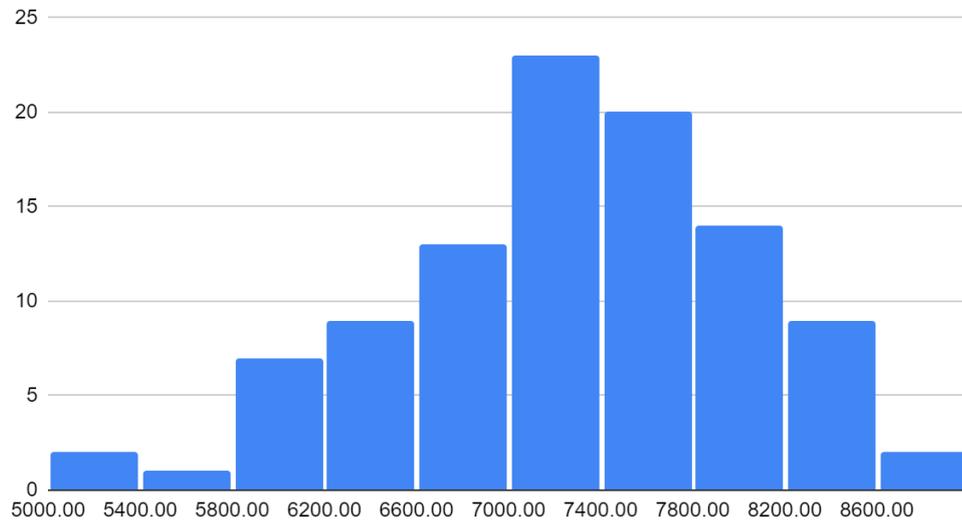
в)

Рис. 4.3. Результати аналізу працездатності при нанесенні 200 випадкових та запланованих збурень: а) будь-якого об'єкту моделі (генерація, електричні підстанції, споживачі); б) будь-якого об'єкту моделі, крім генерації; в) тільки ліній електропередачі

На рисунку 4.4 наводяться результати аналізу працездатності при нанесенні 200 випадкових та запланованих збурень тільки по трансформаторам споживачів, тільки

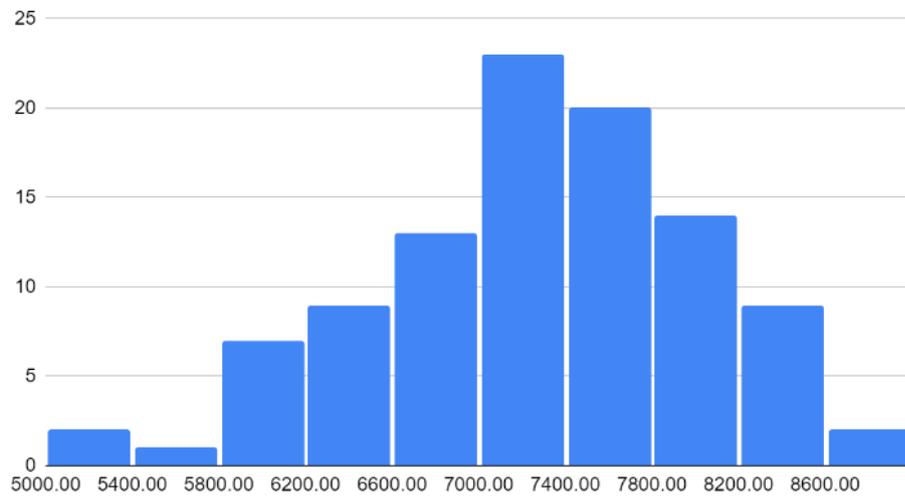
трансформаторів електричних підстанцій та споживачів та тільки трансформаторів електричних підстанцій.

200 збудень тільки по споживачам



а)

200 збудень тільки по трансформаторам



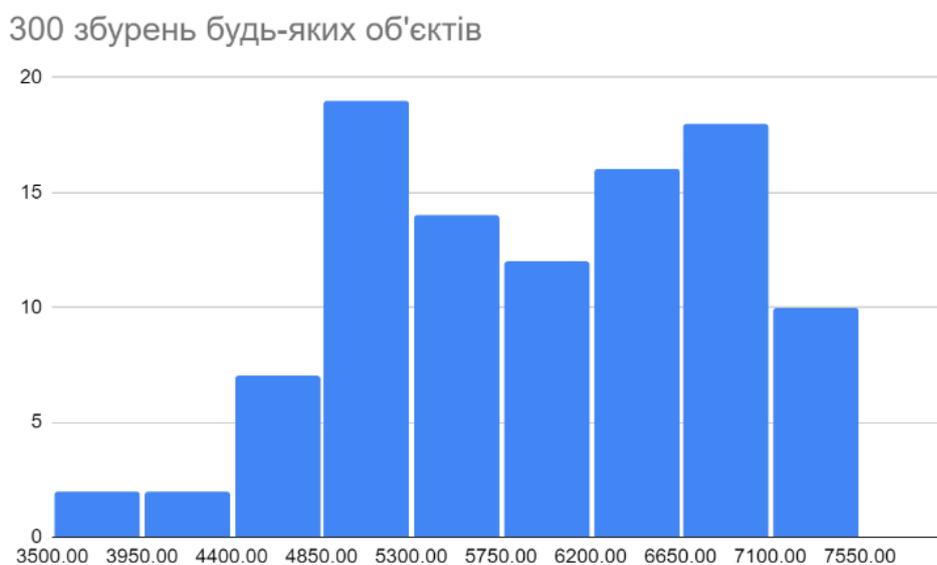
б)



в)

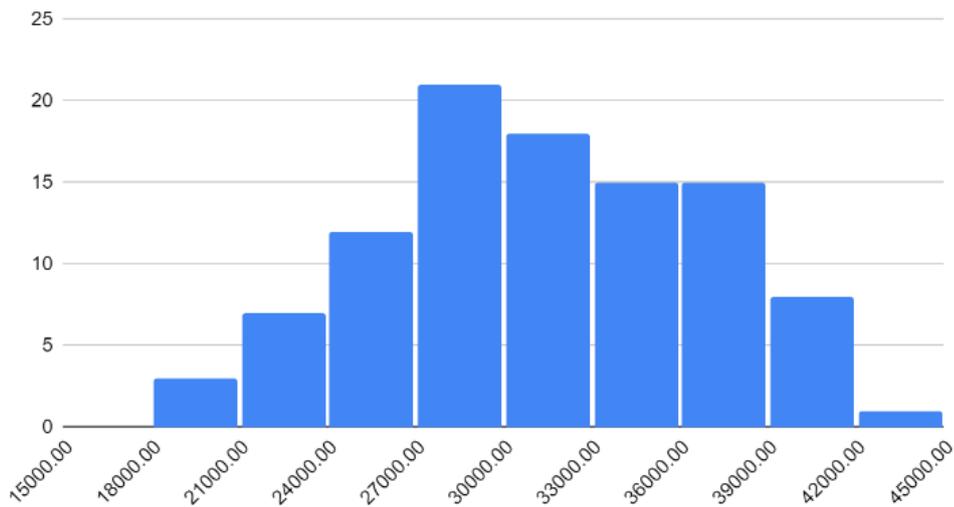
Рис. 4.4. Результати аналізу працездатності при нанесенні 200 випадкових та запланованих збурень: а) тільки трансформаторів споживачів; б) тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів; в) тільки трансформаторів електричних підстанцій

На рисунку 4.5 наводяться результати аналізу працездатності при нанесенні 300 випадкових та запланованих збурень будь-якого об'єкту моделі, будь-якого об'єкту моделі, крім генерації та тільки ліній електропередачі.



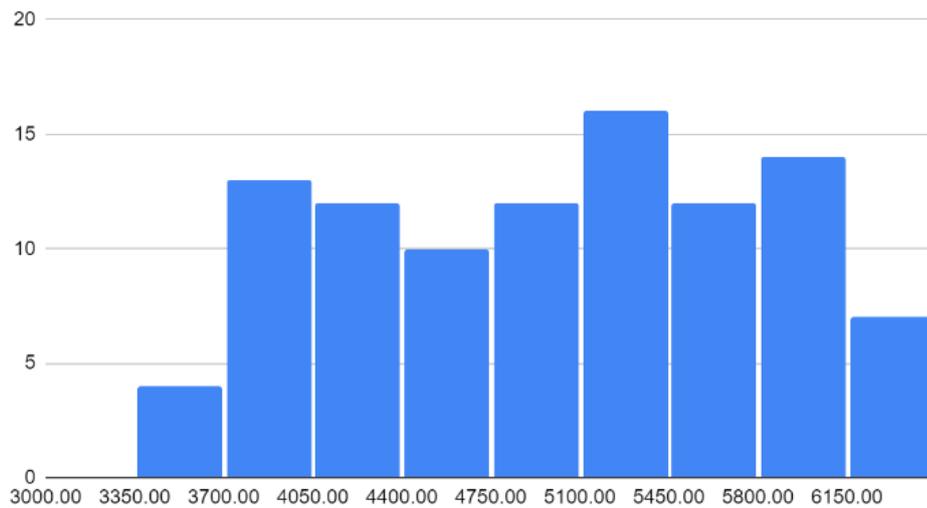
а)

300 збурень будь-яких об'єктів, крім генерації



б)

300 збурень тільки по лініям електропередачі



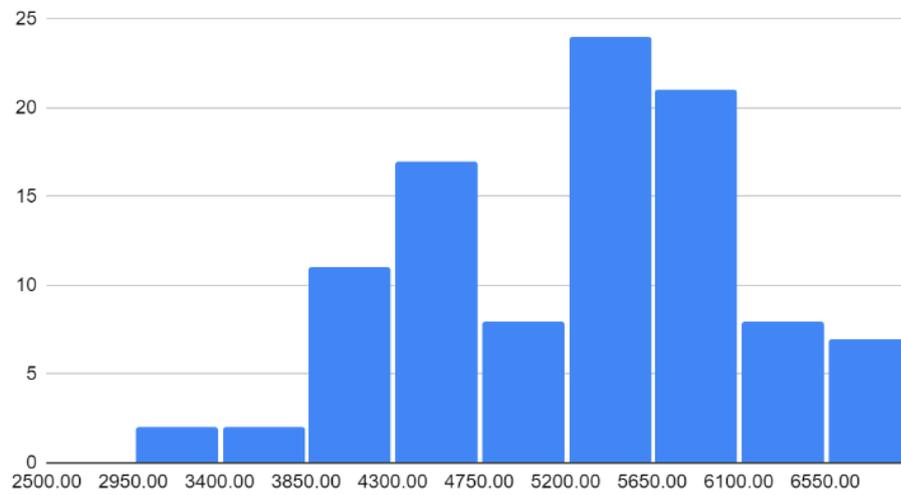
в)

Рис. 4.5. Результати аналізу працездатності при нанесенні 300 випадкових та запланованих збурень: а) будь-якого об'єкту моделі (генерація, електричні підстанції, споживачі); б) будь-якого об'єкту моделі, крім генерації; в) тільки ліній електропередачі

На рисунку 4.6 наводяться результати аналізу працездатності при нанесенні 300 випадкових та запланованих збурень тільки по трансформаторам споживачів,

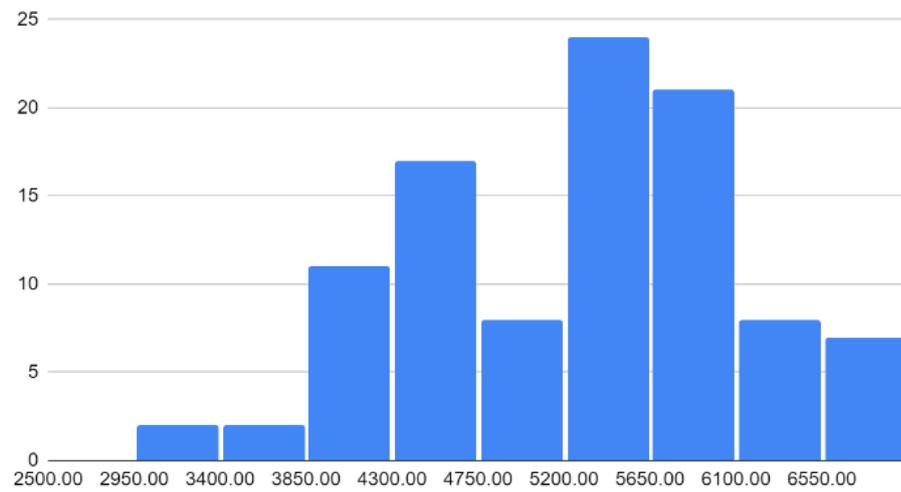
тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів та тільки трансформаторів електричних підстанцій.

300 збурень тільки по споживачам

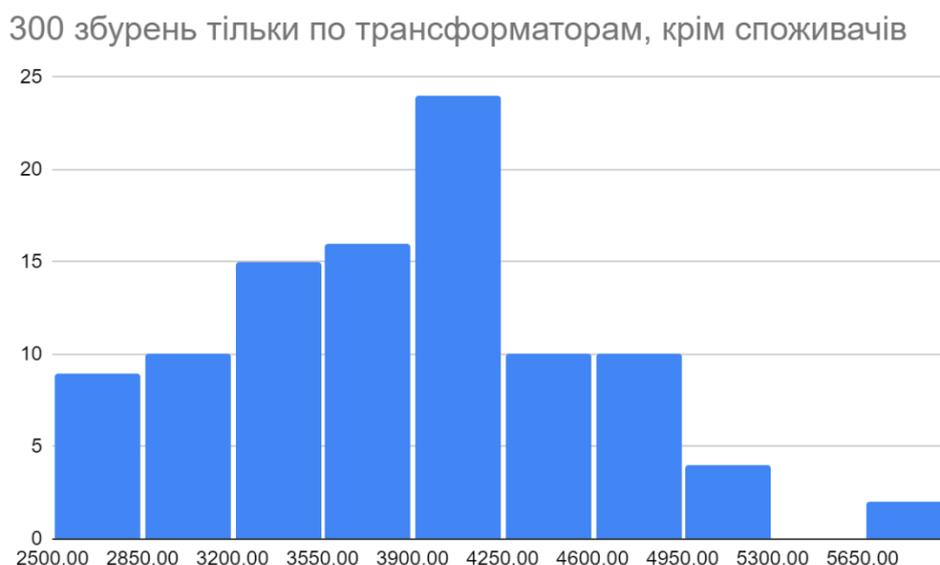


а)

300 збурень тільки по трансформаторам



б)



в)

Рис. 4.6. Результати аналізу працездатності при нанесенні 300 випадкових та запланованих збурень: а) тільки трансформаторів споживачів; б) тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів; в) тільки трансформаторів електричних підстанцій

З аналізу гістограм можна побачити, що несвоєчасний час проведення ремонтних робіт або невчасне застосування резервного забезпечення при збільшенні кількості випадкових або запланованих збурень призводить до різкого зменшення обсягу електроенергії, який надходить до споживачів.

Це вказує на погіршення працездатності всієї електроенергетичної системи, оскільки зниження обсягу електроенергії може призвести до перебоїв у постачанні електроенергії для споживачів, а також до подальших негативних наслідків для ефективності та стабільності роботи системи в цілому.

На основі проведеного дослідження в рамках четвертого розділу дисертаційної роботи запропоновано стохастичну модель ефективності та працездатності єдиної енергетичної системи, яка складається з її імітаційної моделі, поточного ланцюгу об'єктів перетворення та транспортування, моделі випадкових збурень, які змінюють властивості вузлів та ребер ярусного графу та методу оцінки її експлуатації за рахунок показників її ефективності та працездатності, методу рекурсивного процесу пошуку

шляхів отримання електроенергії від об'єкта споживача до устаткування електрогенерації. Такий підхід дав можливість аналізувати енергосистему для виявлення умов працездатності під час різних сценаріїв експлуатації, враховуючи потенційні виходи з ладу компонентів під час випадкових збурень, які приводять до руйнування обладнання.

Таким чином, в другому, третьому, четвертому розділі всі задачі дисертаційного дослідження розв'язані. Тому можна вважати, що мета дисертаційного дослідження досягнута.

4.7 Висновки до розділу

1. Ярусний граф може бути легко інтегрований з сучасними технологіями для забезпечення інтелектуального управління енергетичною системою.

Це включає в себе системи моніторингу, аналізу даних та автоматизацію. Гнучка структура ярусного графу може допомогти уникнути втрат енергії, оскільки вона дозволяє розміщувати виробничі установки ближче до споживачів, зменшуючи транспортні втрати.

2. Алгоритм зчитування даних для побудови імітаційної моделі забезпечує детальне зчитування та обробку даних із файлів, включаючи всі необхідні перетворення та конвертації для створення структурованого внутрішнього представлення енергетичної системи.

Він готує дані для подальших аналізів та обчислень у межах програми. Впровадження імітаційної моделі енергосистеми сприяє більш точному прогнозуванню та управлінню енергетичними ресурсами, підвищенню надійності системи та виявленню можливостей для покращень. Такий підхід дозволяє енергетичним компаніям та урядовим органам ефективно реагувати на зміни та забезпечувати працездатність електроенергетичної системи у різних умовах.

3. Метод аналізу працездатності енергетичної структури є важливим інструментом для забезпечення надійності та ефективності функціонування енергетичних систем у різних умовах.

Цей метод дозволяє не лише оцінити стан системи в реальному часі, але й прогнозувати її роботу в майбутньому, враховуючи потенційні виходи з ладу окремих компонентів.

4. Використання статистичного підходу у аналізі дає можливість об'єктивно оцінити ризики та ідентифікувати критичні елементи системи, які можуть впливати на її стабільність та надійність.

З цим розумінням фахівці можуть розробляти ефективні стратегії управління, спрямовані на запобігання можливих випадків відмов та забезпечення безперервного і найбільш оптимального постачання електроенергії для великого кола споживачів.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором нові науково обґрунтовані результати, що дозволили розробити метод аналізу ефективності експлуатації та працездатності єдиної енергосистеми за рахунок розробленої імітаційної моделі для визначення зміни властивостей поставки та споживання електроенергії. В основу моделі покладено згортку критеріїв аналізу запланованих та випадкових збурень, які роблять можливим руйнування окремих складових та вузлів. Таке руйнування зменшує працездатність єдиної енергосистеми.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз енергетичної системи України та провідних країн Європи на різних рівнях підпорядкування. Виявлено, що багато компонентів електричної мережі, такі як трансформатори, генератори, лінії передачі тощо, мають довгий термін служби, але з часом втрачають ефективність і можуть потребувати заміни або серйозного ремонту. Не всі елементи мережі регулярно обслуговуються, що може призводити до збоїв та аварій. Багато систем електропостачання використовують застаріле обладнання та технології, які не відповідають сучасним стандартам енергоефективності та безпеки.

