

Міністерство освіти та науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДОВИК ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.316

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ
ЕНЕРГОСИСТЕМИ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора філософії

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

Науковий керівник:
Папаїка Юрій Анатолійович,
докт. техн. наук, професор

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Удовик О.В. Електромагнітна сумісність промислових систем електропостачання в умовах обмеженої потужності енергосистеми.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2026.

Енергетика України сьогодні працює в умовах надскладних викликів, пов'язаних з воєнним станом та війною з росією, руйнації значної частки енергогенеруючих потужностей та системоутворюючих підстанцій. Основні вимоги, що висувуються до української енергосистеми Урядом – технічні й експлуатаційні обмеження генерації, надійність та якість електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, максимальне впровадження відновлюваних джерел енергії, розвиток децентралізованих систем генерації електричної та теплової енергії для промисловості та муніципалітетів. Енергосистема та промислові споживачі України зараз знаходяться у нових реаліях з необхідністю прогнозування електроспоживання, системою почергових вимикань електроенергії та визначення пріоритетів підтримки воєнно-промислового комплексу для забезпечення обороноздатності та економічної безпеки. Зв'язок з європейською системою ENTSO-E дозволяє Об'єднаній енергетичній системі забезпечити стійкість режиму та надійності електропостачання підприємств, які формують ВВП нашої країни.

З початком повномасштабного вторгнення росії були виявлені особливі режими електроенергетичних систем, які були нетипові для нормального існування електричних режимів, що спонукало інтерес та необхідність нових наукових досліджень проблеми якості електричної енергії для систем електропостачання промислових підприємств, особливо в умовах обмеженої потужності енергосистеми. Незадовільний рівень якості електричної енергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності виробництва за

цілою низкою показників (відхилення, несиметрія, несинусоїдальність напруги). Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності системи електропостачання (СЕП). При роботі «ослабленої» енергосистеми або масового впровадження децентралізованого принципу побудови електричних мереж, проблема якості електроенергії набуває свого визначального значення. Ці засади відкрили актуальну площину нових наукових досліджень якості та надійності електропостачання, яким раніше не приділялось достатньо уваги.

Перший розділ присвячений аналізу стану проблематики даного напрямку дослідження, розкрито небезпечні та аварійні наслідки для системи електропостачання при порушенні електромагнітної сумісності. Дослідження та публікації в області електромагнітної сумісності (ЕМС) промислових систем електропостачання (СЕП) показали, що потребують уточнення залежностей для моделювання та прогнозування показників несиметрії, несинусоїдальності та коливання напруги. Для налагодження нормальної експлуатації систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії необхідна перевірка вузлів навантаження на виникнення резонансних явищ. Для отримання достовірних результатів визначено основні завдання для дисертаційного дослідження та рівень припущень, необхідний для подальшого впровадження результатів в умовах діючих підприємств.

У другому розділі досліджено різноманітні електромагнітні завади у промислових системах електропостачання, які мають несиметричні та нелінійні електричні навантаження. Визначною особливістю завад на металургійних та гірничих підприємствах є нестаціонарний характер зміни несинусоїдальності струмів та напруг при роботі дугових, феросплавних печей та перетворювачів частоти середньої та великої потужності. При цьому був прийнятий обґрунтований рівень припущень та початкових умов, який дозволив створити адекватні схеми заміщення систем електропостачання з урахуванням параметрів централізованої енергосистеми, характеристик вентильних перетворювачів та елементів електричних мереж.

Отримані вперше залежності дозволи стверджувати, що рівень потужності короткого замикання на шинах підстанцій промислових підприємств нелінійно впливає на показники якості напруги та залежить від особливостей графіків електричних навантажень гірничих та металургійних підприємств та наявності інтелектуальних пристроїв компенсації реактивної потужності та корекції рівнів вищих гармонік.

При аналізі систем електропостачання гірничих підприємств були визначені характерні особливості формування максимального навантаження на енергосистему з урахуванням циклічних процесів потужних стаціонарних установок та підземних технологічних ланок. При цьому можливі різні схеми приєднання нелінійних електромагнітних завод та зниження коефіцієнта потужності до незадовільних значень ($\cos \varphi=0,4$).

Стохастичний характер функції струму та вищих гармонік при роботі дугових та феросплавних печей передбачає використання елементів теорії спектрального аналізу для визначення окремих показників якості напруги.

У третьому розділі проведено аналіз електричних режимів та енергетичної ефективності систем електропостачання промислових підприємств при роботі електротехнологічних установок з вентильними перетворювачами. Особлива увага приділялась частотному складу первинного струму перетворювачів частоти при централізованому живленні у післяаварійних та острівних режимах. При цьому порушення електромагнітної сумісності спостерігалось у вигляді резонансних явищ на шинах з джерелами розподіленої генерації. Математична модель прогнозування резонансних явищ дозволяє визначити значення резонансних частот при зміні конфігурації як схем внутрішнього електропостачання, так і зовнішніх електричних мереж. При цьому пристрої FACTS у вигляді пасивних фільтрів та STATCOM беруть участь у створенні резонансного контуру та при певних співвідношеннях параметрів можуть впливати на порушення ЕМС.

Рівні вищих гармонік та інтергармонік при роботі випрямлячів та інверторів моделювались за допомогою стандартного математичного апарату на

основі рядів Фур'є, що є ефективним інструментом дослідження періодичних функцій.

У роботі запропоновано оригінальний підхід до симетрування «ослаблених» цехових електричних мереж, який полягає у врахуванні фазності приєднання несиметричного споживача та відрізняється від існуючих способів можливістю врахування потужності КЗ у вузлі навантаження та особливих режимів електроспоживання.

У четвертому розділі в середовищі Simulink / MATLAB були створені моделі промислових електричних мереж з інтелектуальними регуляторами FACTS. Для моделювання використовувалися реальні набори даних з навантаженням та генерацією електроенергії на промислових об'єктах, а також типові для металургійних та гірничих підприємств рівні вищих гармонік.

У спеціалізованому програмному забезпеченні виконано розрахунки показників енергетичної ефективності при роботі дугових сталеплавильних печей. Визначено діапазон розбіжності цих показників при моделюванні та експериментальних дослідженнях.

Сформульовано та представлено науково обґрунтований підхід до визначення показників якості напруги у розгалужених промислових систем електропостачання з використанням параметрів схем заміщення та їх особливостей при роботі у післяаварійних режимах.

Отримані результати похибок у розрахунку показників ЕМС знаходяться у допустимих для подібних систем значень та можуть бути зменшені при раціональному виборі параметрів фільтро-компенсуючих пристроїв, системи зовнішнього електропостачання та врахуванні одночасності впливу електромагнітних завад, що дозволить промисловим об'єктам критичної інфраструктури працювати надійно під час обмежень електропостачання.

Ключові слова: система електропостачання, електротехнологічні установки, електричні режими, несиметрія напруги, несинусоїдальність

напруги, вищі гармоніки, вентиляльні перетворювачі, інтелектуальні пристрої, енергетична ефективність, реактивна потужність.

ABSTRACT

Udovyk Oleksandr. Electromagnetic compatibility of industrial power supply systems under conditions of limited power system capacity.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 – Electric power, electrical engineering and electromechanics. – “Dnipro University of Technology”, Dnipro, 2026.

Today, the energy sector of Ukraine operates in conditions of extremely complex challenges associated with the military aggression of Russia and the destruction of a significant share of power generating capacities and system-forming substations. The main requirements imposed on the Ukrainian power system by the Government are technical and operational generation limitations, reliability and quality of power supply to critical infrastructure facilities, maximum implementation of renewable energy sources, development of decentralized systems of electric and thermal energy generation for industry and municipalities. The electricity market of Ukraine is now operating in new realities with the need to forecast electricity consumption, a system of alternating electricity shutdowns and determining priorities for supporting the military-industrial complex to ensure defense capability and economic security. The connection with the European system ENTSO-E allows the United Energy System to ensure the stability of the regime and reliability of electricity supply to enterprises that form the GDP of our country.

With the beginning of the full-scale Russian invasion, special regimes of electric power systems were identified that were atypical for the normal existence of electrical regimes, which prompted interest and the need for new scientific research into the problem of the quality of electric power for power supply systems of industrial enterprises, especially in conditions of limited power system capacity. A low level of electric power quality leads to a significant decrease in the energy efficiency of

production by a number of indicators (deviation, asymmetry, non-sinusoidality of voltage). The problem of the quality of electric power is a component of the complex concept of electromagnetic compatibility of the power supply system (ESP). When operating a “weakened” power system or mass implementation of the decentralized principle of building electrical networks, the problem of electricity quality acquires its defining importance. These principles have opened up a relevant area of new scientific research on the quality and reliability of electricity supply, which had not previously been given sufficient attention.

The first section is devoted to the analysis of the state of the problems of this area of research, revealing dangerous and emergency consequences for the power supply system in case of electromagnetic compatibility violations. Research and publications in the field of electromagnetic compatibility of industrial power supply systems have shown that there is a need to clarify the dependencies for modeling and predicting the indicators of asymmetry, non-sinusoidality and voltage fluctuations. To establish normal operation of power supply systems with renewable energy sources, it is necessary to check the load nodes for the occurrence of resonance phenomena. To obtain reliable results, the main tasks for the dissertation research and the level of assumptions necessary for the further implementation of the results in the conditions of operating enterprises are determined.

In the second section, various electromagnetic interferences in industrial power supply systems with asymmetrical and nonlinear electrical loads are investigated. A distinctive feature of interferences at metallurgical and mining enterprises is the non-stationary nature of the change in the non-sinusoidality of currents and voltages during the operation of arc, ferroalloy furnaces and medium and high-power frequency converters. At the same time, a reasonable level of assumptions and initial conditions was adopted, which allowed creating adequate schemes for replacing power supply systems taking into account the parameters of the centralized power system, the characteristics of valve converters and elements of electrical networks.

The dependencies obtained for the first time allow us to state that the level of short-circuit power on the busbars of substations of industrial enterprises nonlinearly

affects the voltage quality indicators and depends on the features of the electrical load schedules of mining and metallurgical enterprises and the availability of intelligent devices for reactive power compensation and correction of higher harmonic levels.