Також було проаналізовано сучасний стан та можливості розвитку джерел розподіленої генерації в енергетичній системі України. Виявлено, що країна має серйозний дефіцит енергоносіїв, зокрема природного газу та вугілля, що обмежує розвиток традиційних джерел енергії та збільшує залежність від імпорту. Україна має лише обмежену кількість альтернативних джерел енергії, таких як вітроенергетика, сонячна енергія та біопаливо, через недостатню інфраструктуру та відсутність стимулюючих політик. Проте, країна має значний потенціал для розвитку розподіленої генерації електроенергії, зокрема за допомогою сонячних панелей, вітрових турбін, біогазових установок тощо, що може сприяти зменшенню залежності від традиційних джерел та покращенню енергетичної безпеки.

Були розглянуті актуальні моделі та підходи до оцінки енергетичних систем, а також сформульовані завдання для оцінки ефективності функціонування та працездатності систем електропостачання країн.

2. Проведено аналіз застосування графової теорії при моделюванні енергосистем. Вона дозволяє у вигляді вузлів та ребер представити складні структурні елементи системи такі, як генеруючі установки, електричні підстанції та лінії електропередач, у вигляді імітаційних моделей, які можуть бути використані для аналізу, диспетчерського керування та оптимізації її роботи.

Вперше запропоновано імітаційна модель енергетичної системи у вигляді ярусного графа, яка враховує потужність згенерованої та переданої мережею електроенергії, номінальну потужність та кількість трансформаторів електричних підстанції, переріз та максимальну пропускну здатність ліній електропередач. Створена імітаційна модель складається з 385 вузлів, а саме: 29 вузлів генеруючих електростанцій, 10 вузлів електричних підстанцій напругою 750 кВ, 2 вузлів електричних підстанцій напругою 500 кВ, 1 вузла електричної підстанції напругою 400 кВ, 89 вузлів електричних підстанцій напругою 330 кВ, 35 вузлів електричних підстанцій напругою 220 кВ, 33 вузлів електричних підстанцій напругою 150 кВ, 186 вузлів електричних підстанцій напругою 110 кВ, та з 626 ребер, які представляють лінії електропередач різної номінальної напруги від 110 до 750 кВ та перерізу.

Така модель дає можливість визначити складні взаємозв'язки між її вузлами та інтегрувати устаткування в єдину енергосистему для проведення її аналізу ефективності експлуатації та працездатності

3. Подальшого розвитку отримав метод оцінки ефективності експлуатації енергосистеми, в основу якого покладено об'єми поставки та споживання електроенергії. Додано можливість врахування об'ємів електроенергії, які необхідно додатково залучити за аналогом кредитної банківської системи у іншій енергопередавальній організації для забезпечення потреб споживача.

Введено узагальнений показник згортки окремих критеріїв, а саме обсягу, якості та ефективності поставки електроенергії, що дало можливість в умовах споживчого

управління отримати інтегральний показник для виявлення споживачем ефективної поставки серед можливих альтернатив. На інтервалі I рисунку 3.1 показник об'єму поставки електроенергії $C_{\Pi} = 0,965$, $W_{\Pi.e} < W_{c.e}$, тобто об'єм електроенергії, що споживається перевищує об'єм електроенергії, який постачається. Це свідчить про неефективне постачання електроенергії. Показник якості поставки електроенергії C_f складає 0,979, що свідчить про відхилення частоти від нормованої на 2,1 %. Показник ефективності поставки та споживання електроенергії, що складає 0,978, показує неефективність поставки, так як $W_{n.e} < W_{c.e}$, то виникає необхідність брати електроенергію в борг у іншої електропередавальної організації за банківської системою під відсоток.

На інтервалі II рисунку 3.1 отримано ідеальний випадок поставки та споживання електричної енергії, так як $V_{n.e} = V_{c.e}$, звідси частинний показник об'єму поставки електроенергії C_{Π} складає 0,496. Показник якості поставки електроенергії дорівнює 1, тобто $\omega_{\phi} = \omega_{H} = 50$ Гц. Це свідчить про те, що не має відхилень напруги і електроенергія постачається та споживається за однаковою частотою. Показник ефективності поставки та споживання електроенергії дорівнює 1 та вказує на те, що поставка та споживання електроенергії є максимально ефективною.

На інтервалі III показник об'єму поставки електроенергії $C_{\Pi} = 0,48$ при $V_{\Pi.e} > V_{c.e}$ свідчить про неефективне постачання електроенергії. Показник якості поставки електроенергії, який складає 1,029 свідчить про відхилення частоти від нормованої на 2,9%. Показник ефективності поставки та споживання електроенергії $C_{e\phi} = 0,967$ показує, що поставка та споживання електроенергії є неефективним, так як утворюється надлишок електроенергії, який не споживається.

4. Розроблено стохастичну модель, яка забезпечує детальне зчитування та обробку даних із вихідних файлів для створення структурованого внутрішнього представлення енергетичної системи. Ця модель готує дані для подальших аналізів та обчислень у межах програми.

Розроблений алгоритм, який описує рекурсивний процес пошуку шляхів від заданого об'єкта до електростанцій, враховує поточний ланцюг об'єктів та їх

властивості, такі як життя та напруга. У процесі рекурсії виключаються об'єкти з закінченим терміном життя та вже відвідані об'єкти, щоб уникнути зациклення та неправильного повторення шляхів. Розроблений алгоритм дозволяє аналізувати працездатність електроенергетичної системи під час різних умов експлуатації, враховуючи потенційні виходи з ладу компонентів. Використання статистичного підходу допомагає оцінити ризики та визначити важливі елементи системи для її стабільності.

При нанесенні 100 випадкових збурень підряд по будь-яким об'єктам енергосистеми, включаючи об'єкти генерації та споживачів, стохастична модель показала, що в 36 випадках зі 100 об'єм переданої електроенергії склав 9,8 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 22 %, в 30 випадках з 100 – 9,45 ГВт з 44,5, що становить 21,2 %. При нанесенні 100 випадкових збурень підряд по будь-яким об'єктам енергосистеми, крім генерації, стохастична модель показала, що в 20 випадках зі 100 об'єм переданої електроенергії склав 43 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 96,6 %, в 22 випадках з 100 – 41 ГВт з 44,5 ГВт, що становить 92,1 %. При нанесенні 100 випадкових збурень підряд по лініям електропередач, стохастична модель показала, що в 49 випадках зі 100 об'єм переданої електроенергії склав 9,3 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 20,8 %.

При нанесенні 200 випадкових збурень підряд по будь-яким об'єктам енергосистеми, включаючи об'єкти генерації та споживачів, стохастична модель показала, що в 36 випадках зі 100 об'єм переданої електроенергії склав 8,5 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 19,1 %, в 25 випадках з 100 – 8 ГВт з 44,5, що становить 18 %. При нанесенні 200 випадкових збурень підряд по будь-яким об'єктам енергосистеми, крім генерації, стохастична модель показала, що в 16 випадках зі 100 об'єм переданої електроенергії склав 41 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 92,1 %, в 15 випадках з 100 – 35 ГВт з 44,5 гВт, що становить 78,7 %. При нанесенні 200 випадкових збурень підряд по лініям електропередач, стохастична модель показала, що в 27 випадках зі 100 об'єм

переданої електроенергії склав 7,7 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 17,3 %.

При нанесенні 300 випадкових збурень підряд по будь-яким об'єктам енергосистеми, включаючи об'єкти генерації та споживачів, стохастична модель показала, що в 18 випадках зі 100 об'єм переданої електроенергії склав 8,5 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 40,4 %, в 19 випадках з 100 – 5,3 ГВт з 44,5, що становить 11,9 %. При нанесенні 300 випадкових збурень підряд по будь-яким об'єктам енергосистеми, крім генерації, стохастична модель показала, що в 21 випадках зі 100 об'єм переданої електроенергії склав 30 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 67,4 %, в 18 випадках з 100 – 33 ГВт з 44,5 ГВт, що становить 74,2 %. При нанесенні 300 випадкових збурень підряд по лініям електропередач, стохастична модель показала, що в 24 випадках зі 100 об'єм переданої електроенергії склав 5,65 ГВт з 44,5 ГВт згенерованої потужності, що становит 12,7 %. Згідно отриманих даних отримуємо, що при збільшенні кількості збурень енергосистеми, об'єм електроенергії, що передається до споживача значно зменшується, тому необхідно як умога швидше проводити ремонтні роботи по відновлюванню енергосистеми.

5. Отримані в роботі наукові результати впроваджено в ТОВ «ТК ПРОЕКТ», де моделі оцінки електроенергетичної системи дозволили підвищити швидкість аналізу структури енергетичного комплексу, в ТОВ «ЕНЕРГОМАКС-ПРОЕКТ», де запропонована модель дозволяє швидко оцінити працездатність системи при розширенні існуючої системи електропостачання та використовуються при підготовці бакалаврів та магістрів за освітніми програмами «Електропостачання та енергетичний менеджмент», «Електротехніка та електромеханіка» на кафедрі електропостачання та енергетичного менеджменту Національного університету «Одеська політехніка» в курсах: «Інформаційні та комунікаційні технології в електроінженерії» і «Математичні моделі та методи оптимізації».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Амоша О. І. та ін. Деякі концептуальні пропозиції Інституту економіки промисловості НАН України щодо підтримки та розвитку вітчизняної промисловості під час воєнного стану та повоєнної неоіндустріальної модернізації // Вісник економічної науки України. – 2023.

URL: <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/190539>

2. Дубина, М., & Сердюк, Д. . (2024). Забезпечення сталого розвитку України в умовах невизначеності та турбулентності зовнішнього середовища. Проблеми і перспективи економіки та управління, (4 (36), 9–25.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-4\(36\)-9-25](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-4(36)-9-25)

URL: <http://ppeu.stu.cn.ua/article/view/299096>

3. Бережний, Є. О., et al. "Енергоефективність України: виклики часу." Вісник Національної академії наук України 7 (2013): 61-69.

URL: <https://www.visnyk-nanu.org.ua/sites/default/files/files/Visn.2013/7/8.Berezhnyi%20.pdf>

4. Гаврикова А.О. Розвиток ринку електричної енергії України з позиції його національних інтересів в енергетичній сфері // Вісник економіки транспорту і промисловості. 2015. №51.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rozvitok-rinku-elektrichnoyi-energiyi-ukrayini-z-pozitsiyi-yogo-natsionalnih-interesiv-v-energetichniy-sferi>

5. Парфентьева, І. О., & Н. І. Ільчук. "Перспективи розвитку альтернативних джерел енергії в Україні." Містобудування та територіальне планування 43 (2012): 315-319. (дата звернення: 20 лютого 2022 р.)

URL: http://www.irbis-nbuu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/MTP_2012_43_46.pdf

6. Корчук, І. В. "Сучасний стан розвитку альтернативних джерел енергії в Україні." Містобудування та територіальне планування 40 (1) (2011): 506-510.

URL: http://www.irbis-nbuu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2

&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/MTP_2011_40(1)_71.pdf

7. Семанишина, А. В., & А. І. Замулко. "Управління ризиками в умовах реформування енергетичної галузі." Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ (2011): 99-105.

URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/57a94009-3c53-429a-a41d-a78d92ba5dfa/download#page=99>

8. Валько, Ярослав Ігорович. "Дослідження та аналіз енергоефективності використання гібридних електростанцій на базі ВДЕ для електропостачання споживачів СФГ «Ігоря Валька» с. Стратин Рогатинського району Івано-Франківської області." (2020).

URL: <https://dspace.bati.org.ua/xmlui/handle/123456789/369>

9. Павлова, Олени Миколаївна, et al. "Регулювання інвестиційно-інноваційної активності в електроенергетичній галузі України." (2023).

URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/21736>

10. Максимов, М. В., Кривда, В. І., & Суворов, В. О. (2024). Model and method for analyzing the operability of the country's electric power system under non-projected disturbances. *Electrotechnic and Computer Systems*, (39 (115), 14-25.

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.2>

URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/3269/1178>

11. Kryvda V. I., Suvorov V. O., Zubak V. V. "Modeling and method for assessing the efficiency of the power system". *Herald of Advanced Information Technology*.2023; Vol. 6 No. 3: 240–249.

DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.16>.

URL: <https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/178/216>

12. Suvorov, V., & Zubak, V. (2023). Model for monitoring and evaluation of the effectiveness of the electric power system of the country. *Electrotechnic and Computer Systems*, (38(114), 15-21.

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.2>

URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/3249/1160>

13. План розвитку системи передачі на 2020-2029 роки. // НЕК "Укренерго". – 2019. – С. 28–51.

URL: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-zatverdzhennya-zvitu-za-i-pivrichchya-pro-vikonannya-zakhodiv-peredbachenikh-richnim-planom-roboti-natsionalnoi-komisii-shcho-zdiysnyue-derzhavne-regulyuvannya-u-sferakh-ene-616db8c36b233>

14. Звіт про результати діяльності НКРЕКП у 2018 р.: Постанова НКРЕКП від 29.03.2019 № 440. 314 с. (дата звернення: 27.01.2021)

URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=39676>

15. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII // База даних «Законодавство України» / ВР України. (дата звернення: 27.01.2021).

URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>

16. Правила улаштування електроустановок. – Х.: Вид-во «Форт», 2017. – 760 с. (дата звернення: 27.01.2021).

URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>

17. Левицький Ю. А., Костін Ю. Д. Формування корпоративної стратегії розвитку регіональних підприємств електроенергетики. Вісник Хмельницького національного університету. Екон. наук. 2009. №5. Т. 3. С. 248-256.

URL: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/ekon/2009_5_3/pdf/248-256.pdf

18. Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з розподілу електричної енергії: Постанова НКРЕКП України від 25.07.2017 № 932 // База даних «Законодавство України». (дата звернення: 07.02.2021).

URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/v0932874-17>

19. Joskow P. Incentive regulation and its application to electricity networks // Review of Network Economics. 2008. Vol. 7. P. 547-560.

URL: <https://economics.mit.edu/sites/default/files/2022-09/Incentive%20Regulation%20and%20its%20Application%20to%20Electricity%20Networks.pdf>

20. Калетнік Г. М., Козловський С.В., Заболотний Г.М., Слупський Б.В. Державне управління розвитком електроенергетики в контексті європейської

інтеграції України: монографія. Вінниця: Меркьюрі-Поділля, 2012. 284 с.

URL: https://kaletnik.com.ua/naukova_diyalnist/72.html

21. Норми технологічного проектування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище. Норми: СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014, затверджено наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 04.08.14 р. № 543

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0543732-14#Text>

22. Сагер Л. Ю., Вакуленко І. А., Колосок С. І. Оптимізація енергетичної системи як невід’ємна складова побудови інклюзивної економіки України // Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка. 2021. № 4. С. 9–14.

DOI: 10.21272/1817-9215.2021.4-1

URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/87920>

23. Uddin, Gius. (2018). Development of Simplified In Situ Processing Routes for Rear-Side Patterning of Silicon Heterojunction Interdigitated Back Contact (SHJ-IBC) Solar Cells.

DOI: 10.13140/RG.2.2.11514.13767.

URL: https://www.researchgate.net/publication/331023989_Development_of_Simplified_In_Situ_Processing_Routes_for_RearSide_Patterning_of_Silicon_Heterojunction_Interdigitated_Back_Contact_SHJ-IBC_Solar_Cells#pf54.

24. Kryvda V., Rudnitsky V., Suvorov V., Zubak V. Improving the efficiency of solar panels when using mppt – controller. Electrotechnic and Computer Systems. 2022. No.36 (112). P. 6–17.

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.04>

URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/3222/1135>

24. В. О. Разінков і В. О. Суворов, «Перспективи використання геліоенергетики для енергопостачання в місті Одеса», Вісник ВПІ, вип. 6, с. 29–36, Груд. 2022.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36>

URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2820>

25. Бурикін О.Б. Оптимізація режиму локальних електричних систем з відновлювальними джерелами енергії [Текст] / О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко //

Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика» – 2013. – № 2 (15). – С. 42-46. ISSN 2074 - 2630.

URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/19605>

26. Лежнюк П. Д. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, Д. С. Собчук // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 141. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження АПК України. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – С. 8–10. – ISBN 5-7987-0176X.

URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=ekit_2014_1_3

27. Лежнюк П.Д., Кравчук С.В. Оптимізація схем під'єднання нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії в електричних мережах [Текст] / П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2014.– №2.– с. 168-173.

URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/2495>

28. «Germany 2020. Energy Police Review».

URL: <https://www.iea.org/reports/germany-2020> (дата звернення: 20.04.2022).

29. «Spain 2021. Energy Police Review».

URL: <https://www.iea.org/reports/spain-2021> (дата звернення: 20.04.2022).

30. « Italy 2023. Energy Police Review».

URL: <https://www.iea.org/reports/italy-2023> (дата звернення: 20.04.2022).

31. «Portugal 2023. Energy Police Review».

URL: <https://www.iea.org/reports/portugal-2023> (дата звернення: 20.04.2022).

32. Kyrylenko, O., Blinov, I., Parus, Y. & Trach, I. “Evaluation of the efficiency of energy storage systems in electrical networks”. Technical Electrodynamics (in Ukrainian). 2021.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>.

URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/312>

33. Kyrylenko, O., Basok, B., Baseyev, Y. & Blinov, I. “Power industry of Ukraine and realities of the global warming”. *Technical Electrodynamics (in Ukrainian)*. 2020; Vol. 3: 52–61.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>.

URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/279>

34. Ivanov, H., Blinov, I., Parus, E. & Miroshnyk, V. “Components of model for analysis of influence of renewables on the electricity market price in Ukraine”. *Technical Electrodynamics (in Ukrainian)*. 2020; Vol 4: 72–75.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.072>.

URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/318>

35. Xiangyu Kong, Chengsi Yong, Chengshan Wang, Peng Li, Li Yu & Ying Chen. “Multi-objective power supply capacity evaluation method for active distribution network in power market environment”. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020; Vol. 115.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105467>.

URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56496085900>.

36. Bodynov, V. “Identification of an electrical network segment for active power flow control in an electric network with distributed energy resources (DERs)”. *Energy and Automation (in Ukrainian)*. 2013; Vol. 1 – [Accessed: Mar, 2022].

URL: http://archive.nbuiv.gov.ua/e-journals/eia/2013_1/13bvmdrg.pdf.

37. Di Cong, Lingling Liang, Shaoxing Jing, Yongming Han, Zhiqiang Geng & Chong Chu. “Energy supply efficiency evaluation of integrated energy systems using novel SBM-DEA integrating Monte Carlo”. *Energy*. 2021; Vol. 231.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120834>.

URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218328849>.

38. Kolysnichenko, A. & Stashenko, O. “Assessment of the performance efficiency of an electrical power system with renewable energy sources”. *International Scientific and Technical Journal: Modern Issues in Electrical Power Engineering and Automation (in*

Ukrainian). 2018. p. 236–238.

39. Akimov, O., Kukushkin, D., Popadin, A. & Pryschepa, A. “Estimation of efficiency of the systems of power supply of the electrified railways”. *Information Processing Systems* (in Ukrainian). 2016; Vol. 7: 12–14. – [Accessed: Mar, 2022].

URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2016_7_4.

40. Popadchenko, S. “Comparative assessment of electric power transmission efficiency via overhead lines”. *Visnik Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko* (in Ukrainian). 2015; Vol. 164: 27–30.

41. Somayajulu, D. & Madeleine, F. “Series of semi-Markov processes to model infrastructure resilience under multihazards”. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; Vol. 193.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106659>.

42. Yangyang, W. & Suren, C. “Resilience modeling and pre-hazard mitigation planning of transportation network to support post-earthquake emergency medical response”. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023; Vol. 230, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57215846573>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108918>.

43. Carmen, A., Justo, G. & Francesco, R. “Early energy assessment at the neighborhood level to promote greater energy efficiency”. *The case of Nabta Smart Town in Egypt*, *Habitat International*. 2023; Vol. 136,

URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201642926>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102782>.

44. Marco, F., Marco, A. & Umberto, D. “Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power”. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023; Vol. 40, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189600047>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101740>.

45. Carmen, A., Justo, G. & Francesco, R. “Early energy assessment at the neighborhood level to promote greater energy efficiency”. *The case of Nabta Smart Town*

in Egypt, *Habitat International*. 2023; Vol. 136,

URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201642926>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102782>.

46. Marco, F., Marco, A. & Umberto, D. “Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power”. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023; Vol. 40, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189600047>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101740>.

47. Rami S. El-Emam & Ibrahim Dincer. “Investigation and assessment of a novel solar-driven integrated energy system”. *Energy Conversion and Management*. 2018; Vol. 158: 246–255, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=39961264700>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.062>.

48. Zhiqiang Geng, Guanliang Song, Yongming Han & Chong Chu. “Static and dynamic energy structure analysis in the world for resource optimization using total factor productivity method based on slacks-based measure integrating data envelopment analysis”. *Energy Conversion and Management*. 2021; Vol. 228, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8976561200>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113713>.

49. Yongming Han, Shuang Liu, Zhiqiang Geng, Hengchang Gu & Yixin Qu. “Energy analysis and resources optimization of complex chemical processes: Evidence based on novel DEA cross-model”. *Energy*. 2021; Vol. 218, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55489232400>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119508>.

50. David, S., Khalilm E. & Ming, L. “Energy efficiency and conservation values in a variable renewable electricity system”. *Energy Strategy Reviews*. 2022; Vol. 43, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=31367787300>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100935>.

51. Maksymova, O., Maksymov, M., Silina, V. & Orischenko, A. “Development of the method of determining the target function of optimization of power plant”. *Automation*

of Technological and Business Processes (in Ukrainian). 2017; Vol.9: 28–35.– [Accessed: Mar, 2022].

URL: <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/559>.

52. Hong-jie Song, Wei Zhang, Ya-qi Li, Zheng-wei Yang & An-bo Ming. “Exergy analysis and parameter optimization of heat pipe receiver with integrated latent heat thermal energy storage for space station in charging process”. *Applied Thermal Engineering*. 2017; Vol. 119: 304–311, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55657477100>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.080>.

53. Ravinder Kumar. “A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants”. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2017; Vol. 20: 283–292,

URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55776822500>.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.08.018>.

54. Maksymova, O., Maksymov, M., Silina, V. & Orischenko A. “Analysis of the energy system balance efficiency provided with the different groups of generating plants”. *Automation of Technological and Business Processes (in Ukrainian)*. 2017; Vol.9, Vyp.4: 5–17– [Accessed: Mar, 2022].

URL: <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/814>

55. Nadia S. Ouedraogo (2017). Africa energy future: Alternative scenarios and their implications for sustainable development strategies. *Energy Policy*. № 106, 457-471.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.021>.

56. Yassin Yehia Rady, Matteo V. Rocco, M.A. Serag-Eldin, Emanuela Colombo (2018). Modelling for power generation sector in Developing Countries: Case of Egypt. *Energy*. № 165, 198-209.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.089>.

57. Sayyad Nojavan, Mehdi Mehdinejad, Kazem Zare, Behnam Mohammadi-Ivatloo (2015). Energy procurement management for electricity retailer using new hybrid approach based on combined BICA–BPSO. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 73, 411-419.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.033>.

58. Daiji Iwasa, Rikiya Abe, Triet Nguyen-Van (2023). On improvement of system reliability by multiplexing power supply network and its economic impact. *Energy Reports*. № 9, 5857-5862.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.031>.

59. Sayyad Nojavan, Kazem Zare, Behnam Mohammadi-Ivatloo (2017). Selling price determination by electricity retailer in the smart grid under demand side management in the presence of the electrolyser and fuel cell as hydrogen storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*. № 42, 3294-3308.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.070>.

60. Hasan Mehrjerdi, Reza Hemmati (2020). Energy and uncertainty management through domestic demand response in the residential building. *Energy*. № 192.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116647>.

61. Mohammad Sadegh Javadi, Matthew Gough, Seyed Amir Mansouri, Amir Ahmarinejad, Emad Nematbakhsh, Sergio F. Santos, João P.S. Catalão (2022). A two-stage joint operation and planning model for sizing and siting of electrical energy storage devices considering demand response programs. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 138.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107912>.

62. Surender Reddy Salkuti (2019). Day-ahead thermal and renewable power generation scheduling considering uncertainty. *Renewable Energy*. № 131, 956-965.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.106>.

63. A. Rezaee Jordehi, V. Sohrabi Tabar, S.A. Mansouri, M. Nasir, S.M. Hakimi, S. Pirouzi (2022). A risk-averse two-stage stochastic model for planning retailers including self-generation and storage system. *Journal of Energy Storage*. № 51.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104380>.

64. Sayyad Nojavan, Kazem Zare (2018). Optimal energy pricing for consumers by electricity retailer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 102, 401-412.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.05.013>.

65. Mahsa Yadegari, Hadi Sahebi, Sobhan Razm, Jalal Ashayeri (2023). A sustainable multi-objective optimization model for the design of hybrid power supply networks under uncertainty. *Renewable Energy*.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119443>.

66. Fengzhang Luo, Jiaying Xu, Tianyu Zhang (2021). Quantitative evaluation of power supply reliability improvement in distribution network by customer-side integrated energy system. *Energy Reports*. № 7, 233-241.

URL: <https://doaj.org/article/e73d2e289a604756ae2b67378e4eae1e>

67. Jinming Jiang, Weijun Gao, Xindong Wei, Yanxue Li, Soichiro Kuroki (2019). Reliability and cost analysis of the redundant design of a combined cooling, heating and power (CCHP) system. *Energy Conversion and Management*. № 199.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111988>.

68. Jun Xiao, Xin Li, Wenzhuo Gu, Fangxing Li, Chengshan Wang (2015). Model of distribution system total supply capability considering feeder and substation transformer contingencies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 65, 419-424.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.025>.

69. Jun Xiao, Shisong Liu, Zhensheng Li, Fangxing Li (2016). Loadability formulation and calculation for interconnected distribution systems considering N-1 security. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 77, 70-76.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.001>.

70. M.M. Aman, G.B. Jasmon, A.H.A. Bakar, H. Mokhlis (2014). Optimum network reconfiguration based on maximization of system loadability using continuation power flow theorem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 54, 123-133.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.026>.

71. Jun Xiao, Xiqiao Lin, Heng Jiao, Chenhui Song, Huan Zhou, Guoqiang Zu, Chunli Zhou, Dan Wang (2023). Model, calculation, and application of available supply capability for distribution systems. *Applied Energy*. № 348.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121489>.

72. Salwan Tajjour, Shyam Singh Chandel (2023). A comprehensive review on sustainable energy management systems for optimal operation of future-generation of solar microgrids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. № 58.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103377>.

73. Magdi A. Mosa, A.A. Ali (2021). Energy management system of low voltage dc microgrid using mixed-integer nonlinear programming and a global optimization technique. *Electric Power Systems Research*. № 192.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106971>.

74. Muhammad Waseem Khan, Jie Wang, Meiling Ma, Linyun Xiong, Penghan Li, Fei Wu (2019). Optimal energy management and control aspects of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustainable Cities and Society*. № 44, 855-870.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.009>.

75. Sima Davarzani, Ramon Granell, Gareth A. Taylor, Ioana Pisica (2019). Implementation of a novel multi-agent system for demand response management in low-voltage distribution networks. *Applied Energy*. № 253.

URL:

https://www.researchgate.net/publication/336641877_Implementation_of_a_novel_multi-agent_system_for_demand_response_management_in_low-voltage_distribution_networks

76. Sambheet Mishra, Chiara Bordin, Asgeir Tomasgard, Ivo Palu (2019). A multi-agent system approach for optimal microgrid expansion planning under uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 109, 696-709.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.044>.

77. M. Mollayousefi Zadeh, P. MohammadAli Rezayi, S. Ghafouri, M.H. Alizadeh, G.B. Gharehpetian (2023). IoT-based stochastic EMS using multi-agent system for coordination of grid-connected multi-microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 151.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109191>.

78. Abhilash Kantamneni, Laura E. Brown, Gordon Parker, Wayne W. Weaver (2015). Survey of multi-agent systems for microgrid control. *Engineering Applications of*

Artificial Intelligence. № 45, 192-203.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.07.005>.

79. Joelle Klaimi, Rana Rahim-Amoud, Leila Merghem-Boulahia, Akil Jrad (2018). A novel loss-based energy management approach for smart grids using multi-agent systems and intelligent storage systems. *Sustainable Cities and Society*. № 39, 344-357.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.038>.

80. Dawit Habtu Gebremeskel, Erik O. Ahlgren, Getachew Bekele Beyene (2023). Long-term electricity supply modelling in the context of developing countries: The OSeMOSYS-LEAP soft-linking approach for Ethiopia. *Energy Strategy Reviews*. № 45.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101045>.

81. Asma Dhakouani, Francesco Gardumi, Essia Znouda, Chiheb Bouden, Mark Howells (2017). Long-term optimisation model of the Tunisian power system. *Energy*. № 141, 550-562.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.093>.

82. Peter McCallum, David P. Jenkins, Andrew D. Peacock, Sandhya Patidar, Merlinda Andoni, David Flynn, Valentin Robu (2019). A multi-sectoral approach to modelling community energy demand of the built environment. *Energy Policy*. № 132, 865-875.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.041>.

83. Md Alam Hossain Mondal, Claudia Ringler (2020). Long-term optimization of regional power sector development: Potential for cooperation in the Eastern Nile region. *Energy*. № 201, 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117703>.

84. Shynhalov D. Дослідження програмних засобів для аналізу та візуалізації соціальних графових структур / D. Shynhalov // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2018. – Т. 5 (51). – С. 128-131. –

DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.128>.

85. І. В. Доманський, О. С. Козлова. Методи аналізу режимів передачі і розподілу електроенергії в електричних схемах з тяговими навантаженнями. //

Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. 2019. Вип. 1(147). С. 158-168.

URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=kgm_tech_2019_1_28

86. Г. С. Бобрицька Прикладне застосування теорії графів у різних сферах життя суспільства та окремої особистості // ФМО. 2017. №3 (13).

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prikladne-zastosuvannya-teoriyi-grafiv-u-riznih-sferah-zhittya-suspilstva-ta-okremoyi-osobistosti> (дата обращения: 26.04.2021).

87. Гнатушенко, В. В., О. С. Сизов, and О. О. Кавац. "Дослідження використання графових моделей при відображенні даних у інформаційному просторі." Системні технології 3 (2018): 81-87.

URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=st_2018_3_12

88. Солодка, Н. О., Є. О. Поліщук, and О. А. Ляшенко. "Використання графової та реляційної моделей даних при розробці експертних систем." Вестник Херсонського національного технічного університету 4 (67) (2018): 246-251.

URL: <https://orgconf.com/infolist/kmoss2020.pdf>

89. Парубець, О. М. "Моделювання мережевих структур на транспорті з використанням елементів теорії графів." Глобальні та національні проблеми економіки (2015): 380-383.

URL: http://visnyk-onu.od.ua/journal/2016_21_1/49.pdf

90. Гамаюн, Ігор Петрович, and Ольга Юрїївна Чередніченко. "Моделювання систем." (2015).

URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/fd96a96c-42b0-43a8-ba4b-f21c61-a10510>

91. Pitukh , I. (2023). Development of the theory of emergent analysis of complex topologies of high-voltage networks based on the method of taking into account probabilistic failure characteristics. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES:

EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (53), 200-204.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-29>

92. Кириленко, Олександр Васильович, et al. "Інформаційне та нормативне забезпечення організації мультиагентного керування електроенергетичної системи із активним споживачем." *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія* 1 (2016): 29-34.

URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=Itki_2016_1_6

93. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. – Київ. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с. – Бібліогр. :с. 450-452.

URL: <https://ela.kpi.ua/items/dafdc22-21eb-4315-b1a9-24580381a30c>

94. Костишин В.С., Михайлів М.І., Федорів М.Й., Галушак І.Д. Оцінка і прогнозування надійності систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії/ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

URL: <https://old.nung.edu.ua/person/%D0%BC%D0%B8%D1%85%D0%B0%D0%B9%D0%BB%D1%96%D0%B2%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B0-%D1%96%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87>

95. Волошин О.Ф., Мащенко С.О. Моделі та методи прийняття рішень: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / О.Ф. Волошин, С.О. Мащенко. – 3-є вид., перероб. – К.: «Видавництво Людмила», 2018. – 292 с.

URL: <http://www.csc.univ.kiev.ua/uk/library/books/voloshyn-20.pdf>

96. Бірюков, Д. С., and В. А. Заславський. "Оцінювання рівня розвитку територій України на основі методів багатокритеріальної оптимізації." *Системи обробки інформації* 8 (2010): 151-158.

URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C2

1COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%94\$#gsc.tab=0

97. Кутова, О. В. Методичний підхід до багатокритеріального вибору у фармацевтичних дослідженнях з кількісними факторами / О. В. Кутова, Р. В. Сагайдак-Нікітюк // Вісник фармації. - 2023. - № 1. - С. 38-43.

DOI: 10.24959/nphj.23.105

URL: https://www.researchgate.net/publication/368672979_A_methodical_approach_to_the_multicriteria_selection_in_the_pharmaceutical_technological_research_with_quantitative_factors

98. Зінзура, В. В. "Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах." Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація 25 (1) (2012): 350-360.

URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=znpkntu_2012_25\(1\)_58](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=znpkntu_2012_25(1)_58)

99. Артюхова, Л. В. Узагальнені критерії якості в задачах багатокритеріальної оптимізації / Л. В. Артюхова, Н. М. Руденко, Т. В. Зінченко // Ukrainian Food Journal. - К.: НУХТ, 2012. - № 1. - С. 97-100.

URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/dca89548-d2e7-408a-918a-b8fa2010a4ea>

100. Бардик Є. І., Бондаренко О. Л. Нечітке моделювання комутаційного обладнання для задач оцінки ризику виникнення аварійних ситуацій в енергосистемі при відмовах електрообладнання. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4. С. 75–86.

URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273409>.

101. Бардик Є. І., Болотний М. П., і Бондаренко О. Л. Визначення ризику порушення нормального режиму енергосистеми при плановому і аварійному

виведенні з експлуатації електрообладнання. Вісник ВПІ. 2021. № 2. С. 54–62.

URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-54-62>.

102. Бардик Є. І., Бондаренко О. Л. Оцінка режимної надійності електроенергетичної системи на основі визначення індексу ризику при відмовах вузлів навантаження з відповідальними споживачами. Технічні науки та технології: науковий журнал. 2019. № 2(16). С. 105–117.

URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-2\(16\)-105-117](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-2(16)-105-117).

103. Shao W., Vittal V. Corrective Switching Algorithm for Relieving Overloads and Voltage Violations. IEEE Transactions on Power Systems. 2005. Vol. 20, no. 4. P. 1877–1885.

URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2005.857931>

104. Kosterev M. V., Bardyk E. I., Litvinov V. V. Preventive Risk-Management of Power System for Its Reliability Increasing. WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS. 2014. Vol. 10. P. 251–258.

URL: <https://www.wseas.org/multimedia/journals/power/2015/a525716-293.pdf>

105. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах. Технічна електродинаміка. 2011. № 1. С. 46 – 53.

URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61941/07-Kyrylenko.pdf?sequence=1>

106. Приватне Акціонерне Товариство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НЕК «Укренерго»). (n.d.). План розвитку системи передачі на 2021-2030 роки, схвалений постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 57 від 20.01.2021.

URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/planrozvytku-oesukrayiny>

ДОДАТОК А

Властивості множини вершин ярусного графу

| Вершина | Назва вершини | Кількість тр-рів, шт | Потужність, МВА | Навантаження, МВт | Втрати в тр-р, кВт | Вартість 1 кВт, грн/кВт | Примітка |
|---------|---------------|----------------------|-----------------|-------------------|--------------------|-------------------------|-----------|
| v1 | Gen 1 | | | 3000 | | | генерація |
| v2 | Gen 2 | | | 6000 | | | генерація |
| v3 | Gen 3 | | | 2000 | | | генерація |
| v4 | Gen 4 | | | 2835 | | | генерація |
| v5 | Gen 5 | | | 1800 | | | генерація |
| v6 | Gen 6 | | | 302 | | | генерація |
| v7 | Gen 7 | | | 500 | | | генерація |
| v8 | Gen 8 | | | 700 | | | генерація |
| v9 | Gen 9 | | | 1825 | | | генерація |
| v10 | Gen 10 | | | 972 | | | генерація |
| v11 | Gen 11 | | | 702 | | | генерація |
| v12 | Gen 12 | | | 482,5 | | | генерація |
| v13 | Gen 13 | | | 2351 | | | генерація |
| v14 | Gen 14 | | | 510 | | | генерація |
| v15 | Gen 15 | | | 636,2 | | | генерація |
| v16 | Gen 16 | | | 2079 | | | генерація |
| v17 | Gen 17 | | | 910 | | | генерація |
| v18 | Gen 18 | | | 1532 | | | генерація |
| v19 | Gen 19 | | | 2850 | | | генерація |
| v20 | Gen 20 | | | 2265 | | | генерація |
| v21 | Gen 21 | | | 3600 | | | генерація |
| v22 | Gen 22 | | | 1270 | | | генерація |
| v23 | Gen 23 | | | 880 | | | генерація |
| v24 | Gen 24 | | | 2010 | | | генерація |
| v25 | Gen 25 | | | 275 | | | генерація |
| v26 | Gen 26 | | | 470 | | | генерація |
| v27 | Gen 27 | | | 470 | | | генерація |
| v28 | Gen 28 | | | 68 | | | генерація |
| v29 | Gen 29 | | | 1220 | | | генерація |
| v30 | PS_750_1 | 3 2 | 333 125 | 999 | 3x621 2x375 | 3x1011 2x310 | 750 кВ |
| v31 | PS_750_2 | 3 | 250 | 600 | 3x463 | 3x600 | 750 кВ |
| v32 | PS_750_3 | 2 | 999 | 1598 | 2x1860 | 2x2730 | 750 кВ |
| v33 | PS_750_4 | 2 2 | 1250 999 | 3600 | 2x3400 2x1860 | 2x3100 2x2730 | 750 кВ |
| v34 | PS_750_5 | 2 | 999 | 1598 | 2x1860 | 2x2730 | 750 кВ |
| v35 | PS_750_6 | 2 1 | 250 300 | 600 | 2x463 1x510 | 2x600 1x950 | 750 кВ |
| v36 | PS_750_7 | 1 | 999 | 799 | 1860 | 1x2730 | 750 кВ |
| v37 | PS_750_8 | 2 | 999 | 1500 | 2x1860 | 2x2730 | 750 кВ |

| | | | | | | | |
|-----|-----------|-------------|-------------------|------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| v38 | PS_750_9 | 3 | 999 | 2398 | 3x1860 | 3x2730 | 750 кВ |
| v39 | PS_750_10 | | | | | | ПС іншої держави |
| v40 | PS_500_1 | 2 | 200 | 320 | 2x380 | 2x560 | 500 кВ |
| v41 | PS_500_2 | 2 1 | 200 100 | 400 | 2x380 1x210 | 2x560 2x300 | 500 кВ |
| v42 | PS_400_1 | 2 2 | 200 400 | 980 | 2x380 2x590 | 2x560 2x870 | 400 кВ |
| v43 | PS_330_1 | 3 | 250 | 600 | 3x470 | 3x410 | 330 кВ |
| v44 | PS_330_2 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v45 | PS_330_3 | | | | | | транзит |
| v46 | PS_330_4 | 2 | 325 | 488 | 2x600 | 2x560 | 330 кВ |
| v47 | PS_330_5 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 кВ |
| v48 | PS_330_6 | 3 | 200 | 500 | 3x534 | 3x410 | 330 кВ |
| v49 | PS_330_7 | 2 | 125 | 200 | 2*352 | 2x230 | 330 кВ |
| v50 | PS_330_8 | 2 1 | 250 300 | 600 | 2x470 1x520 | | 330 кВ |
| v51 | PS_330_9 | 1 | 200 | 160 | 1x534 | 1x410 | 330 кВ |
| v52 | PS_330_10 | 2 1 | 125 200 | 360 | 2x352 1x534 | 2x230 1x410 | 330 кВ |
| v53 | PS_330_11 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v54 | PS_330_12 | 3 | 125 | 300 | 3x352 | 3x230 | 330 кВ |
| v55 | PS_330_13 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v56 | PS_330_14 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 кВ |
| v57 | PS_330_15 | 3 | 200 | 480 | 3x534 | 3x410 | 330 кВ |
| v58 | PS_330_16 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v59 | PS_330_17 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 кВ |
| v60 | PS_330_18 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 кВ |
| v61 | PS_330_19 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v62 | PS_330_20 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 кВ |
| v63 | PS_330_21 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 кВ |
| v64 | PS_330_22 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 кВ |
| v65 | PS_330_23 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v66 | PS_330_24 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v67 | PS_330_25 | 2 2 | 200 125 | 520 | 2x534 2x352 | 2x410 2x230 | 330 кВ |
| v68 | PS_330_26 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v69 | PS_330_27 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v70 | PS_330_28 | 1 | 200 | 160 | 1x534 | 1x410 | 330 кВ |
| v71 | PS_330_29 | 2 2 2 | 125 200 240 | 904 | 2x352 2x534 2x580 | 2x230 2x410 2x430 | 330 кВ |
| v72 | PS_330_30 | 2 1 | 200 125 | 420 | 2x534 1x352 | 1x230 | 330 кВ |
| v73 | PS_330_31 | 3 | 200 | 480 | 3x534 | 3x410 | 330 кВ |
| v74 | PS_330_32 | 1 2 | 200 125 | 360 | 1x534 2x352 | 2x230 | 330 кВ |
| v75 | PS_330_33 | 1 1 | 200 125 | 260 | 1x534 1x352 | 1x230 | 330 кВ |

| | | | | | | | |
|------|-----------|---|-----|------|--------|--------|--------|
| v76 | PS_330_34 | 4 | 125 | 400 | 4x352 | 4x230 | 330 kB |
| v77 | PS_330_35 | 3 | 125 | 300 | 3x352 | 3x230 | 330 kB |
| v78 | PS_330_36 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v79 | PS_330_37 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v80 | PS_330_38 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v81 | PS_330_39 | 2 | 250 | 400 | 2x470 | 2x430 | 330 kB |
| v82 | PS_330_40 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v83 | PS_330_41 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v84 | PS_330_42 | 1 | 250 | 200 | 1x470 | 1x430 | 330 kB |
| v85 | PS_330_43 | 3 | 250 | 700 | 3x470 | 3x430 | 330 kB |
| | | 2 | 63 | | 2x180 | 2x120 | |
| v86 | PS_330_44 | 2 | 250 | 400 | 2x470 | 2x430 | 330 kB |
| v87 | PS_330_45 | 2 | 250 | 450 | 2x470 | 2x430 | 330 kB |
| | | 1 | 63 | | 1x180 | 2x120 | |
| v88 | PS_330_46 | 2 | 250 | 400 | 2x470 | 2x430 | 330 kB |
| v89 | PS_330_47 | 4 | 250 | 800 | 4x470 | 4x430 | 330 kB |
| v90 | PS_330_48 | 4 | 250 | 800 | 4x470 | 4x430 | 330 kB |
| v91 | PS_330_49 | 4 | 250 | 800 | 4x470 | 4x430 | 330 kB |
| v92 | PS_330_50 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v93 | PS_330_51 | 3 | 250 | 600 | 3x470 | 3x430 | 330 kB |
| v94 | PS_330_52 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v95 | PS_330_53 | 5 | 250 | 1000 | 5x470 | 5x430 | 330 kB |
| v96 | PS_330_54 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v97 | PS_330_55 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v98 | PS_330_56 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v99 | PS_330_57 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v100 | PS_330_58 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v101 | PS_330_59 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v102 | PS_330_60 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v103 | PS_330_61 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v104 | PS_330_62 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v105 | PS_330_63 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v106 | PS_330_64 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v107 | PS_330_65 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v108 | PS_330_66 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v109 | PS_330_67 | 1 | 999 | 800 | 1x1620 | 1x2120 | 330 kB |
| v110 | PS_330_68 | 2 | 125 | 360 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| | | 1 | 200 | | 2x534 | 1x410 | |
| v111 | PS_330_69 | 2 | 125 | 360 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| | | 1 | 200 | | 1x534 | 1x410 | |
| v112 | PS_330_70 | 3 | 125 | 300 | 3x352 | 3x230 | 330 kB |
| v113 | PS_330_71 | 3 | 125 | 300 | 3x352 | 3x230 | 330 kB |
| v114 | PS_330_72 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v115 | PS_330_73 | 3 | 200 | 480 | 3x534 | 3x410 | 330 kB |
| v116 | PS_330_74 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v117 | PS_330_75 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v118 | PS_330_76 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v119 | PS_330_77 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |

| | | | | | | | |
|------|-----------|---|-----|-----|-------|-------|--------|
| v120 | PS_330_78 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v121 | PS_330_79 | 2 | 250 | 500 | 2x470 | 2x410 | 330 kB |
| | | 2 | 63 | | 2x180 | 2x120 | |
| v122 | PS_330_80 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v123 | PS_330_81 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v124 | PS_330_82 | 2 | 250 | 375 | 2x470 | 2x430 | 330 kB |
| v125 | PS_330_83 | 2 | 250 | 375 | 2x470 | 2x430 | 330 kB |
| v126 | PS_330_84 | 3 | 250 | 751 | 3x470 | 3x430 | 330 kB |
| | | 3 | 63 | | 2x180 | 3x120 | |
| v127 | PS_330_85 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v128 | PS_330_86 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v129 | PS_330_87 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v130 | PS_330_88 | 2 | 125 | 200 | 2x352 | 2x230 | 330 kB |
| v131 | PS_330_89 | 2 | 200 | 320 | 2x534 | 2x410 | 330 kB |
| v132 | PS_220_1 | 2 | 63 | 101 | 2x180 | 2x110 | 220 kB |
| v133 | PS_220_2 | 2 | 63 | 105 | 2x180 | 2x110 | 220 kB |
| v134 | PS_220_3 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v135 | PS_220_4 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v136 | PS_220_5 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v137 | PS_220_6 | 2 | 63 | 101 | 2x180 | 2x110 | 220 kB |
| v138 | PS_220_7 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v139 | PS_220_8 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v140 | PS_220_9 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v141 | PS_220_10 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v142 | PS_220_11 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v143 | PS_220_12 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v144 | PS_220_13 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v145 | PS_220_14 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v146 | PS_220_15 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v147 | PS_220_16 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v148 | PS_220_17 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v149 | PS_220_18 | 2 | 63 | 101 | 2x180 | 2x110 | 220 kB |
| v150 | PS_220_19 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v151 | PS_220_20 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v152 | PS_220_21 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v153 | PS_220_22 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v154 | PS_220_23 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v155 | PS_220_24 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v156 | PS_220_25 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v157 | PS_220_26 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v158 | PS_220_27 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v159 | PS_220_28 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v160 | PS_220_29 | 2 | 250 | 400 | 2x450 | 2x380 | 220 kB |
| v161 | PS_220_30 | 2 | 250 | 400 | 2x450 | 2x380 | 220 kB |
| v162 | PS_220_31 | 2 | 250 | 400 | 2x450 | 2x380 | 220 kB |
| v163 | PS_220_32 | 2 | 200 | 320 | 2x400 | 2x350 | 220 kB |
| v164 | PS_220_33 | 2 | 125 | 200 | 2x270 | 2x190 | 220 kB |
| v165 | PS_220_34 | 2 | 250 | 400 | 2x450 | 2x380 | 220 kB |

| | | | | | | | |
|------|-----------|---|-----|-----|-------|-------|---------|
| v166 | PS_220_35 | 2 | 63 | 101 | 2x180 | 2x110 | 220 кВ |
| v167 | PS_150_1 | 1 | 16 | 12 | 1x87 | 1x20 | 150 кВ |
| v168 | PS_150_2 | 1 | 25 | 19 | 1x120 | 1x28 | 150 кВ |
| v169 | PS_150_3 | 2 | 40 | 168 | 2x171 | 2x48 | 150 кВ |
| | | 1 | 90 | | 1x340 | 1x110 | |
| | | 1 | 25 | | 1x120 | 1x28 | |
| v170 | PS_150_4 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v171 | PS_150_5 | 1 | 200 | 160 | 1x270 | 1x210 | 150 кВ |
| v172 | PS_150_6 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v173 | PS_150_7 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v174 | PS_150_8 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v175 | PS_150_9 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v176 | PS_150_10 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v177 | PS_150_11 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v178 | PS_150_12 | 2 | 63 | 95 | 2x242 | 2x75 | 150 кВ |
| v179 | PS_150_13 | 2 | 63 | 95 | 2x242 | 2x75 | 150 кВ |
| v180 | PS_150_14 | 2 | 32 | 52 | 2x150 | 2x38 | 150 кВ |
| v181 | PS_150_15 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v182 | PS_150_16 | 2 | 16 | 40 | 2x87 | 2x20 | 150 кВ |
| v183 | PS_150_17 | | | | | | транзит |
| v184 | PS_150_18 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v185 | PS_150_19 | 2 | 63 | 141 | 2x242 | 2x80 | 150 кВ |
| | | 2 | 25 | | 2x120 | 2x28 | |
| v186 | PS_150_20 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v187 | PS_150_21 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v188 | PS_150_22 | 1 | 40 | 32 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v189 | PS_150_23 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v190 | PS_150_24 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v191 | PS_150_25 | 1 | 32 | 26 | 1x150 | 2x38 | 150 кВ |
| v192 | PS_150_26 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v193 | PS_150_27 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x47 | 150 кВ |
| v194 | PS_150_28 | 2 | 25 | 34 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v195 | PS_150_29 | 2 | 16 | 25 | 2x87 | 2x20 | 150 кВ |
| v196 | PS_150_30 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v197 | PS_150_31 | 3 | 32 | 76 | 3x150 | 2x38 | 150 кВ |
| v198 | PS_150_32 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v199 | PS_150_33 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 150 кВ |
| v200 | PS_110_1 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 кВ |
| v201 | PS_110_2 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v202 | PS_110_3 | 2 | 10 | 17 | 2x66 | 2x13 | 110 кВ |
| v203 | PS_110_4 | 2 | 32 | 50 | 2x150 | 2x38 | 110 кВ |
| v204 | PS_110_5 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v205 | PS_110_6 | 2 | 32 | 48 | 2x150 | 2x38 | 110 кВ |
| v206 | PS_110_7 | 3 | 10 | 25 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v207 | PS_110_8 | 1 | 40 | 53 | 1x171 | 1x48 | 110 кВ |
| | | 1 | 25 | | 1x120 | 1x28 | |
| v208 | PS_110_9 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v209 | PS_110_10 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |

| | | | | | | | |
|------|-----------|--------|----------|-----|----------------|--------------|--------|
| v210 | PS_110_11 | 1 1 | 40 25 | 53 | 1x171 1x120 | 1x48 1x28 | 110 kB |
| v211 | PS_110_12 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v212 | PS_110_13 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v213 | PS_110_14 | 3 | 40 | 96 | 3x171 | 2x48 | 110 kB |
| v214 | PS_110_15 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v215 | PS_110_16 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v216 | PS_110_17 | 2 | 80 | 140 | 2x332 | 2x110 | 110 kB |
| v217 | PS_110_18 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v218 | PS_110_19 | 2 | 16 | 25 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v219 | PS_110_20 | 2 1 | 20 40 | 64 | 2x110 1x171 | 2x22 1x48 | 110 kB |
| v220 | PS_110_21 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v221 | PS_110_22 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v222 | PS_110_23 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v223 | PS_110_24 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v224 | PS_110_25 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v225 | PS_110_26 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v226 | PS_110_27 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v227 | PS_110_28 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v228 | PS_110_29 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v229 | PS_110_30 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v230 | PS_110_31 | 2 | 63 | 103 | 2x242 | 2x80 | 110 kB |
| v231 | PS_110_32 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v232 | PS_110_33 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v233 | PS_110_34 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v234 | PS_110_35 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v235 | PS_110_36 | 1 | 16 | 13 | 1x87 | 1x20 | 110 kB |
| v236 | PS_110_37 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v237 | PS_110_38 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v238 | PS_110_39 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v239 | PS_110_40 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v240 | PS_110_41 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v241 | PS_110_42 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v242 | PS_110_43 | 1 | 7,5 | 6 | 2x56 | 2x8 | 110 kB |
| v243 | PS_110_44 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v244 | PS_110_45 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v245 | PS_110_46 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v246 | PS_110_47 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v247 | PS_110_48 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v248 | PS_110_49 | 2 | 16 | 24 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v249 | PS_110_50 | 2 | 16 | 24 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v250 | PS_110_51 | 2 | 63 | 105 | 2x242 | 2x80 | 110 kB |
| v251 | PS_110_52 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v252 | PS_110_53 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |
| v253 | PS_110_54 | 2 | 6,3 | 11 | 2x50 | 2x7,5 | 110 kB |
| v254 | PS_110_55 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v255 | PS_110_56 | 2 | 16 | 24 | 2x87 | 2x20 | 110 kB |

| | | | | | | | |
|------|------------|---|----|----|-------|------|---------|
| v256 | PS_110_57 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v257 | PS_110_58 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 кВ |
| v258 | PS_110_59 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v259 | PS_110_60 | 2 | 20 | 32 | 2x110 | 2x22 | 110 кВ |
| v260 | PS_110_61 | 2 | 16 | 26 | 2x87 | 2x20 | 110 кВ |
| v261 | PS_110_62 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v262 | PS_110_63 | | | | | | транзит |
| v263 | PS_110_64 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v264 | PS_110_65 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v265 | PS_110_66 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v266 | PS_110_67 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v267 | PS_110_68 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v268 | PS_110_69 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v269 | PS_110_70 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v270 | PS_110_71 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v271 | PS_110_72 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v272 | PS_110_73 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v273 | PS_110_74 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v274 | PS_110_75 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v275 | PS_110_76 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v276 | PS_110_77 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v277 | PS_110_78 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v278 | PS_110_79 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v279 | PS_110_80 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v280 | PS_110_81 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v281 | PS_110_82 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v282 | PS_110_83 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v283 | PS_110_84 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v284 | PS_110_85 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v285 | PS_110_86 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v286 | PS_110_87 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v287 | PS_110_88 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v288 | PS_110_89 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v289 | PS_110_90 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v290 | PS_110_91 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v291 | PS_110_92 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v292 | PS_110_93 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v293 | PS_110_94 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v294 | PS_110_95 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v295 | PS_110_96 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v296 | PS_110_97 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v297 | PS_110_98 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v298 | PS_110_99 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v299 | PS_110_100 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v300 | PS_110_101 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |
| v301 | PS_110_102 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 кВ |
| v302 | PS_110_103 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 кВ |
| v303 | PS_110_104 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 кВ |

| | | | | | | | |
|------|------------|---|----|----|-------|------|--------|
| v304 | PS_110_105 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v305 | PS_110_106 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v306 | PS_110_107 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v307 | PS_110_108 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v308 | PS_110_109 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v309 | PS_110_110 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v310 | PS_110_111 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v311 | PS_110_112 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v312 | PS_110_113 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v313 | PS_110_114 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v314 | PS_110_115 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v315 | PS_110_116 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v316 | PS_110_117 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v317 | PS_110_118 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v318 | PS_110_119 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v319 | PS_110_120 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v320 | PS_110_121 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v321 | PS_110_122 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v322 | PS_110_123 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v323 | PS_110_124 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v324 | PS_110_125 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v325 | PS_110_126 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v326 | PS_110_127 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v327 | PS_110_128 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v328 | PS_110_129 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v329 | PS_110_130 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v330 | PS_110_131 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v331 | PS_110_132 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v332 | PS_110_133 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v333 | PS_110_134 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v334 | PS_110_135 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v335 | PS_110_136 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v336 | PS_110_137 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v337 | PS_110_138 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v338 | PS_110_139 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v339 | PS_110_140 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v340 | PS_110_141 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v341 | PS_110_142 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v342 | PS_110_143 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v343 | PS_110_144 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v344 | PS_110_145 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v345 | PS_110_146 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v346 | PS_110_147 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v347 | PS_110_148 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v348 | PS_110_149 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v349 | PS_110_150 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v350 | PS_110_151 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v351 | PS_110_152 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |

| | | | | | | | |
|------|------------|---|----|----|-------|------|--------|
| v352 | PS_110_153 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v353 | PS_110_154 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v354 | PS_110_155 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v355 | PS_110_156 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v356 | PS_110_157 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v357 | PS_110_158 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v358 | PS_110_159 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v359 | PS_110_160 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v360 | PS_110_161 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v361 | PS_110_162 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v362 | PS_110_163 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v363 | PS_110_164 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v364 | PS_110_165 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v365 | PS_110_166 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v366 | PS_110_167 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v367 | PS_110_168 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v368 | PS_110_169 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v369 | PS_110_170 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v370 | PS_110_171 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v371 | PS_110_172 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v372 | PS_110_173 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v373 | PS_110_174 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v374 | PS_110_175 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v375 | PS_110_176 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v376 | PS_110_177 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v377 | PS_110_178 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v378 | PS_110_179 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v379 | PS_110_180 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v380 | PS_110_181 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v381 | PS_110_182 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |
| v382 | PS_110_183 | 2 | 25 | 40 | 2x120 | 2x28 | 110 kB |
| v383 | PS_110_184 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v384 | PS_110_185 | 2 | 40 | 64 | 2x171 | 2x48 | 110 kB |
| v385 | PS_110_186 | 2 | 10 | 16 | 2x66 | 2x12 | 110 kB |