When analyzing the power supply systems of mining enterprises, characteristic features of the formation of the maximum load on the power system were determined, taking into account the cyclic processes of powerful stationary installations and underground technological links. In this case, various schemes for connecting nonlinear electromagnetic interference and reducing the power factor to unsatisfactory values ($\cos \varphi=0.4$) are possible.

The stochastic nature of the current function and higher harmonics during the operation of arc and ferroalloy furnaces involves the use of elements of the theory of spectral analysis to determine individual voltage quality indicators.

In the third section, an analysis of electrical modes and energy efficiency of power supply systems of industrial enterprises during the operation of electrotechnological installations with valve converters was carried out. Special attention was paid to the frequency composition of the primary current of frequency converters during centralized power supply in post-accident and island modes. In this case, electromagnetic compatibility violations were observed in the form of resonant phenomena on buses with distributed generation sources. The mathematical model for predicting resonant phenomena allows determining the values of resonant frequencies when changing the configuration of both internal power supply circuits and external electrical networks. In this case, FACTS devices in the form of passive filters and STATCOM participate in creating a resonant circuit and, at certain parameter ratios, can affect EMC violations.

The levels of higher harmonics and interharmonics during the operation of rectifiers and inverters were modeled using a standard mathematical apparatus based on Fourier series, which is an effective tool for studying periodic functions.

The paper proposes an original approach to balancing "weakened" shop electrical networks, which consists in taking into account the phase of the connection of an asymmetrical consumer and differs from existing methods in the ability to take

into account the short-circuit power in the load node and special power consumption modes.

In the fourth section, models of industrial electrical networks with intelligent FACTS controllers were created in the Simulink / MATLAB environment. Real data sets with load and electricity generation at industrial facilities, as well as levels of higher harmonics typical for metallurgical and mining enterprises, were used for modeling.

In specialized software, calculations of energy efficiency indicators during the operation of arc steelmaking furnaces were performed. The range of divergence of these indicators during modeling and experimental studies was determined.

A scientifically sound approach to determining voltage quality indicators in branched industrial power supply systems using the parameters of equivalent circuits and their features during operation in post-accident modes was formulated and presented.

The obtained results of errors in the calculation of EMC indicators are within the values permissible for such systems and can be reduced by rational selection of parameters of filter-compensating devices, external power supply system and taking into account the simultaneity of the influence of electromagnetic interference, which will allow industrial facilities of critical infrastructure to operate reliably during power supply restrictions.

Keywords: power supply system, electrotechnological installations, electrical modes, voltage asymmetry, voltage non-sinusoidality, higher harmonics, valve converters, intelligent devices, energy efficiency, reactive power.

Список публікацій здобувача

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М. (2024). Визначення показників якості напруги у промислових системах електропостачання при обмеженій потужності енергосистеми. *Науковий журнал*

«Електротехніка та Електроенергетика». Вип. №3. Запоріжжя. - с. 36-44.
<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-4>.

2. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Буртний Д.І., Малишко М.М., Леонов О.С. (2024). ВИКОРИСТАННЯ ОСНОВНИХ ТЕОРІЙ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРАХУНКАХ МЕРЕЖ ЗМІННОГО СТРУМУ ГІРНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА. Науково-технічний збірник «Електротехнічні та інформаційні системи». НТУ «ДП», - 2024. №106. - с. 36-44. <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-12>.

3. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., Буртний Д.І. (2025). Дослідження характеру аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств. *Науковий журнал «Електротехніка та Електроенергетика»*. Вип. №1. Запоріжжя. - с. 53-60.
<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-1-6>.

4. Удовик О.В., Папаїка Ю.А. (2025). Оцінка показників електромагнітної сумісності промислових систем електропостачання при обмеженні потужності енергосистеми. *Науково-технічний збірник «Збірник наукових праць Національного гірничого університету»*. НТУ «ДП». -№80. - с. 213-222. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.213>.

5. Удовик О.В., Рева В.С., Лисенко О.Г. Особливості створення систем контролю якості електроенергії у системах електропостачання космічних ракетних комплексів. *Науковий журнал «Електротехніка та Електроенергетика»*. Вип. №1. – 2025р. Запоріжжя - с. 32-41.
<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-1-4>.

6. Удовик О.В., Папаїка Ю.А. (2025). Аналіз неактивних складників повної потужності нелінійних та несиметричних навантажень промислових підприємств. Науково-технічний збірник «Електротехнічні та інформаційні системи». НТУ «ДП», – 2025. №107. - с. 24-28. <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-107-4>.

7. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., (2025). Аналіз особливих режимів промислових електричних мереж з ізольованою

нейтраллю. Науковий журнал «Електротехніка та Електроенергетика». Вип. №3. Запоріжжя. - с. 44-50. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-3-5>.

Праці апробаційного характеру

8. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., ОЦІНКА ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ. Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції "проблеми раціонального використання соціально-економічного, еколого-енергетичного, фінансово-інвестиційного потенціалу України та її регіонів в умовах воєнного стану", (м. Луцьк, 29 квітня, 2024 р.). – С. 67-71.

9. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., ОСОБЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ. INTERNATIONAL SCIENTIFIC- PRACTICAL CONFERENCE PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SCIENCE, EDUCATION AND TECHNOLOGY, (Aarhus, Denmark, 3 August, 2024). – р. 46-50.

10. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Буртний Д.І. Вплив несинусоїдальності напруги на ефективність роботи пристроїв корекції коефіцієнта потужності у потужних енерговузлах промислового навантаження. Семінар Наукової Ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики». Інститут Електродинаміки НАН України (11 вересня 2024).

11. Удовик О.В., Папаїка Ю.А. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ПІДСТАНЦІЙ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ ПРИ НЕЛІНІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ. ІІІ Науково-практична конференція Міжнародний форум: безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада (15 – 17 жовтня 2025 року), Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	15
ВСТУП.....	16
 РОЗДІЛ 1	
СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ЗАВДАННЯ	
ДОСЛІДЖЕННЯ.....	27
1.1. Аналіз проблеми електромагнітної сумісності в електричних мережах обмеженої потужності.....	27
1.2. Аналіз нормативних документів визначення рівнів електромагнітної сумісності.....	33
1.3. Особливості електричних режимів промислових технологічних установок.....	39
1.4. Особливості систем електропостачання та енергетичних балансів гірничих підприємств.....	50
1.5. Постановка задачі наукових досліджень.....	53
1.6. Висновки по розділу 1.....	55
 РОЗДІЛ 2	
АНАЛІЗ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ВІД ПРОМИСЛОВИХ	
ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	57
2.1. Електромагнітна обстановка в системах електропостачання металургійних підприємств	57
2.1.1. Вплив ДСП на якість електроенергії	58
2.1.2. Вплив показників якості напруги на питомі витрати електроенергії	63
2.2. Якість електроенергії в системах електропостачання гірничо- видобувних підприємств	68

	13
2.3. Моделювання параметрів силових резонансних фільтрів	70
2.3.1. Моделювання флікеру напруги та параметрів режиму	72
2.3.2. Несиметрія напруги від ДСП	73
2.3.3. Параметри кіл фільтрів ВГ	77
2.3.4. Рівні ВГ при роботі сонячних електростанцій у вузлах промислового навантаження	78
2.4. Математична модель для визначення показників несиметрії напруги	81
2.5. Висновки по розділу 2	91

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ

ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ.....	93
3.1 Аналіз теоретичних основ визначення параметрів електричної енергії.....	93
3.2 Моделювання коефіцієнтів несиметрії	101
3.3 Моделювання коефіцієнтів несинусоїдальності.....	105
3.4. Моделювання резонансних явищ при наявності джерел розподіленої генерації.....	111
3.5. Висновки по розділу 3.....	123

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ

ДОСЛІДЖЕНЬ.....	125
4.1. Особливості компенсації реактивної потужності в промислових системах електропостачання.....	125
4.2. Розробка інженерних методів визначення показників якості напруги при обмеженій потужності енергосистеми	132
4.3. Визначення додаткових втрат потужності в умовах діючих промислових підприємств.....	146

4.4. Експериментальні дослідження показників якості електричної енергії у промислових системах електропостачання.....	148
4.5. Висновки по розділу 4.....	160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ	162
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	164
ДОДАТКИ.....	173
Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів	173
Додаток Б. Довідки про впровадження та використання результатів дисертаційної роботи	176
Додаток В. Результати моніторингу показників якості напруги.....	179
Додаток Г. Технічні рішення для забезпечення електромагнітної сумісності.....	184

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- EMC – електромагнітна сумісність
EMЗ – електромагнітна завада
СЕП – система електропостачання
ГЗП – головна знижувальна підстанція
ВДЕ – відновлювані джерела енергії
АД – асинхронний двигун
АТ – автотрансформатор
АТК – асинхронний тиристорний каскад
ДСП – дугова сталеплавильна піч
ВП – вентиляційний перетворювач
ЕПО – електрична піч опору
СРН – споживач-регулятор якості напруги
СПЧ – силовий перетворювач частоти
ЛЕП – лінія електропередачі
ВГ – вищі гармоніки
ІГ – інтергармоніки
ШПФ – швидке перетворення Фур'є
БПЧ – безпосередній перетворювач частоти
КРП – компенсація реактивної потужності
БК – батарея конденсаторів
ФКП – фільтро-компенсуючий пристрій
ТП – трансформаторна підстанція
СЕС – сонячна електростанція
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ПЯН – показники якості напруги
РПН – регулювання під напругою
ДГУ – дизель-генераторна установка
ЯЕ – якість електроенергії

ВСТУП

Актуальність теми дисертації

Електромагнітна сумісність енергетичних об'єктів різних видів діяльності чи процесів розглядає умови «комфортного» існування кожного за відсутності неприпустимого впливу на інші суб'єкти. У системах електропостачання промислових підприємств електрообладнання, прилади, апарати та інші пристрої знаходяться у єдиному для них електромагнітному середовищі, причому будь-який із пристроїв є джерелом (генератором) електромагнітних завад (ЕМЗ). Одночасно на нього впливають завади, що генеруються іншими джерелами [1-2].

Теоретично електромагнітні завади характеризується як певна дія, що викривляє основний сигнал 50 Гц і небажано впливає (або може впливати) на нього. Основний сигнал – це корисний сигнал, який визначається принципом дії споживача електроенергії, його системи управління та захисту.