ДОДАТОК Б

Властивості множини ребер ярусного графу

| Ребро | Довжина, км | Перетин | Резервування | Макси- мальні втрати в лінії, кВт | Вартість 1 км, грн/км | Нап- руга в лінії, кВ |
|-----------|----------------|---------------|---------------------|---|--------------------------|-----------------------------------|
| e (1,30) | 289 | 4хАСУ-400 | | 9407 | 4х230000 | 750 |
| e (1,31) | 222 | 4хАС-400/93 | | 2600 | 4х230000 | 750 |
| e (2,31) | 130 | 3хАЖС-500/336 | | 1634 | 4х270000 | 750 |
| e (2,32) | 190 | 5хАС-400/51 | | 12645 | 5х230000 | 750 |
| e (31,32) | 136 | 4хАС-400/51 | | 11350 | 4х230000 | 750 |
| e (32,33) | 138 | 4хХАСУ-400/51 | | 58467 | 4х230000 | 750 |
| e (33,34) | 213 | 5хАС-300/66 | | 18995 | 5х220000 | 750 |
| e (2,34) | 273 | 5хАС-300/66 | | 24341 | 5х220000 | 750 |
| e (2,35) | 213 | 2хАС-400/51 | | 4985 | 2х230000 | 750 |
| e (30,36) | 177 | 5хАС-400/51 | | 2950 | 5х230000 | 750 |
| e (36,37) | 126 | 4хАС-500/64 | | 7410 | 4х270000 | 750 |
| e (36,37) | 162 | 2хАС-300/39 | резерв по 330 кВ | 164023 | 2х220000 | 330 |
| e (3,36) | 261 | 5хАС-400/51 | | 4339 | 5х230000 | 750 |
| e (4,36) | 345 | 5хАС-400/51 | | 5742 | 5х230000 | 750 |
| e (3,38) | 228 | 4хАС-500/64 | | 34401 | 4х270000 | 750 |
| e (4,38) | 282 | 5хАС-400/51 | | 42323 | 5х230000 | 750 |
| e (30,38) | 361 | 4хАСУ-400 | | 67534 | 4х230000 | 750 |
| e (38,39) | 278 | 4хАС-400/93 | | 3256 | 4х230000 | 750 |
| e (33,40) | 198 | 2хАС-400 | | 2975 | 4х230000 | 500 |
| e (33,41) | 35 | 2хАС-400 | | 812 | 2х230000 | 500 |
| e (40,41) | 138 | 2хАС-400 | | 3228 | 2х230000 | 500 |
| e (39,42) | 54 | 3хАСО-400 | | 7912 | 3х230000 | 400 |
| e (13,42) | 197 | 2хАСО-500 | | 34954 | 4х270000 | 400 |
| e (1,6) | 8 | 2хАС-600/72 | | 156 | 2х300000 | 330 |
| e (1,43) | 81 | 2хАС-400/51 | | 9846 | 2х230000 | 330 |
| e (5,43) | 132 | 2хАС-300/39 | | 21468 | 2х220000 | 330 |
| e (5,30) | 77 | 2хАСО-400 | | 25950 | 2х230000 | 330 |
| e (5,30) | 77 | 2хАСО-400 | резерв | 25950 | 2х230000 | 330 |
| e (5,44) | 111 | 2хАС-400/51 | | 1495 | 2х230000 | 330 |
| e (44,45) | 147 | 2хАСО-300 | | 2649 | 2х220000 | 330 |
| e (45,46) | 104 | 2хАС-300/39 | | 11219 | 2х220000 | 330 |
| e (45,47) | 45 | 2хАСО-300 | | 2080 | 2х220000 | 330 |
| e (45,48) | 64 | 2хАС-500/64 | | 4301 | 2х270000 | 330 |
| e (47,48) | 36 | 2хАСО-400 | | 3043 | 2х230000 | 330 |
| e (48,49) | 33 | 2хАСО-300 | | 596 | 2х220000 | 330 |
| e (1,49) | 156 | 2хАС-400/51 | | 2104 | 2х230000 | 330 |
| e (49,50) | 94 | 2хАСО-300 | | 15338 | 2х220000 | 330 |
| e (30,51) | 83 | 2хАСО-300 | | 956 | 2х220000 | 330 |
| e (51,52) | 160 | 2хАСО-300 | | 9349 | 2х220000 | 330 |

| | | | | | | |
|-----------|-----|-------------|--------|-------|----------|-----|
| e (9,52) | 72 | 2xACO-300 | | 4227 | 2x220000 | 330 |
| e (30,53) | 68 | 2xACO-300 | | 1227 | 2x220000 | 330 |
| e (10,53) | 85 | 2xAC-400/51 | | 1148 | 2x230000 | 330 |
| e (10,11) | 22 | 2xACO-400 | | 3642 | 2x230000 | 330 |
| e (53,54) | 102 | 2xACO-300 | | 4131 | 2x220000 | 330 |
| e (3,54) | 119 | 2xAC-400/51 | | 3614 | 2x230000 | 330 |
| e (37,55) | 44 | 2xAC-300/51 | | 789 | 2x220000 | 330 |
| e (37,56) | 135 | 2xAC-300/39 | | 6238 | 2x220000 | 330 |
| e (56,57) | 73 | 2xACO-300 | | 7622 | 2x220000 | 330 |
| e (9,57) | 172 | 2xACO-300 | | 17927 | 2x220000 | 330 |
| e (9,12) | 91 | 2xACO-300 | | 9520 | 2x220000 | 330 |
| e (36,58) | 77 | 2xACO-300 | | 1394 | 2x220000 | 330 |
| e (36,58) | 77 | 2xACO-300 | резерв | 1394 | 2x220000 | 330 |
| e (7,58) | 28 | 2xACY-300 | | 496 | 2x220000 | 330 |
| e (7,59) | 45 | 2xACO-300 | | 2070 | 2x220000 | 330 |
| e (59,60) | 95 | 2xACO-300 | | 4372 | 2x220000 | 330 |
| e (60,61) | 107 | 2xAC-400/51 | | 1436 | 2x230000 | 330 |
| e (55,61) | 41 | 2xAC-400/51 | | 549 | 2x230000 | 330 |
| e (36,62) | 84 | 2xACO-300 | | 3872 | 2x220000 | 330 |
| e (62,63) | 34 | 2xACO-300 | | 1576 | 2x220000 | 330 |
| e (8,62) | 19 | 2xACO-300 | | 883 | 2x220000 | 330 |
| e (8,59) | 50 | 2xAC-300/39 | | 2306 | 2x220000 | 330 |
| e (9,62) | 47 | 2xACO-300 | | 2177 | 2x220000 | 330 |
| e (9,62) | 47 | 2xACO-300 | резерв | 2177 | 2x220000 | 330 |
| e (12,64) | 79 | 2xACO-300 | | 3642 | 2x220000 | 330 |
| e (64,65) | 18 | 2xACO-300 | | 332 | 2x220000 | 330 |
| e (15,65) | 124 | 2xACO-300 | | 2235 | 2x220000 | 330 |
| e (57,66) | 128 | 2xACO-300 | | 2318 | 2x220000 | 330 |
| e (3,66) | 49 | 2xACO-300 | | 892 | 2x220000 | 330 |
| e (3,67) | 69 | 2xACO-300 | | 8360 | 2x220000 | 330 |
| e (4,67) | 97 | 2xAC-400/51 | | 8827 | 2x230000 | 330 |
| e (38,67) | 233 | 2xAC-300/39 | | 28448 | 2x220000 | 330 |
| e (67,68) | 176 | 2xAC-300/39 | | 3176 | 2x220000 | 330 |
| e (38,13) | 42 | 2xACO-500 | | 65892 | 2x270000 | 330 |
| e (38,13) | 42 | 2xACO-500 | резерв | 65892 | 2x270000 | 330 |
| e (38,69) | 54 | 2xAC-300/39 | | 966 | 2x220000 | 330 |
| e (69,70) | 25 | 2xAC-300/39 | | 283 | 2x220000 | 330 |
| e (69,71) | 23 | 2xAC-300/39 | | 8520 | 2x220000 | 330 |
| e (38,71) | 48 | 2xACO-400 | | 13229 | 2x230000 | 330 |
| e (38,71) | 48 | 2xACO-400 | резерв | 13229 | 2x230000 | 330 |
| e (67,72) | 11 | 2xACO-300 | | 908 | 2x220000 | 330 |
| e (4,72) | 85 | 2xAC-400/51 | | 5046 | 2x230000 | 330 |
| e (4,73) | 88 | 2xAC-400/51 | | 6855 | 2x230000 | 330 |
| e (4,74) | 92 | 2xAC-400/51 | | 4004 | 2x230000 | 330 |
| e (74,75) | 77 | 2xAC-300/39 | | 2343 | 2x220000 | 330 |
| e (13,76) | 22 | 2xACO-400 | | 1190 | 2x230000 | 330 |
| e (54,76) | 97 | 2xACO-400 | | 5202 | 2x230000 | 330 |
| e (13,77) | 38 | 2xACO-500 | | 936 | 2x270000 | 330 |

| | | | | | | |
|-----------|-----|-------------|--------|--------|----------|-----|
| e (77,78) | 26 | 2xAC-240/39 | | 596 | 2x170000 | 330 |
| e (78,79) | 97 | 2xAC-240/39 | | 2184 | 2x170000 | 330 |
| e (79,80) | 83 | 2xAC-240/39 | | 4777 | 2x170000 | 330 |
| e (10,80) | 73 | 2xACO-300 | | 3395 | 2x220000 | 330 |
| e (1,50) | 108 | 2xAC-500/26 | | 10538 | 2x270000 | 330 |
| e (16,50) | 148 | 2xAC-300/39 | | 23990 | 2x220000 | 330 |
| e (1,81) | 122 | 2xAC-400/51 | | 6580 | 2x230000 | 330 |
| e (1,81) | 122 | 2xAC-400/51 | резерв | 6580 | 2x230000 | 330 |
| e (81,82) | 77 | 2xAC-300/39 | | 1398 | 2x220000 | 330 |
| e (1,83) | 148 | 2xAC-400/51 | | 5102 | 2x230000 | 330 |
| e (82,83) | 136 | 2xAC-400/51 | | 4691 | 2x230000 | 330 |
| e (31,82) | 46 | 2xAC-500/64 | | 495 | 2x270000 | 330 |
| e (31,84) | 6 | 2xAC-240/39 | | 136 | 2x170000 | 330 |
| e (31,85) | 53 | 2xAC-400/51 | | 8686 | 2x230000 | 330 |
| e (31,86) | 97 | 2xAC-300/39 | | 7031 | 2x220000 | 330 |
| e (31,87) | 46 | 2xAC-400/51 | | 3154 | 2x230000 | 330 |
| e (15,86) | 55 | 2xACO-300 | | 3972 | 2x220000 | 330 |
| e (15,85) | 116 | 2xAC-300/39 | | 25689 | 2x220000 | 330 |
| e (82,85) | 17 | 2xAC-400/51 | | 2853 | 2x230000 | 330 |
| e (85,88) | 36 | 2xAC-400/51 | | 1928 | 2x230000 | 330 |
| e (16,88) | 47 | 2xAC-400/51 | | 2527 | 2x230000 | 330 |
| e (85,89) | 41 | 2xACO-480 | | 8786 | 2x240000 | 330 |
| e (85,89) | 41 | 2xACO-480 | резерв | 8786 | 2x240000 | 330 |
| e (16,89) | 35 | 2xAC-400/51 | | 7625 | 2x230000 | 330 |
| e (16,89) | 35 | 2xAC-400/51 | резерв | 7625 | 2x230000 | 330 |
| e (17,85) | 126 | AC-400/93 | | 41521 | 230000 | 330 |
| e (85,90) | 116 | 2xAC-300/39 | | 33553 | 2x220000 | 330 |
| e (17,90) | 46 | AC-400/93 | | 19618 | 230000 | 330 |
| e (87,90) | 15 | 2xAC-400/51 | | 3127 | 2x230000 | 330 |
| e (16,91) | 42 | 2xAC-400/51 | | 9111 | 2x230000 | 330 |
| e (16,91) | 42 | 2xAC-400/51 | резерв | 9111 | 2x230000 | 330 |
| e (90,92) | 19 | 2xAC-400/51 | | 249 | 2x230000 | 330 |
| e (17,92) | 46 | 2xAC-300/39 | | 822 | 2x220000 | 330 |
| e (32,92) | 90 | 2xAC-300/39 | | 1628 | 2x220000 | 330 |
| e (32,93) | 44 | 2xAC-400/51 | | 5331 | 2x230000 | 330 |
| e (32,93) | 44 | 2xAC-400/51 | резерв | 5331 | 2x230000 | 330 |
| e (93,94) | 15 | 2xAC-300/39 | | 276 | 2x220000 | 330 |
| e (94,95) | 65 | 2xAC-300/39 | | 29458 | 2x220000 | 330 |
| e (16,95) | 57 | 2xAC-400/51 | | 19166 | 2x230000 | 330 |
| e (16,35) | 63 | 2xAC-400/51 | | 7691 | 2x230000 | 330 |
| e (93,96) | 94 | 2xAC-300/39 | | 1703 | 2x220000 | 330 |
| e (19,32) | 178 | 2xAC-500/64 | | 122993 | 2x270000 | 330 |
| e (18,32) | 150 | 2xAC-400/93 | | 128662 | 2x230000 | 330 |
| e (2,19) | 5 | 3xAC-600 | | 5688 | 3x300000 | 330 |
| e (19,97) | 34 | 2xAC-500/64 | | 371 | 2x270000 | 330 |
| e (19,97) | 34 | 2xAC-500/64 | резерв | 371 | 2x270000 | 330 |
| e (95,97) | 12 | 2xAC-600/72 | | 110 | 2x300000 | 330 |
| e (95,97) | 12 | 2xAC-600/72 | резерв | 110 | 2x300000 | 330 |

| | | | | | | |
|-------------|-----|--------------|--------|-------|----------|-----|
| e (18,98) | 29 | ACO-500 | | 631 | 270000 | 330 |
| e (18,98) | 29 | ACO-500 | резерв | 631 | 270000 | 330 |
| e (18,99) | 56 | 2xACO-400 | | 756 | 2x230000 | 330 |
| e (23,33) | 56 | 2xACO-400 | | 16140 | 2x230000 | 330 |
| e (21,33) | 18 | 2xACO-400 | | 79905 | 2x230000 | 330 |
| e (21,33) | 18 | 2xACO-400 | | 79905 | 2x230000 | 330 |
| e (21,33) | 18 | 2xACO-400 | резерв | 79905 | 2x230000 | 330 |
| e (98,100) | 4 | 2xACO-400 | | 53 | 2x230000 | 330 |
| e (98,100) | 4 | 2xACO-400 | резерв | 53 | 2x230000 | 330 |
| e (100,101) | 37 | 2xACO-400 | | 503 | 2x230000 | 330 |
| e (99,101) | 60 | 2xACO-400 | | 803 | 2x230000 | 330 |
| e (34,101) | 22 | 2xAC-400/51 | | 302 | 2x230000 | 330 |
| e (34,101) | 22 | 2xAC-400/51 | резерв | 302 | 2x230000 | 330 |
| e (101,102) | 14 | 2xAC-300/39 | | 126 | 2x220000 | 330 |
| e (34,102) | 18 | 2xAC-300/39 | | 162 | 2x220000 | 330 |
| e (20,100) | 4 | 2xAC-500 | | 22 | 2x270000 | 330 |
| e (20,103) | 9 | 2xAC-500 | | 244 | 2x270000 | 330 |
| e (98,104) | 4 | 2xACO-400 | | 56 | 2x230000 | 330 |
| e (21,104) | 72 | 2xAC-400 | | 970 | 2x230000 | 330 |
| e (21,105) | 52 | 2xAC-500 | | 1429 | 2x270000 | 330 |
| e (21,106) | 37 | 2xAC-500 | | 400 | 2x270000 | 330 |
| e (21,106) | 37 | 2xAC-500 | резерв | 400 | 2x270000 | 330 |
| e (22,107) | 154 | 2xACO-300 | | 2771 | 2x220000 | 330 |
| e (86,107) | 89 | 2xACO-300/39 | | 1600 | 2x220000 | 330 |
| e (86,108) | 109 | 2xAC-300/39 | | 5056 | 2x220000 | 330 |
| e (107,109) | 173 | 2xAC-300/39 | | 49943 | 2x220000 | 330 |
| e (108,109) | 89 | 2xAC-300/39 | | 25737 | 2x220000 | 330 |
| e (109,110) | 92 | 2xAC-300/39 | | 5393 | 2x220000 | 330 |
| e (110,111) | 17 | 2xAC-300/39 | | 994 | 2x220000 | 330 |
| e (111,112) | 132 | 2xACO-300 | | 5370 | 2x220000 | 330 |
| e (112,113) | 91 | 2xAC-300/39 | | 3692 | 2x220000 | 330 |
| e (112,114) | 94 | 2xACO-300 | | 4321 | 2x220000 | 330 |
| e (111,115) | 153 | 2xACO-400 | | 11895 | 2x230000 | 330 |
| e (22,115) | 61 | 2xACO-480 | | 4700 | 2x240000 | 330 |
| e (22,115) | 61 | 2xACO-480 | резерв | 4700 | 2x240000 | 330 |
| e (115,116) | 71 | 2xACO-400 | | 2436 | 2x230000 | 330 |
| e (22,116) | 60 | 2xACO-400 | | 2057 | 2x230000 | 330 |
| e (22,117) | 61 | 2xACO-400 | | 827 | 2x230000 | 330 |
| e (22,117) | 61 | 2xACO-400 | резерв | 827 | 2x230000 | 330 |
| e (22,118) | 38 | 2xACO-300 | | 679 | 2x220000 | 330 |
| e (22,23) | 38 | 2xACO-500 | | 7888 | 2x270000 | 330 |
| e (118,119) | 67 | 2xAC-300/39 | | 1202 | 2x220000 | 330 |
| e (106,119) | 127 | 2xAC-400/51 | | 1711 | 2x230000 | 330 |
| e (106,120) | 50 | 2xACO-400 | | 670 | 2x230000 | 330 |
| e (120,121) | 105 | 2xAC-400/51 | | 8837 | 2x230000 | 330 |
| e (17,121) | 66 | 2xACO-300/48 | | 7436 | 2x220000 | 330 |
| e (23,122) | 97 | 2xACO-300 | | 4488 | 2x220000 | 330 |
| e (23,123) | 39 | 2xACO-500 | | 1090 | 2x270000 | 330 |