Схеми зовнішнього електропостачання та система електропостачання промислового підприємства є електромагнітним середовищем, в якому відбувається вироблення, трансформація, трансфер та утилізація електроенергії з впливом електромагнітних завад на усі електроприймачі. Тому виникає завдання їхньої електромагнітної сумісності, під якою розуміється здатність електрообладнання, апаратів і приладів нормально функціонувати у єдиній електромагнітній обстановці, не створюючи взаємногошкідливого та небезпечного впливу [3].

Кондуктивні електромагнітні завади, які поширюються в мережах трифазного змінного струму визначаються викривленням синусоїдальної форми кривих напруги та струму, чинного значення напруги (відхилення, коливання та несиметрія напруги), провалами та імпульсами напруги. Значення завад прийнято називати показниками електромагнітної сумісності чи показниками якості електроенергії [4]. Якість електроенергії – це сукупність її властивостей, що визначають вплив на електрообладнання, прилади та апарати. Показники якості електроенергії чисельно характеризують рівні електромагнітних завад за

частотою, значенням напруги, форми кривої напруги, симетрію та імпульси напруги. Це визначення якості електроенергії як товару відповідає поняттю якості продукції як сукупності властивостей, що зумовлюють придатність продукції для задоволення певних потреб відповідно до показників якості електроенергії, встановлених нормативними документами [4].

Енергосистема, призначена для виробництва, передачі, розподілу електроенергії та перетворення її на енергію інших видів, містить більше джерел електромагнітних завад: лінії електропередачі, розподільчі пристрої з комутаційними апаратами, шинопроводи, кабелі, електроприймачі, технічні засоби автоматизації, управління, захисту та зв'язку тощо. З початком повномасштабного вторгнення росії режими роботи централізованої енергосистеми України визначаються технологічними обмеженнями генеруючих потужностей та магістральних ліній електропередач напругою 110-750 кВ, що пов'язано з ураженнями енергетичних об'єктів військовими засобами. Електромагнітні процеси при цьому визначаються наднизькими значеннями потужності короткого замикання та збільшенням зовнішнього опору енергосистеми, що обмежує запаси статичної та динамічної стійкості та посилює проблему електромагнітної сумісності [4].

У разі перевищення нормованих рівнів електромагнітні завади можуть призвести до порушення стійкості вузлів навантаження та технічних засобів (зокрема, пристроїв мікропроцесорного релейного захисту) на електростанціях і підстанціях, похибок у роботі інтелектуальних лічильників, роботі пристроїв FACTS [5-9]. Тому дослідження показників електромагнітної сумісності у промислових системах електропостачання (СЕР) при різноманітних сценаріях технологічних обмежень енергосистеми з отриманням принципово нових залежностей у функції потужності короткого замикання на базових рівнях розподілу електроенергії є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими темами

Роботу виконано відповідно до прийнятої Кабінетом Міністрів України Нової енергетичної стратегії України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», в рамках госпдоговірних НДР "Дослідження поточних та аналіз очікуваних параметрів режиму роботи системи електропостачання водовідливної установки за умови її живлення від дизельного генератора: оцінка необхідної структури, параметрів, вимог, умов для ВСП «ШАХТОУПРАВЛІННЯ імені ГЕРОЇВ КОСМОСУ» ПрАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ»" (№072266-23), «Визначення електромагнітної сумісності елементів приводу головної вентиляційної установки ВРПД - 4.5 СМ шахти ім. ГЕРОЇВ КОСМОСУ ВСП "ШАХТОУПРАВЛІННЯ імені ГЕРОЇВ КОСМОСУ" ПрАТ "ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ" (№0702272-23), «Науково-дослідні роботи з визначення ефективності впровадження установок компенсації реактивної потужності (УКРВ) в підземних мережах 6 кВ підприємств гірничо-видобувної промисловості» (№072212-25), які виконувалися у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка», де автор був одним з виконавців.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення взаємозв'язків показників електромагнітної сумісності систем електропостачання промислових підприємств при наявності нелінійних та несиметричних навантажень, джерел розподіленої генерації та технологічних обмежень потужності енергосистеми. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі сформульовано і розв'язано наступні **задачі досліджень**.

1. Аналіз проблеми електромагнітної сумісності СЕП промислових підприємств при наявності технологічних обмежень.
2. Аналіз типових графіків електричних навантажень промислових технологічних установок з вентиляними перетворювачами.
3. Проведення експериментального моніторингу показників електромагнітної сумісності в СЕП гірничих та металургійних підприємств.

4. Розробка математичної моделі визначення показників несиметрії та несинусоїдальності у вузлах промислових електричних навантажень з урахуванням стану централізованої електроенергетичної системи.

6. Дослідження резонансних процесів у СЕП промислових підприємств на частотах канонічних гармонік та інтергармонік при врахуванні режимів інтелектуальних пристроїв FACTS.

7. Дослідження закономірностей зміни неактивних складових повної потужності при несинусоїдальності та несиметрії напруги у промислових електричних мережах при острівних режимах енергосистеми та автономних системах електропостачання з відновлюваними джерелами енергії.