| | | | | | | |
|-------------|-----|--------------|--------|-------|----------|-----|
| e (106,123) | 24 | 2xACO-500 | | 655 | 2x270000 | 330 |
| e (50,124) | 41 | 2xAC-300/39 | | 2602 | 2x220000 | 330 |
| e (124,125) | 76 | 2xAC-300/39 | | 4815 | 2x220000 | 330 |
| e (35,125) | 55 | 2xACO-300 | | 3831 | 2x220000 | 330 |
| e (19,96) | 102 | 2xAC-500/64 | | 1107 | 2x270000 | 330 |
| e (126,127) | 200 | 2xAC-300/39 | | 9257 | 2x220000 | 330 |
| e (19,35) | 195 | 2xAC-400/51 | | 23667 | 2x230000 | 330 |
| e (35,128) | 137 | 2xAC-400/51 | | 1842 | 2x230000 | 330 |
| e (35,127) | 153 | 2xAC-400/51 | | 5259 | 2x230000 | 330 |
| e (127,128) | 14 | 2xAC-400/51 | | 183 | 2x230000 | 330 |
| e (127,129) | 97 | 2xAC-400/51 | | 1312 | 2x230000 | 330 |
| e (25,129) | 137 | 2xAC-400/51 | | 1842 | 2x230000 | 330 |
| e (25,130) | 4 | 2xAC-400/51 | | 55 | 2x230000 | 330 |
| e (25,130) | 4 | 2xAC-400/51 | резерв | 61 | 2x230000 | 330 |
| e (25,131) | 31 | 2xAC-400/51 | | 1058 | 2x230000 | 330 |
| e (24,127) | 69 | 2xACO-400/51 | | 2390 | 2x230000 | 330 |
| e (50,132) | 95 | 2xAC-300/39 | | 979 | 2x220000 | 220 |
| e (132,133) | 27 | 2xAC-300/39 | | 305 | 2x220000 | 220 |
| e (23,134) | 23 | ACO-400 | | 1371 | 230000 | 220 |
| e (23,134) | 23 | ACO-400 | резерв | 1371 | 230000 | 220 |
| e (41,98) | 106 | 2xAC-400 | | 3207 | 2x230000 | 220 |
| e (41,98) | 106 | 2xAC-400 | резерв | 3207 | 2x230000 | 220 |
| e (40,135) | 39 | 2xACO-400 | | 1184 | 2x230000 | 220 |
| e (40,136) | 12 | 2xACO-400 | | 373 | 2x230000 | 220 |
| e (27,40) | 143 | 2xACO-400 | | 11061 | 2x230000 | 220 |
| e (41,105) | 15 | 2xAC-400 | | 1134 | 2x230000 | 220 |
| e (98,137) | 7 | 2xACO-400 | | 55 | 2x230000 | 220 |
| e (98,137) | 7 | 2xACO-400 | резерв | 55 | 2x230000 | 220 |
| e (26,98) | 21 | 2x400/51 | | 651 | 2x230000 | 220 |
| e (26,98) | 21 | 2x400/51 | резерв | 651 | 2x230000 | 220 |
| e (26,138) | 55 | AC-400/51 | | 8469 | 230000 | 220 |
| e (26,138) | 55 | AC-400/51 | | 8469 | 230000 | 220 |
| e (26,138) | 55 | AC-400/51 | резерв | 8469 | 230000 | 220 |
| e (26,139) | 47 | 2xAC-400/51 | | 1435 | 2x230000 | 220 |
| e (26,140) | 18 | 2xAC-400/51 | | 541 | 2x230000 | 220 |
| e (27,105) | 59 | 2xAC-400/51 | | 4555 | 2x230000 | 220 |
| e (27,105) | 59 | 2xAC-400/51 | | 4555 | 2x230000 | 220 |
| e (27,105) | 59 | 2xAC-400/51 | резерв | 4555 | 2x230000 | 220 |
| e (27,105) | 59 | 2xAC-400/51 | резерв | 4555 | 2x230000 | 220 |
| e (27,40) | 143 | 2xAC-400 | | 11061 | 2x230000 | 220 |
| e (29,105) | 33 | 2xACO-400 | | 2590 | 2x230000 | 220 |
| e (105,141) | 39 | 2xAC-400 | | 3055 | 2x230000 | 220 |
| e (27,142) | 66 | 2xACO-400 | | 950 | 2x230000 | 220 |
| e (27,143) | 13 | 2xAC-400 | | 431 | 2x230000 | 220 |
| e (27,143) | 13 | 2xAC-400 | резерв | 431 | 2x230000 | 220 |
| e (27,144) | 34 | 2xAC-400 | | 1025 | 2x230000 | 220 |
| e (27,144) | 34 | 2xAC-400 | резерв | 1025 | 2x230000 | 220 |
| e (127,145) | 143 | 2xAC-400 | | 4339 | 2x230000 | 220 |

| | | | | | | |
|-------------|-----|--------------|--------|-------|----------|-----|
| e (35,145) | 174 | 2xAC-400 | | 5282 | 2x230000 | 220 |
| e (145,146) | 37 | 2xACO-400 | | 2878 | 2x230000 | 220 |
| e (127,146) | 63 | 2xACO-400 | | 4870 | 2x230000 | 220 |
| e (146,147) | 4 | 2xAC-300/39 | | 150 | 2x220000 | 220 |
| e (146,147) | 4 | 2xAC-300/39 | резерв | 150 | 2x220000 | 220 |
| e (146,148) | 174 | 2xACO-400 | | 13525 | 2x230000 | 220 |
| e (28,149) | 27 | 2xACO-300/39 | | 564 | 2x220000 | 220 |
| e (149,150) | 17 | 2xAC-300/39 | | 678 | 2x220000 | 220 |
| e (127,150) | 13 | 2xACO-300/39 | | 53 | 2x220000 | 220 |
| e (127,151) | 13 | 2xAC-400 | | 1016 | 2x230000 | 220 |
| e (151,152) | 27 | 2xACO-400 | | 2075 | 2x230000 | 220 |
| e (131,152) | 83 | 2xACO-400 | | 6419 | 2x230000 | 220 |
| e (131,153) | 20 | 2xACO-400 | | 593 | 2x230000 | 220 |
| e (130,153) | 14 | 2xACO-400 | | 429 | 2x230000 | 220 |
| e (152,154) | 27 | 2xACO-400 | | 811 | 2x230000 | 220 |
| e (152,154) | 27 | 2xACO-400 | резерв | 892 | 2x230000 | 220 |
| e (154,155) | 85 | 2xAC-400 | | 6560 | 2x230000 | 220 |
| e (154,155) | 85 | 2xAC-400 | резерв | 6560 | 2x230000 | 220 |
| e (155,156) | 24 | 2xAC-400 | | 718 | 2x230000 | 220 |
| e (155,156) | 24 | 2xAC-400 | резерв | 718 | 2x230000 | 220 |
| e (155,157) | 25 | 2xAC-400 | | 766 | 2x230000 | 220 |
| e (155,157) | 25 | 2xAC-400 | резерв | 766 | 2x230000 | 220 |
| e (155,158) | 32 | 2xACO-400 | | 954 | 2x230000 | 220 |
| e (72,73) | 58 | 2xACO-300 | | 13505 | 2x220000 | 220 |
| e (73,159) | 20 | ACO-400 | | 1224 | 230000 | 220 |
| e (74,159) | 81 | ACO-240 | | 8234 | 170000 | 220 |
| e (14,159) | 91 | ACO-400 | | 5537 | 230000 | 220 |
| e (14,75) | 63 | ACO-400 | | 5118 | 230000 | 220 |
| e (14,71) | 64 | ACO-500 | | 64155 | 270000 | 220 |
| e (14,71) | 64 | ACO-500 | резерв | 64155 | 270000 | 220 |
| e (14,68) | 75 | ACO-300 | | 6052 | 220000 | 220 |
| e (71,160) | 26 | AC-500 | | 4993 | 270000 | 220 |
| e (71,160) | 26 | AC-500 | резерв | 4993 | 270000 | 220 |
| e (71,161) | 36 | AC-500 | | 6982 | 270000 | 220 |
| e (71,161) | 36 | AC-500 | резерв | 6982 | 270000 | 220 |
| e (71,162) | 62 | AC-500 | | 11995 | 270000 | 220 |
| e (71,162) | 62 | AC-500 | резерв | 11995 | 270000 | 220 |
| e (42,162) | 146 | AC-500 | | 28379 | 270000 | 220 |
| e (42,162) | 146 | AC-500 | резерв | 28379 | 270000 | 220 |
| e (13,162) | 60 | ACO-500 | | 11741 | 270000 | 220 |
| e (13,162) | 60 | ACO-500 | резерв | 11741 | 270000 | 220 |
| e (13,163) | 31 | AC-400/51 | | 4738 | 230000 | 220 |
| e (13,163) | 31 | AC-400/51 | резерв | 4738 | 230000 | 220 |
| e (162,164) | 42 | ACO-400 | | 2529 | 230000 | 220 |
| e (42,165) | 42 | ACO-500 | | 8114 | 270000 | 220 |
| e (42,165) | 42 | ACO-500 | резерв | 8114 | 270000 | 220 |
| e (42,166) | 81 | ACO-300 | | 1688 | 220000 | 220 |
| e (42,166) | 81 | ACO-300 | резерв | 1688 | 220000 | 220 |

| | | | | | | |
|-------------|-----|----------|---------------------|--------|----------|-----|
| e (1,167) | 34 | AC-185 | | 35 | 150000 | 150 |
| e (1,168) | 63 | AC-185 | | 276 | 150000 | 150 |
| e (1,169) | 37 | 2xAC-185 | | 7431 | 2x150000 | 150 |
| e (50,124) | 121 | AC-185 | резера по 150 кВ | 120632 | 150000 | 150 |
| e (50,169) | 66 | AC-120 | | 121 | 120000 | 150 |
| e (50,170) | 64 | AC-300 | | 11 | 220000 | 150 |
| e (50,171) | 69 | AC-240 | | 9698 | 170000 | 150 |
| e (170,171) | 27 | AC-150 | | 6052 | 135000 | 150 |
| e (50,172) | 24 | AC-300 | | 164 | 220000 | 150 |
| e (50,172) | 24 | AC-300 | резерв | 164 | 220000 | 150 |
| e (172,173) | 36 | AC-300 | | 254 | 220000 | 150 |
| e (173,174) | 9 | AC-300 | | 154 | 220000 | 150 |
| e (174,175) | 5 | AC-300 | | 85 | 220000 | 150 |
| e (175,176) | 16 | AC-300 | | 284 | 220000 | 150 |
| e (176,177) | 24 | AC-185 | | 689 | 150000 | 150 |
| e (177,178) | 29 | AC-185 | | 1848 | 150000 | 150 |
| e (125,178) | 25 | AC-300 | | 974 | 220000 | 150 |
| e (125,178) | 25 | AC-300 | резерв | 974 | 220000 | 150 |
| e (178,179) | 8 | AC-185 | | 505 | 150000 | 150 |
| e (178,180) | 16 | AC-185 | | 311 | 150000 | 150 |
| e (180,181) | 19 | AC-185 | | 557 | 150000 | 150 |
| e (181,182) | 24 | AC-185 | | 275 | 150000 | 150 |
| e (182,183) | 51 | AC-185 | | 576 | 150000 | 150 |
| e (183,184) | 32 | ACO-300 | | 222 | 220000 | 150 |
| e (183,184) | 32 | ACO-300 | резерв | 222 | 220000 | 150 |
| e (35,183) | 3 | ACO-300 | | 4890 | 220000 | 150 |
| e (35,183) | 3 | ACO-300 | резерв | 4890 | 220000 | 150 |
| e (35,185) | 42 | ACO-400 | | 2701 | 230000 | 150 |
| e (35,185) | 42 | ACO-400 | резерв | 2701 | 230000 | 150 |
| e (35,186) | 42 | AC-185 | | 1210 | 150000 | 150 |
| e (186,187) | 57 | AC-150 | | 794 | 135000 | 150 |
| e (187,188) | 64 | AC-150 | | 578 | 135000 | 150 |
| e (35,188) | 60 | AC-185 | | 432 | 150000 | 150 |
| e (35,189) | 44 | AC-185 | | 1268 | 150000 | 150 |
| e (189,190) | 64 | AC-185 | | 1847 | 150000 | 150 |
| e (190,191) | 47 | AC-150 | | 278 | 135000 | 150 |
| e (190,192) | 35 | AC-185 | | 394 | 150000 | 150 |
| e (190,193) | 39 | AC-240 | | 869 | 170000 | 150 |
| e (190,193) | 39 | AC-240 | | 869 | 170000 | 150 |
| e (124,194) | 52 | AC-185 | | 427 | 150000 | 150 |
| e (194,195) | 24 | AC-185 | | 106 | 150000 | 150 |
| e (195,196) | 45 | AC-185 | | 510 | 150000 | 150 |
| e (196,197) | 24 | AC-185 | | 979 | 150000 | 150 |
| e (197,198) | 62 | AC-185 | | 696 | 150000 | 150 |
| e (124,198) | 11 | AC-185 | | 128 | 150000 | 150 |
| e (124,199) | 24 | AC-300 | | 166 | 220000 | 150 |
| e (124,199) | 24 | AC-300 | резерв | 166 | 220000 | 150 |

| | | | | | | |
|-------------|----|---------|--------|--------|--------|-----|
| e (175,199) | 8 | AC-300 | | 54 | 220000 | 150 |
| e (175,199) | 8 | AC-300 | резерв | 54 | 220000 | 150 |
| e (49,200) | 45 | AC-240 | | 312 | 170000 | 110 |
| e (49,200) | 45 | AC-240 | резерв | 312 | 170000 | 110 |
| e (49,201) | 20 | ACK-120 | | 659 | 120000 | 110 |
| e (49,201) | 20 | ACK-120 | резерв | 659 | 120000 | 110 |
| e (201,202) | 4 | ACK-120 | | 24 | 120000 | 110 |
| e (201,202) | 4 | ACK-120 | резерв | 24 | 120000 | 110 |
| e (49,133) | 15 | ACK-240 | | 1665 | 170000 | 110 |
| e (49,133) | 15 | ACK-240 | резерв | 1665 | 170000 | 110 |
| e (49,203) | 12 | ACK-120 | | 604 | 120000 | 110 |
| e (133,203) | 23 | ACK-240 | | 595 | 170000 | 110 |
| e (49,204) | 12 | ACK-120 | | 381 | 120000 | 110 |
| e (49,205) | 12 | ACK-120 | | 583 | 120000 | 110 |
| e (204,205) | 1 | ACK-120 | | 42 | 120000 | 110 |
| e (133,204) | 23 | ACK-240 | | 381 | 170000 | 110 |
| e (133,206) | 7 | AC-185 | | 53 | 150000 | 110 |
| e (133,206) | 7 | AC-185 | резерв | 53 | 150000 | 110 |
| e (133,207) | 2 | AC-120 | | 141 | 120000 | 110 |
| e (133,207) | 2 | AC-120 | резерв | 141 | 120000 | 110 |
| e (133,208) | 8 | AC-95 | | 315 | 100000 | 110 |
| e (133,208) | 8 | AC-95 | резерв | 315 | 100000 | 110 |
| e (208,209) | 9 | AC-185 | | 490 | 150000 | 110 |
| e (133,209) | 5 | AC-185 | | 242 | 150000 | 110 |
| e (209,210) | 4 | AC-185 | | 133 | 150000 | 110 |
| e (210,211) | 1 | AC-185 | | 14 | 150000 | 110 |
| e (211,212) | 3 | ACK-185 | | 8 | 150000 | 110 |
| e (48,212) | 6 | ACK-185 | | 22 | 150000 | 110 |
| e (47,48) | 46 | AC-240 | | 116393 | 170000 | 110 |
| e (48,213) | 6 | ACK-185 | | 741 | 150000 | 110 |
| e (48,213) | 6 | ACK-185 | резерв | 741 | 150000 | 110 |
| e (213,214) | 5 | AC-185 | | 100 | 150000 | 110 |
| e (214,215) | 1 | AC-185 | | 29 | 150000 | 110 |
| e (215,216) | 4 | AC-185 | | 1156 | 150000 | 110 |
| e (216,217) | 7 | AC-185 | | 350 | 150000 | 110 |
| e (48,217) | 9 | AC-185 | | 509 | 150000 | 110 |
| e (217,218) | 7 | AC-185 | | 56 | 150000 | 110 |
| e (48,218) | 3 | AC-185 | | 22 | 150000 | 110 |
| e (48,219) | 4 | AC-120 | | 300 | 120000 | 110 |
| e (48,219) | 4 | AC-120 | резерв | 300 | 120000 | 110 |
| e (219,220) | 23 | AC-120 | | 319 | 120000 | 110 |
| e (47,220) | 3 | AC-150 | | 35 | 135000 | 110 |
| e (48,221) | 3 | AC-150 | | 163 | 135000 | 110 |
| e (48,221) | 3 | AC-150 | резерв | 36 | 135000 | 110 |
| e (221,222) | 14 | AC-150 | | 155 | 135000 | 110 |
| e (221,222) | 14 | AC-150 | резерв | 155 | 135000 | 110 |
| e (47,222) | 28 | AC-240 | | 195 | 170000 | 110 |
| e (47,222) | 28 | AC-240 | резерв | 195 | 170000 | 110 |