8. Розроблення рекомендацій з забезпечення енергоефективних режимів роботи підприємства, що можуть бути забезпечені при комплексному врахуванні показників якості електропостачання та оптимальному перетоці реактивної потужності, а також рекомендацій з вибору фільтро-компенсуючих пристроїв.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси передачі, перетворення та споживання електроенергії у СЕП промислових підприємств при наявності нелінійних та несиметричних навантажень при обмеженнях потужності енергосистеми.

Предмет дослідження – показники якості напруги при живленні різкозмінних, нелінійних та несиметричних навантажень, зв'язки цих показників з режимними особливостями технічних та технологічних обмежень потужності енергосистеми.

Ідея роботи – забезпечення електромагнітної сумісності системи електропостачання промислових підприємств шляхом врахування особливостей генерування вищих гармонік при збереженні оптимального перетоку реактивної потужності та контрольованому приєднанні джерел розподіленої генерації.

Наукова задача полягає у встановленні закономірностей реалізації енергоефективних режимів роботи СЕП промислових підприємств з урахуванням режимних варіацій частотного складу вищих гармонік та

інтергармонік, які відрізняються від існуючих можливостями врахування острівних режимів або режимів обмеження потужності енергосистеми.

Методи дослідження

Для розв'язання поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що включає аналіз та узагальнення науково-технічних досягнень і літературних джерел, поєднує теоретичні й експериментальні дослідження в умовах діючих підприємств. Теоретичні дослідження базуються на методах теоретичної електротехніки, теорії електромагнітної сумісності, теорії надійності, а також методах спектрального аналізу, комп'ютерного моделювання і пошуку оптимального рішення. Експериментальні дослідження включають перевірку отриманих наукових результатів в реальних промислових системах електропостачання та лабораторні стендові дослідження з визначення рівнів генерації вищих гармонік при варіативних змінах режимів вентильних перетворювачів.

Основні наукові положення, що захищаються в дисертації

1. Виконання вимог електромагнітної сумісності у промислових системах електропостачання забезпечується при зниженні потужності короткого замикання у вузлах технологічного навантаження не більше ніж на 30% значення нормального режиму потужності енергосистеми.

2. Джерела розподіленої генерації у вузлах потужного промислового навантаження з нелінійним та несиметричним характером призводять до виникнення резонансів напруги на частотах діапазону 100-3500 Гц, що знаходиться за межами стандартних налаштувань інтелектуальних пристроїв компенсації реактивної потужності.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розвинуто механізми забезпечення нормативних показників якості напруги та електромагнітної сумісності систем електропостачання з урахуванням впливу канонічних вищих гармонік та інтергармонік, що

відрізняються від існуючих можливостями прогнозування резонансних явищ, та ефекту обмеження потужності при децентралізації живлення.

2. Встановлено, що особливі режими електропічних установок, підйомних машин, прокатних станів, які визначаються викривленням несинусоїдальності та порушення симетрії напруги, у острівних режимах роботи енергосистеми призводять до суттєвого погіршення енергоефективності.

3. Визначено граничні діапазони частот і амплітуд вищих гармонік та інтергармонік у промислових вузлах електричного навантаження, які генеруються вентиляними перетворювачами та дуговими електропечами, що дає можливість вибрати раціональні параметри засобів активних та пасивних фільтро-компенсуючих установок.

4. Для умов системи електропостачання промислового підприємства отримано закономірності, що зв'язують параметри резонансних процесів у вузлі навантаження 6–10–35 кВ з кількістю, потужністю та режимами інтелектуальних пристроїв FACTS і відрізняються від існуючих можливістю прогнозувати ділянки амплітудно-частотних характеристик з резонансними явищами при приєднанні до вузлів навантаження сонячних електростанцій.

5. Вперше запропоновано метод прогнозування показників якості напруги при врахуванні режимних коливань потужності короткого замикання, що дозволяє оперативно коригувати уставки засобів захисту та інтелектуальних пристроїв корекції коефіцієнта потужності.

6. Розроблено нові математичні моделі комплексного впливу несинусоїдальності та несиметрії напруги на складові повної потужності трифазної електричної системи, відмінності яких полягають у можливості врахування широкого спектру вищих гармонік та інтергармонік, характерних для промислових підприємств та показників несиметрії напруги, що дозволяє отримати уточнені значення додаткових втрат електроенергії та якісні баланси активних та реактивних навантажень.

7. Вперше отримано закономірності впливу режимних особливостей децентралізованих та острівних режимів електроенергетичних систем на

енергетичну ефективність промислових систем електропостачання за умови власної генерації від сонячних електростанцій для вирішення проблеми електромагнітної сумісності при врахуванні множини комбінацій типових схем заміщення.

8. Запропоновано уточнену методику визначення потужності та точок приєднання до електричних мереж 0,4-6-10-35 кВ пристроїв компенсації реактивної потужності з урахуванням особливостей графіків електричних навантажень та прогнозування резонансних явищ на частотах вищих гармонік та інтергармонік.

Наукове значення роботи полягає в обґрунтуванні нових залежностей спектру вищих гармонік та вигляді амплітудно-частотних характеристик промислових вузлів навантаження з джерелами розподіленої генерації та інтелектуальними пристроями FACTS, за рахунок чого забезпечується електромагнітна сумісність та енергетична ефективність електропостачання.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується використанням фундаментальних законів електротехніки, коректністю зроблених припущень, детальним тестуванням розроблених моделей розрахунку показників якості електроенергії, збіжністю розрахункових та експериментальних даних з визначення рівнів вищих гармонік, що генеруються в мережу вентилями перетворювачами та електропічними установками з похибкою, яка не перевищує 10 %.

Проблема забезпечення електромагнітної сумісності у системах електропостачання промислових підприємств є комплексною та визнаною науковцями всього світу. Нормалізація показників якості напруги за параметрами несинусоїдальності призводить до підвищення енергетичної ефективності передачі та споживання електроенергії. В Україні під час воєнного стану проводяться наукові дослідження в галузі електромагнітної сумісності та перехідних процесів потужними науковими школами Інституту електродинаміки НАН України [10-12]. Результати комплексних досліджень проблематики несиметрії та несинусоїдальності напруги в умовах промислових

мереж та мереж загального призначення академіка НАН України Шидловського А.К. дозволили обґрунтувати наукові основи електромагнітної сумісності електричних мереж та розробити нормативні документи стандартизації показників якості напруги [13]. Розвиток та масове впровадження сонячних електростанцій у 2017-2023 роках були потужним викликом для забезпечення електромагнітної сумісності та балансування режиму енергосистеми. Оцінка проблематики та розробка концептуальних підходів до вирішення проблеми розглянуто у роботі [14-16]. Роботи академіка Жаркіна А.Ф. зі створення гібридних фільтро-компенсуючих пристроїв дозволяють ефективно усувати несиметричні та несинусоїдальні режими у промислових та муніципальних електричних мережах [17-19]. Наукові дослідження у MicroGrid системах (член-кореспондент Блінов І.В.) дали можливість отримати нові залежності параметрів режиму двонаправлених перетворювачів від параметрів живлячої мережі та оптимізувати показники якості в подібних системах обмеженої потужності [20-21]. Дослідження нормальних та аварійних перехідних процесів у електроенергетичних системах під час воєнних спрямовано на забезпечення стійкості режимів генерації та споживання енергії. При цьому важлива роль приділяється особливостям вибору потужності та місця приєднання Storage-систем до електричних мереж (роботи академіка НАН України Кириленка О.В) [22-24].

Науковці Приазовського технічного університету заклали наукові основи аналізу режимів вищих гармонік та інтергармонік при роботі потужних вентильних перетворювачів технологічного обладнання гірничо-металургійних комбінатів та розробили ефективні методи та засоби активної фільтрації неактивних складових струму та напруги (професори Жежеленко І.В. та Саєнко Ю.Л.) [25-27].

Роботи наукової школи енергетики та енергетичних технологій академіка Півняка Г.Г. (НТУ «Дніпровська політехніка») напрямку гірничо-металургійної енергетики стосуються розвитку теорії електромагнітної сумісності, враховуючи унікальні специфічні режими роботи гірничих підприємств. При цьому

запропоновано нові методики визначення показників якості напруги з обґрунтуванням коефіцієнтів графіків вищих гармонік та оптимізації перетоків реактивної потужності у шахтних електричних мережах [28-32].

Практична цінність роботи полягає в:

- розробці уточненого розрахункового співвідношення для визначення коефіцієнтів викривлення синусоїдальності та несиметрії напруги за зворотньою послідовністю;
- розробці методики, алгоритму та програмного забезпечення для моделювання втрат активної потужності й електроенергії у промислових СЕП;
- розробці моделі визначення резонансних явищ у вузлах навантаження 6-10-35 кВ з вентильними перетворювачами та сонячними інверторами;
- розробці рекомендацій щодо вибору числа та потужності пристроїв компенсації реактивної потужності при врахуванні можливості виникнення резонансних явищ;
- обґрунтуванні розрахунків показників несинусоїдальності та несиметрії напруги при змінах граничних значень потужності короткого замикання енергосистеми;
- розробці технічного рішення з вибору параметрів фільтро-компенсуючих пристроїв, з врахуванням частотного спектру вищих гармонік та інтергармонік;
- використанні матеріалів роботи при підготовці фахівців у сфері електроенергетики.

Матеріали дисертаційної роботи використані у навчальному процесі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» в дисциплінах для магістрів «Електромагнітна сумісність систем електропостачання» та «Інтелектуальне електропостачання Smart Grid у системах з розподіленою генерацією» та при виконанні кваліфікаційної роботи студентів, які навчаються за спеціальністю G3 «Електрична інженерія».

Реалізація результатів роботи

Розроблені за результатами роботи методичні рекомендації щодо визначення точок приєднання та параметрів компенсуючих пристроїв в умовах несинусоїдальності напруги прийняті «ДТЕК ШУ Героїв Космосу» для використання у виробничих умовах. Методика розрахунку показників несинусоїдальності при роботі електропічних установок врахована у виробничому процесі на АТ «Нікопольський завод феросплавів». Наукові результати щодо забезпечення електромагнітної сумісності систем електропостачання з нелінійними навантаженнями та відновлюваними джерелами енергії застосовані при проектуванні та будівництві нових сонячних електростанцій компанією «АЛЬФА ЕНЕРДЖІ ГРУП». Результати впровадження підтверджені відповідними документами.