| | | | | | | |
|-------------|-----|-----------|--------|---------|--------|-----|
| e (48,223) | 2 | AC-185 | | 84 | 150000 | 110 |
| e (223,224) | 23 | AC-185 | | 480 | 150000 | 110 |
| e (224,225) | 7 | AC-185 | | 144 | 150000 | 110 |
| e (47,225) | 23 | AC-240 | | 373 | 170000 | 110 |
| e (48,226) | 40 | AC-120 | | 3323 | 120000 | 110 |
| e (226,227) | 27 | AC-95 | | 1095 | 100000 | 110 |
| e (47,227) | 19 | AC-185 | | 410 | 150000 | 110 |
| e (47,228) | 10 | AC-150 | | 114 | 135000 | 110 |
| e (47,229) | 9 | AC-120 | | 119 | 120000 | 110 |
| e (47,229) | 9 | AC-120 | резерв | 119 | 120000 | 110 |
| e (47,230) | 44 | AC-185 | | 6110 | 150000 | 110 |
| e (47,230) | 44 | AC-185 | резерв | 6110 | 150000 | 110 |
| e (230,231) | 6 | AC-185 | | 344 | 150000 | 110 |
| e (230,231) | 6 | AC-185 | резерв | 344 | 150000 | 110 |
| e (216,231) | 3 | AC-185 | | 180 | 150000 | 110 |
| e (216,232) | 1 | AC-185 | | 38 | 150000 | 110 |
| e (232,233) | 4 | AC-185 | | 94 | 150000 | 110 |
| e (230,233) | 5 | AC-185 | | 106 | 150000 | 110 |
| e (47,234) | 29 | AC-185 | | 601 | 150000 | 110 |
| e (234,235) | 1 | AC-120 | | 2 | 120000 | 110 |
| e (235,236) | 25 | AC-120 | | 344 | 120000 | 110 |
| e (236,237) | 15 | AC-185 | | 49 | 150000 | 110 |
| e (227,237) | 33 | AC-185 | | 112 | 150000 | 110 |
| e (227,238) | 30 | AC-185 | | 270 | 150000 | 110 |
| e (45,238) | 46 | AC-185/24 | | 410 | 150000 | 110 |
| e (46,238) | 63 | AC-185 | | 558 | 150000 | 110 |
| e (238,239) | 25 | AC-120 | | 826 | 120000 | 110 |
| e (239,240) | 23 | AC-120 | | 316 | 120000 | 110 |
| e (240,241) | 6 | AC-150 | | 165 | 135000 | 110 |
| e (241,242) | 9 | AC-150 | | 6 | 135000 | 110 |
| e (242,243) | 17 | AC-120 | | 543 | 120000 | 110 |
| e (243,244) | 38 | AC-120 | | 1247 | 120000 | 110 |
| e (46,244) | 30 | AC-150 | | 779 | 135000 | 110 |
| e (45,245) | 19 | AC-120 | | 257 | 120000 | 110 |
| e (45,245) | 19 | AC-120 | резерв | 257 | 120000 | 110 |
| e (226,245) | 52 | AC-120 | | 716 | 120000 | 110 |
| e (169,246) | 10 | AC-150 | | 634 | 135000 | 110 |
| e (246,247) | 36 | AC-150 | | 935 | 135000 | 110 |
| e (247,248) | 14 | AC-150 | | 1543219 | 135000 | 110 |
| e (248,249) | 17 | AC-185 | | 126 | 150000 | 110 |
| e (249,250) | 34 | AC-185 | | 4976 | 150000 | 110 |
| e (250,251) | 109 | AC-185 | | 965 | 150000 | 110 |
| e (45,251) | 29 | AC-185/24 | | 258 | 150000 | 110 |
| e (251,252) | 40 | AC-150 | | 439 | 135000 | 110 |
| e (248,253) | 43 | AC-185 | | 68 | 150000 | 110 |
| e (253,254) | 28 | AC-185 | | 94 | 150000 | 110 |
| e (254,255) | 35 | AC-185 | | 261 | 150000 | 110 |
| e (255,256) | 35 | AC-120 | | 2923 | 120000 | 110 |

| | | | | | | |
|-------------|----|--------|--------|------|--------|-----|
| e (44,256) | 28 | AC-185 | | 1495 | 150000 | 110 |
| e (46,257) | 33 | AC-185 | | 293 | 150000 | 110 |
| e (257,258) | 14 | AC-120 | | 464 | 120000 | 110 |
| e (258,259) | 38 | AC-120 | | 785 | 120000 | 110 |
| e (259,260) | 35 | AC-120 | | 484 | 120000 | 110 |
| e (260,261) | 45 | AC-150 | | 1185 | 135000 | 110 |
| e (261,262) | 10 | AC-185 | | 217 | 150000 | 110 |
| e (261,262) | 10 | AC-185 | резерв | 217 | 150000 | 110 |
| e (261,262) | 10 | AC-185 | | 217 | 150000 | 110 |
| e (262,263) | 29 | AC-120 | | 150 | 120000 | 110 |
| e (263,264) | 35 | AC-150 | | 145 | 135000 | 110 |
| e (44,265) | 36 | AC-185 | | 1921 | 150000 | 110 |
| e (44,266) | 46 | AC-185 | | 972 | 150000 | 110 |
| e (44,267) | 15 | AC-120 | | 472 | 120000 | 110 |
| e (44,267) | 15 | AC-120 | резерв | 472 | 120000 | 110 |
| e (44,268) | 18 | AC-150 | | 1187 | 135000 | 110 |
| e (44,268) | 18 | AC-150 | резерв | 1187 | 135000 | 110 |
| e (44,269) | 13 | AC-120 | | 1052 | 120000 | 110 |
| e (44,269) | 13 | AC-120 | резерв | 1052 | 120000 | 110 |
| e (43,264) | 57 | AC-150 | | 238 | 135000 | 110 |
| e (51,270) | 32 | AC-150 | | 133 | 135000 | 110 |
| e (51,270) | 32 | AC-150 | резерв | 133 | 135000 | 110 |
| e (52,271) | 32 | AC-150 | | 133 | 135000 | 110 |
| e (52,271) | 32 | AC-150 | резерв | 133 | 135000 | 110 |
| e (53,272) | 24 | AC-150 | | 1600 | 135000 | 110 |
| e (53,272) | 24 | AC-150 | резерв | 1600 | 135000 | 110 |
| e (54,273) | 39 | AC-185 | | 820 | 150000 | 110 |
| e (54,273) | 39 | AC-185 | резерв | 820 | 150000 | 110 |
| e (55,274) | 47 | AC-185 | | 988 | 150000 | 110 |
| e (274,275) | 21 | AC-120 | | 1749 | 120000 | 110 |
| e (275,276) | 36 | AC-120 | | 2998 | 120000 | 110 |
| e (58,276) | 53 | AC-185 | | 2853 | 150000 | 110 |
| e (59,277) | 10 | AC-120 | | 52 | 120000 | 110 |
| e (60,278) | 44 | AC-185 | | 148 | 150000 | 110 |
| e (60,278) | 44 | AC-185 | резерв | 148 | 150000 | 110 |
| e (61,279) | 19 | AC-150 | | 1267 | 135000 | 110 |
| e (62,280) | 38 | AC-185 | | 799 | 150000 | 110 |
| e (62,280) | 38 | AC-185 | резерв | 799 | 150000 | 110 |
| e (63,281) | 46 | AC-150 | | 1198 | 135000 | 110 |
| e (56,282) | 31 | AC-150 | | 2067 | 135000 | 110 |
| e (56,282) | 31 | AC-150 | резерв | 2067 | 135000 | 110 |
| e (57,283) | 28 | AC-185 | | 1507 | 150000 | 110 |
| e (283,284) | 13 | AC-120 | | 423 | 120000 | 110 |
| e (283,284) | 13 | AC-120 | резерв | 423 | 120000 | 110 |
| e (64,285) | 28 | AC-185 | | 1507 | 150000 | 110 |
| e (64,285) | 28 | AC-185 | резерв | 1507 | 150000 | 110 |
| e (65,286) | 59 | AC-185 | | 3176 | 150000 | 110 |
| e (286,287) | 11 | AC-120 | | 57 | 120000 | 110 |

| | | | | | | |
|-------------|----|--------|--------|-------|--------|-----|
| e (66,287) | 49 | AC-185 | | 165 | 150000 | 110 |
| e (67,288) | 37 | AC-150 | | 154 | 135000 | 110 |
| e (68,289) | 44 | AC-150 | | 2934 | 135000 | 110 |
| e (289,290) | 16 | AC-120 | | 520 | 120000 | 110 |
| e (69,290) | 43 | AC-150 | | 1120 | 135000 | 110 |
| e (70,291) | 39 | AC-185 | | 820 | 150000 | 110 |
| e (70,291) | 39 | AC-185 | резерв | 820 | 150000 | 110 |
| e (164,292) | 41 | AC-185 | | 2207 | 150000 | 110 |
| e (292,293) | 17 | AC-120 | | 1416 | 120000 | 110 |
| e (293,294) | 22 | AC-120 | | 716 | 120000 | 110 |
| e (162,294) | 35 | AC-185 | | 736 | 150000 | 110 |
| e (161,295) | 38 | AC-150 | | 2534 | 135000 | 110 |
| e (161,295) | 38 | AC-150 | резерв | 2534 | 135000 | 110 |
| e (160,296) | 29 | AC-185 | | 1561 | 150000 | 110 |
| e (160,296) | 29 | AC-185 | резерв | 1561 | 150000 | 110 |
| e (159,297) | 23 | AC-185 | | 77 | 150000 | 110 |
| e (297,298) | 13 | AC-120 | | 423 | 120000 | 110 |
| e (165,298) | 23 | AC-185 | | 484 | 150000 | 110 |
| e (166,299) | 64 | AC-150 | | 4268 | 135000 | 110 |
| e (166,299) | 64 | AC-150 | резерв | 4268 | 135000 | 110 |
| e (163,300) | 38 | AC-150 | | 2534 | 135000 | 110 |
| e (163,300) | 38 | AC-150 | резерв | 2534 | 135000 | 110 |
| e (76,301) | 50 | AC-150 | | 208 | 135000 | 110 |
| e (301,302) | 13 | AC-120 | | 423 | 120000 | 110 |
| e (80,302) | 39 | AC-185 | | 820 | 150000 | 110 |
| e (79,303) | 47 | AC-150 | | 3134 | 135000 | 110 |
| e (303,304) | 13 | AC-120 | | 1083 | 120000 | 110 |
| e (304,305) | 13 | AC-120 | | 68 | 120000 | 110 |
| e (305,306) | 13 | AC-120 | | 1083 | 120000 | 110 |
| e (78,306) | 38 | AC-185 | | 2045 | 150000 | 110 |
| e (77,307) | 35 | AC-185 | | 1884 | 150000 | 110 |
| e (77,307) | 35 | AC-185 | резерв | 1884 | 150000 | 110 |
| e (307,308) | 15 | AC-120 | | 488 | 120000 | 110 |
| e (307,308) | 15 | AC-120 | резерв | 488 | 120000 | 110 |
| e (308,309) | 13 | AC-120 | | 1083 | 120000 | 110 |
| e (308,309) | 13 | AC-120 | резерв | 1083 | 120000 | 110 |
| e (81,310) | 24 | AC-185 | | 1292 | 150000 | 110 |
| e (310,311) | 15 | AC-120 | | 78 | 120000 | 110 |
| e (82,311) | 27 | AC-185 | | 91 | 150000 | 110 |
| e (83,312) | 43 | AC-150 | | 1120 | 135000 | 110 |
| e (83,312) | 43 | AC-150 | резерв | 1120 | 135000 | 110 |
| e (84,313) | 13 | AC-120 | | 1083 | 120000 | 110 |
| e (85,314) | 11 | AC-120 | | 916 | 120000 | 110 |
| e (86,315) | 11 | AC-120 | | 57 | 120000 | 110 |
| e (87,316) | 27 | AC-185 | | 568 | 150000 | 110 |
| e (316,317) | 18 | AC-120 | | 14356 | 120000 | 110 |
| e (317,318) | 26 | AC-120 | | 2165 | 120000 | 110 |
| e (88,318) | 41 | AC-185 | | 2207 | 150000 | 110 |

| | | | | | | |
|-------------|----|--------|--------|------|--------|-----|
| e (89,319) | 43 | AC-150 | | 179 | 135000 | 110 |
| e (89,319) | 43 | AC-150 | резерв | 179 | 135000 | 110 |
| e (90,320) | 34 | AC-150 | | 2267 | 135000 | 110 |
| e (90,320) | 34 | AC-150 | резерв | 2267 | 135000 | 110 |
| e (91,321) | 28 | AC-150 | | 1867 | 135000 | 110 |
| e (91,321) | 28 | AC-150 | резерв | 1867 | 135000 | 110 |
| e (92,322) | 16 | AC-150 | | 417 | 135000 | 110 |
| e (92,322) | 16 | AC-150 | резерв | 417 | 135000 | 110 |
| e (93,323) | 18 | AC-185 | | 969 | 150000 | 110 |
| e (323,324) | 31 | AC-120 | | 2581 | 120000 | 110 |
| e (324,325) | 29 | AC-120 | | 151 | 120000 | 110 |
| e (94,325) | 48 | AC-185 | | 161 | 150000 | 110 |
| e (95,326) | 17 | AC-120 | | 553 | 120000 | 110 |
| e (96,327) | 39 | AC-185 | | 2099 | 150000 | 110 |
| e (327,328) | 43 | AC-150 | | 2868 | 135000 | 110 |
| e (97,328) | 52 | AC-185 | | 2799 | 150000 | 110 |
| e (98,329) | 9 | AC-120 | | 47 | 120000 | 110 |
| e (99,330) | 7 | AC-120 | | 228 | 120000 | 110 |
| e (100,331) | 26 | AC-185 | | 1399 | 150000 | 110 |
| e (331,332) | 11 | AC-150 | | 734 | 135000 | 110 |
| e (101,332) | 41 | AC-185 | | 2207 | 150000 | 110 |
| e (102,333) | 26 | AC-185 | | 87 | 150000 | 110 |
| e (333,334) | 11 | AC-150 | | 734 | 135000 | 110 |
| e (103,334) | 41 | AC-185 | | 2207 | 150000 | 110 |
| e (104,335) | 15 | AC-150 | | 1000 | 135000 | 110 |
| e (104,335) | 15 | AC-150 | резерв | 1000 | 135000 | 110 |
| e (106,336) | 22 | AC-150 | | 573 | 135000 | 110 |
| e (106,336) | 22 | AC-150 | резерв | 573 | 135000 | 110 |
| e (107,337) | 39 | AC-150 | | 2601 | 135000 | 110 |
| e (107,337) | 39 | AC-150 | резерв | 2601 | 135000 | 110 |
| e (108,338) | 51 | AC-150 | | 3401 | 135000 | 110 |
| e (108,338) | 51 | AC-150 | резерв | 3401 | 135000 | 110 |
| e (109,339) | 27 | AC-185 | | 91 | 150000 | 110 |
| e (339,340) | 13 | AC-150 | | 339 | 135000 | 110 |
| e (110,340) | 48 | AC-185 | | 1009 | 150000 | 110 |
| e (111,341) | 37 | AC-185 | | 1991 | 150000 | 110 |
| e (341,342) | 49 | AC-150 | | 3268 | 135000 | 110 |
| e (112,342) | 58 | AC-185 | | 3122 | 150000 | 110 |
| e (113,343) | 38 | AC-185 | | 128 | 150000 | 110 |
| e (113,343) | 38 | AC-185 | резерв | 128 | 150000 | 110 |
| e (114,344) | 29 | AC-185 | | 610 | 150000 | 110 |
| e (344,345) | 47 | AC-150 | | 3134 | 135000 | 110 |
| e (115,345) | 13 | AC-185 | | 700 | 150000 | 110 |
| e (116,346) | 27 | AC-185 | | 1453 | 150000 | 110 |
| e (116,346) | 27 | AC-185 | резерв | 1453 | 150000 | 110 |
| e (117,347) | 46 | AC-185 | | 155 | 150000 | 110 |
| e (117,347) | 46 | AC-185 | резерв | 155 | 150000 | 110 |
| e (118,348) | 18 | AC-185 | | 969 | 150000 | 110 |

| | | | | | | |
|-------------|----|--------|--------|------|--------|-----|
| e (118,348) | 18 | AC-185 | резерв | 969 | 150000 | 110 |
| e (119,349) | 59 | AC-185 | | 3176 | 150000 | 110 |
| e (119,349) | 59 | AC-185 | резерв | 3176 | 150000 | 110 |
| e (120,350) | 34 | AC-185 | | 715 | 150000 | 110 |
| e (350,351) | 46 | AC-150 | | 3068 | 135000 | 110 |
| e (121,351) | 25 | AC-185 | | 1346 | 150000 | 110 |
| e (122,352) | 17 | AC-185 | | 915 | 150000 | 110 |
| e (122,352) | 17 | AC-185 | резерв | 915 | 150000 | 110 |
| e (123,353) | 51 | AC-185 | | 172 | 150000 | 110 |
| e (123,353) | 51 | AC-185 | резерв | 172 | 150000 | 110 |
| e (126,354) | 34 | AC-185 | | 715 | 150000 | 110 |
| e (126,354) | 34 | AC-185 | резерв | 715 | 150000 | 110 |
| e (134,355) | 63 | AC-150 | | 4201 | 135000 | 110 |
| e (134,355) | 63 | AC-150 | резерв | 4201 | 135000 | 110 |
| e (148,356) | 24 | AC-150 | | 1600 | 135000 | 110 |
| e (148,356) | 24 | AC-150 | резерв | 1600 | 135000 | 110 |
| e (145,357) | 34 | AC-185 | | 114 | 150000 | 110 |
| e (357,358) | 46 | AC-150 | | 1198 | 135000 | 110 |
| e (146,358) | 25 | AC-185 | | 526 | 150000 | 110 |
| e (147,359) | 17 | AC-150 | | 1134 | 135000 | 110 |
| e (147,359) | 17 | AC-150 | резерв | 1134 | 135000 | 110 |
| e (151,360) | 33 | AC-185 | | 1776 | 150000 | 110 |
| e (360,361) | 49 | AC-150 | | 204 | 135000 | 110 |
| e (152,361) | 41 | AC-185 | | 138 | 150000 | 110 |
| e (153,362) | 39 | AC-150 | | 2601 | 135000 | 110 |
| e (153,362) | 39 | AC-150 | резерв | 2601 | 135000 | 110 |
| e (154,363) | 18 | AC-120 | | 1499 | 120000 | 110 |
| e (363,364) | 3 | AC-120 | | 98 | 120000 | 110 |
| e (128,365) | 24 | AC-150 | | 1600 | 135000 | 110 |
| e (128,365) | 24 | AC-150 | резерв | 1600 | 135000 | 110 |
| e (155,366) | 18 | AC-120 | | 1499 | 120000 | 110 |
| e (366,367) | 3 | AC-120 | | 16 | 120000 | 110 |
| e (156,367) | 24 | AC-150 | | 100 | 135000 | 110 |
| e (129,368) | 33 | AC-150 | | 860 | 135000 | 110 |
| e (129,368) | 33 | AC-150 | резерв | 860 | 135000 | 110 |
| e (157,369) | 41 | AC-185 | | 2207 | 150000 | 110 |
| e (369,370) | 19 | AC-120 | | 1582 | 120000 | 110 |
| e (370,371) | 10 | AC-120 | | 52 | 120000 | 110 |
| e (371,372) | 14 | AC-120 | | 455 | 120000 | 110 |
| e (158,372) | 28 | AC-185 | | 589 | 150000 | 110 |
| e (138,373) | 38 | AC-185 | | 2045 | 150000 | 110 |
| e (373,374) | 14 | AC-120 | | 1166 | 120000 | 110 |
| e (374,375) | 19 | AC-120 | | 99 | 120000 | 110 |
| e (139,375) | 57 | AC-185 | | 192 | 150000 | 110 |
| e (140,376) | 21 | AC-150 | | 1400 | 135000 | 110 |
| e (140,376) | 21 | AC-150 | резерв | 1400 | 135000 | 110 |
| e (144,377) | 35 | AC-150 | | 1724 | 135000 | 110 |
| e (144,377) | 35 | AC-150 | резерв | 2334 | 135000 | 110 |

| | | | | | | |
|-------------|----|--------|--------|------|--------|-----|
| e (143,378) | 51 | AC-150 | | 1329 | 135000 | 110 |
| e (143,378) | 51 | AC-150 | резерв | 1329 | 135000 | 110 |
| e (142,379) | 7 | AC-120 | | 583 | 120000 | 110 |
| e (150,380) | 29 | AC-185 | | 1561 | 150000 | 110 |
| e (380,381) | 17 | AC-120 | | 88 | 120000 | 110 |
| e (381,382) | 13 | AC-120 | | 423 | 120000 | 110 |
| e (382,383) | 24 | AC-120 | | 1999 | 120000 | 110 |
| e (149,383) | 42 | AC-185 | | 2261 | 150000 | 110 |
| e (383,384) | 13 | AC-120 | | 1083 | 120000 | 110 |
| e (383,384) | 13 | AC-120 | резерв | 1083 | 120000 | 110 |
| e (384,385) | 28 | AC-120 | | 146 | 120000 | 110 |
| e (384,385) | 28 | AC-120 | резерв | 146 | 120000 | 110 |

ДОДАТОК В

Фрагмент програмного коду стохастичної моделі єдиної енергосистеми

Модуль main

```

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <string>
#include <vector>
#include <cmath>
#include <sstream>
#include <algorithm>
#include <windows.h>
#include "src/powerplant.cpp"
#include "src/line.cpp"
#include "src/transformator.cpp"
#include "src/eobject.cpp"
#include "src/csv_reader.cpp"
using namespace std;
vector<vector<EObject *>> wayToPP(EObject *eobj, vector<EObject *>
fromEObjects)
{
    vector<vector<EObject *>> paths;
    // cout << eobj->id << " " << eobj->type << endl;
    if (eobj->lifes <= 0) {
        return paths;
    }
    for (int i = 0; i < eobj->connections.size(); i++)
    {
        // check lines
        Line *line = (Line *)eobj->connections[i];
        if (line->lifes <= 0)
            continue;
        for (int k = 0; k < line->connections.size(); k++)
        {
            if (line->connections[k] == eobj)
                continue;
            if (line->connections[k]->type == 2)
            {
                vector<EObject *> path;
                path.push_back(eobj);
                path.push_back(line);
                path.push_back(line->connections[k]);
                paths.push_back(path);
            }
        }
    }
}

```

```

    // powerplant
}
else if (line->connections[k]->type == 3)
{
    Transformator *t = (Transformator *)line->connections[k];
    if (t->lives <= 0)
        continue;
    // todo: check that we can go transit
    // cout << t->toString(false) << endl;
    bool isObjectFromHistory = false;
    vector<EObject *> _fromEObjects;
    for (int j = 0; j < fromEObjects.size(); j++)
    {
        if (fromEObjects[j] == line->connections[k])
            isObjectFromHistory = true;
        _fromEObjects.push_back(fromEObjects[j]);
    }
    if ((line->connections[k]->voltage >= eobj->voltage || line-
>connections[k]->voltage == -1) && !isObjectFromHistory)
    {
        _fromEObjects.push_back(eobj);
        vector<vector<EObject *>> possiblePaths = wayToPP(line-
>connections[k], _fromEObjects);
        for (int j = 0; j < possiblePaths.size(); j++)
        {
            vector<EObject *> possiblePath = possiblePaths[j];
            possiblePath.insert(possiblePath.begin(), line);
            possiblePath.insert(possiblePath.begin(), eobj);
            paths.push_back(possiblePath);
        }
    }
}
}
}
return paths;
}
int main()
{
    // setlocale(LC_ALL, "Ukrainian");
    // SetConsoleCP(1251); // встановлення кодування Windows-1251 в потік
введення
    // SetConsoleOutputCP(1251); // встановлення кодування Windows-1251 в
потік виведення
    freopen("output.txt", "w", stdout);
}

```



```

        inputData.eobjects[i]->lives = inputData.eobjects[i]->livesOrig;
    }
    /// all transformers
    // for (int shots = 0; shots < 300; shots++)
    // {
    //     float r = static_cast<float>(rand()) / static_cast<float>(RAND_MAX);
    //     inputData.transformators[floor(inputData.transformators.size() * r)]-
>lives--;
    // }
    // transformers more than 151 KV
    // for (int shots = 0; shots < 300; )
    // {
    //     float r = static_cast<float>(rand()) / static_cast<float>(RAND_MAX);
    //     int _index = floor((inputData.transformators.size() - 1) * r);
    //     Transformer *transformator = (Transformer *)
inputData.transformators[_index];
    //     if(transformator->voltage > 151) {
    //         transformator->lives--;
    //         shots++;
    //     }
    // }
    // transformers less than 151 KV
    // for (int shots = 0; shots < 300; )
    // {
    //     float r = static_cast<float>(rand()) / static_cast<float>(RAND_MAX);
    //     Transformer *transformator = (Transformer *)
inputData.transformators[floor((inputData.transformators.size()-1) * r)];
    //     if(transformator->voltage < 151) {
    //         // cout << r << " " << transformator->id << " " << transformator-
>lives << endl;
    //         transformator->lives--;
    //         shots++;
    //     }
    // }
    /// lines
    // for (int shots = 0; shots < 300; shots++)
    // {
    //     float r = static_cast<float>(rand()) / static_cast<float>(RAND_MAX);
    //     inputData.lines[floor(inputData.lines.size() * r)]->lives--;
    // }
    /// everything
    for (int shots = 0; shots < 300; shots++)
    {
        float r = static_cast<float>(rand()) / static_cast<float>(RAND_MAX);

```

```

        inputData.eobjects[floor(inputData.eobjects.size() * r)]->lifes--;
    }
}
int processedAll = 0;
int noPath = 0;
int foundPath = 0;
float systemLoses = 0.0f;
float fullLoad = 0.0f;
float generatorsFullPower = 0.0f;
for (int i = 0; i < inputData.transformators.size(); i++)
{
    if (inputData.transformators[i]->voltage < 151)
    {
        // cout << inputData.transformators[i]->toString(false) << endl;
        vector<EObject *> fromEObjects;
        fromEObjects.push_back(inputData.transformators[i]);
        vector<vector<EObject *>> paths =
wayToPP(inputData.transformators[i], fromEObjects);
        // pathsAmount += paths.size();
        vector<EObject *> bestPath;
        float minLoses = 100000000000.0f;
        for (int k = 0; k < paths.size(); k++)
        {
            // cout << "Path #" << k << "/" << paths.size() << endl;
            float distanceKM = 0.0f;
            float losesKW = 0.0f;
            for (int j = 0; j < paths[k].size(); j++)
            {
                if (paths[k][j]->type != 1)
                {
                    // cout << paths[k][j]->toString(false) << endl;
                }

                if (paths[k][j]->type == 1)
                {
                    Line *l = (Line *)paths[k][j];
                    distanceKM += l->distance;
                    losesKW += l->lineLoses;
                }
                if (paths[k][j]->type == 3)
                {
                    Transformer *t = (Transformer *)paths[k][j];
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        if (losesKW < minLoses)
        {
            minLoses = losesKW;
            bestPath = paths[k];
        }
        //
        // cout << endl;
    }
    processedAll++;
    if (bestPath.size() > 0)
    {
        systemLoses += minLoses;
        foundPath++;
        fullLoad += inputData.transformators[i]->load;
        // cout << bestPath[bestPath.size() - 1]->toString(false) << endl;
        // cout << "Loses: " << minLoses << "KW " << endl;
    } else {
        noPath++;
        // cout << "No path available.." << endl;
    }
    // for (int j = 0; j < bestPath.size(); j++)
    // {
    //     if (bestPath[j]->type != 1)
    //     {
    //         cout << bestPath[j]->toString(false) << endl;
    //     }
    // }
    // cout << endl;
    // cout << "=====";
    // cout << endl;
}
}
for (int i = 0; i < inputData.powerPlants.size(); i++)
{
    if (inputData.powerPlants[i]->lifes == 1) generatorsFullPower +=
inputData.powerPlants[i]->load;
}
cout << foundPath << "," << noPath << "," << processedAll << "," <<
fullLoad << "," << generatorsFullPower << endl;
// cout << "System loses: " << systemLoses << "KW; \n";
}
// vector<vector<EObject>> allPaths;
// for(int i = 0; i < inputData.transformators.size(); i++) {
//     cout << inputData.transformators[i]->toString(true) << endl;

```

```
//}  
//for(int i = 0; i < lines.size(); i++) {  
//    cout << lines[i]->toString() << endl;  
//}  
return 0;  
}
```

ДОДАТОК Г

Документи про впровадження результатів дослідження



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
 Суворова Владислава Олеговича
 представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Суворова В. О. «Моделі та методи аналізу ефективності та працездатності енергосистеми при нанесенні випадкових та запланованих збурень» використовуються Національним університетом «Одеська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів за освітніми програмами «Електропостачання та енергетичний менеджмент» та «Електротехніка та електромеханіка» в Навчально-науковому інституті електротехніки та електромеханіки (ННІЕЕ) на кафедрі «Електропостачання та енергетичний менеджмент» при викладанні наступних дисциплін:

- Інформаційні та комунікаційні технології в електроінженерії;
- Математичні моделі та методи оптимізації.

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор



Сергій НЕСТЕРЕНКО

Соколов Ярослав 705-85-12



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
 Суворова Владислава Олеговича
 представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Суворова В. О. «Моделі та методи аналізу ефективності та працездатності енергосистеми при нанесенні випадкових та запланованих збурень» виконане відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, і є складовою частиною держбюджетних НДР за темами: «Розробка моделі і методу ефективного керування експлуатацією енергоустановок від поновлюваних джерел енергії для забезпечення балансу енергосистеми», НДР № 205-55, (№ ДР 0122U000565) і «Аналіз надійності експлуатації електроенергетичної системи», НДР № 228-55, (№ ДР 0122U201192).

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Проректор



Дмитро ДМИТРИШИН

Соколов Ярослав 705-85-12

**Товариство з обмеженою відповідальністю
«ЕНЕРГОМАКС-ПРОЕКТ»**

ЄДРПОУ 34737256

Україна, 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 101-в, кв. 100
р/р № №UA083052990000026001034904118 в АТ КБ «ПРИВАТБАНК»,
ПІН 347372515531, № свідоцтва платника ПДВ 100002747,
тел. (048)7729327; e-mail: emaxprojekt@ukr.net

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта
Національного університету «Одеська політехніка»

Суворова Владислава Олеговича

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Довідка видана в тому, що у діяльності ТОВ «ЕНЕРГОМАКС-ПРОЕКТ» використані результати, що отримані у дисертаційній роботі аспірантом кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Національного університету "Одеська політехніка" МОН України Суворовим Владиславом Олеговичем «Моделі та методи аналізу ефективності та працездатності енергосистеми при нанесенні випадкових та запланованих збурень», прийнято до впровадження рекомендації щодо оцінки працездатності електроенергетичної системи в нормальних та аварійних режимах роботи.

Відзначено нові науково-технічні можливості, які забезпечують отримані результати:

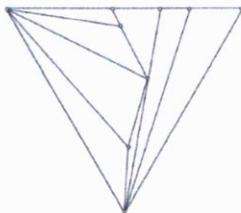
- можливість швидко оцінити працездатність системи при розширенні існуючої системи електропостачання;
- можливість швидко оцінити ефективність експлуатації при приєднанні в будь-яку точку електроенергетичної системи нових джерел енергії.

ТОВ «ЕНЕРГОМАКС-ПРОЕКТ» заплановано впровадження результатів наукової роботи Суворова В. О. під час проектування нових об'єктів електроенергетичної структури.

Директор



Василь ТОНГАЛЮК



ТОВ ТК ПРОЕКТ
ПРОЕКТНЕ РІШЕННЯ РІЗНОЇ СКЛАДНОСТІ

ТОВ «ТК ПРОЕКТ»
Код ЄДРПОУ 42074132 ПІН 420741315520
Юридична адреса:
65017, м. Одеса, вул. Маршала Бабаджання, 20
Банківські реквізити:
Р/р UA063805820000026006010325258
МФО 380582
в АТ «МІЖНАРОДНИЙ ІНВЕСТИЦІЙНИЙ БАНК»
м. Київ
Пошта/Е-mail: tkproekt@ukr.net

Вих. №08/02 від 08.02.2024р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта

Національного університету «Одеська політехніка»

Суворова Владислава Олеговича

«Моделі та методи аналізу ефективності та працездатності енергосистеми при нанесенні випадкових та запланованих збурень»

Довідка видана в тому, що у діяльності ТОВ «ТК ПРОЕКТ» використані результати, що отримані у дисертаційній роботі аспірантом кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Національного університету «Одеська політехніка» МОН України Суворовим Владиславом Олеговичем, прийнято до впровадження рекомендації щодо підвищення аналізу ефективності енергосистеми при різних режимах роботи системи електропостачання.

Запропоновані Суворовим Владиславом Олеговичем науково-технічні рішення дозволили підвищити швидкість аналізу структури існуючої енергосистеми під час реконструкції або проектування нових вузлів системи електропостачання.

Очікуваний ефект має такі складові:

- скорочення часу на прийняття рішень;
- зменшення часу на моделювання та розрахунок режиму роботи існуючої електроенергетичної системи.

Директор ТОВ «ТК ПРОЕКТ»



Владислав КРЕМІНСЬКИЙ

ДОДАТОК Д

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Kryvda V., Rudnitsky V., Suvorov V., Zubak V. Improving the efficiency of solar panels when using mppt – controller. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2022. No.36 (112). P. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.04>. ISSN 2221-3805. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

2. Разінков В. О., Суворов В. О. Перспективи використання геліоенергетики для енергопостачання в місті Одеса. *Вісник ВПІ*. 2022. № 6. С. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36>. ISSN 1997-9266. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

3. Kryvda V. I., Suvorov V. O., Zubak V. V. Modeling and method for assessing the efficiency of the power system. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023; Vol. 6 No. 3. P. 240–249. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.16>. ISSN 2663-0176. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

4. Suvorov V., Zubak V. Model for monitoring and evaluation of the effectiveness of the electric power system of the country. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2023. № 38(114). P. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.2>. ISSN 2221-3805. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

5. Babych S., Kryvda V., Zhanko K., Zubak V., Suvorov V. Development of models and methods for automated control of heat supply system with optimization of technical means structure. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023. Vol. 9. No. 2, P. 119 – 130. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.02.119>. ISSN: 2411-8028. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

6. Максимов, М. В., Кривда, В. І., & Суворов, В. О. Model and method for analyzing the operability of the country's electric power system under non-projected disturbances. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2024. № 39 (115). P. 14-25.

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.39.115.2024.2>. ISSN 2221-3805. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Kryvda V.I., Rudnitsky V.G., Suvorov V.O., Zubak V.V. "Modeling of a group of solar panels with constant solar radiation." All-Ukrainian Scientific Conference "ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING, AND ELECTROMECHANICS: application, research, education". 2021. P. 65.

URL: <https://figshare.com/ndownloader/files/27608126>

8. Kryvda V., Suvorov V. "Assessment of the current state and development of sources of distributed generation of the unified energy system of Ukraine." Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Munich, Germany. 2022. P. 114-119.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-PROG-RESS-INNOVATIONS-ACHIEVEMENTS-AND-PROSPECTS-6-8.11.22.pdf>.

9. Kryvda V., Suvorov V. "Overview of the problems and impact of the connection of distributed generation sources at different levels of control of the united energy system of Ukraine." Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Boston, USA. 2022. P. 248-253.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/PROGRESSIVE-RESE-ARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-28-30.12.22.pdf>.

10. Suvorov V., Zubak V., Kryvda V. Evaluation of electricity supply and consumption efficiency. International Workshop of Scientific Students' Papers, 17th Edition. 2023.

URL: <https://elstud.webnode.ro/editii-elstud/2023/>