Особистий внесок автора

Усі результати експериментальних і теоретичних досліджень, наведені в роботі, отримано особисто або за безпосередньою участю. Автором сформульовано мету, ідею і наукові положення роботи; виконано теоретичні дослідження показників електромагнітної сумісності систем електропостачання промислових підприємств; розроблено модель визначення показників несиметрії та несинусоїдальності напруги; сформульовано висновки і рекомендації щодо визначення значень вищих гармонік та інтергармонік, які генеруються в електричну мережу електропічними установками та вентиляльними перетворювачами.

У роботах, виконаних у співавторстві: побудовано математичні моделі, виконано обчислювальні експерименти, проведено аналіз результатів у працях [2; 3; 5–7, 9; 11]; виконано аналітичний огляд у праці [1]; аналіз, постановку проблеми, обговорення та узагальнення результатів у працях [4; 5; 10]; обробку та аналіз експериментальних даних, порівняльний аналіз з чисельними результатами у працях [3–10].

Апробація результатів роботи

Основні положення та наукові результати роботи розглядалися на міжнародних наукових та науково-практичних конференціях: IX міжнародна

науково-практична конференція «Проблеми раціонального використання соціально-економічного, еколого-енергетичного, фінансово-інвестиційного потенціалу України та її регіонів в умовах воєнного стану», (м. Луцьк, 29 квітня, 2024 р.), «INTERNATIONAL SCIENTIFIC- PRACTICAL CONFERENCE PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SCIENCE, EDUCATION AND TECHNOLOGY, (Aarhus, Denmark, 3 August, 2024)», Семінар Наукової Ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики». Інститут Електродинаміки НАН України (11 вересня 2024).

Публікації

Основні наукові положення і результати дисертації опубліковано у 11 наукових працях, з них: 7 статті – у фахових виданнях, що входять до переліку МОН України, 4 тези – у матеріалах наукових конференцій.

Структура и об'єм роботи

Дисертація містить 163 сторінок друкованого тексту, 48 рисунка і 10 таблиць, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 4 додатки на 16 сторінках, списку використаних джерел, що містить 80 найменувань на 9 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 188 сторінок.

Роботу виконано на кафедрі електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Автор висловлює свою вдячність колективу кафедри за допомогу в проведенні досліджень.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз проблеми електромагнітної сумісності в електричних мережах обмеженої потужності

Актуальною проблемою забезпечення надійного та якісного електропостачання для потужних промислових підприємств під час воєнного стану є проблема одночасного виконання вимог якості напруги та можливості існування стійкого режиму електроспоживання [28]. Останнім часом при переоснащенні виробництва значно зросла кількість вентильних перетворювачів AC/DC, DC/AC та DC/DC в електричних мережах та актуальною стає проблема електромагнітної сумісності та якості електроенергії (ЯЕ) у режимах нетипових для централізованих енергосистем [29-30]. Достовірну інформацію про шкідливі наслідки від порушення ЕМС дають економічні збитки та індекс надійності системи. За даними наукових досліджень річний економічний збиток для загальносвітової системи, обумовлений низькою якістю електроенергії, складає близько 700 млрд. дол./рік [30], за рахунок небезпечного впливу, головним чином, вищих гармонік, а також несиметрії і коливань напруги. В Україні експертні оцінки за 2017-2021 рік показують рівень збитків 10,0 млрд. дол. [29-30].

Розмах відхилень показників якості електроенергії на підприємствах різних галузей зазвичай широкий та складно прогнозований і у багатьох випадках виходять за межі допустимих норм відповідних стандартів, наприклад, ДСТУ EN50160 [9]. Стрімкий розвиток та збільшення складу нелінійних, несиметричних та різкозмінних навантажень у електричних мережах Європи та США випереджає впровадження заходів по нормалізації електромагнітних завад, які емісують в мережу живлення [31-32].

Групова загальна потужність керованих вентильних перетворювачів на прокатних станах різних систем досягає 2000 МВт, на алюмінієвих комбінатах - понад 4000 МВт, на гірничо-видобувних та гірничо-збагачувальних

підприємствах одинична потужність високовольтних перетворювачів досягає 8 МВт [32, 36]. Електродугові сталеплавильні печі, які експлуатуються в Україні, мають пічні трансформатори потужністю до 200 МВА [30]. Такі значні потужності електротехнологічних установок свідчать про надзвичайно потужний рівень електромагнітних завад [30].

Досліджено, що економічний збиток, від низької ЯЕ, має електромагнітну та технологічну змінну [32]. Електромагнітна складова визначається зростанням додаткових втрат активної потужності і швидкою деградацією твердої ізоляції електрообладнання [30, 37]. Технологічна складова збитку виникає на продуктивність електротехнологічних установок і підвищує собівартість продукції, що випускається, а також може привести до часткової або повної зупинки виробництва.

Зростання додаткових втрат електроенергії за рахунок порушення ЕМС може досягати 14-22% [30]. Рівень відносних втрат електроенергії в електричних мережах країн з розвинутою економікою згідно з даними за 2015-2021 рр. знаходяться в межах 4-8%. Наприклад у Німеччині - 4%, у Франції-7, в Австрії, Бельгії, Чехії - 5, США -6, Італії, Швейцарії та Японії - 7% [30]. Ці країни мають високе значення внутрішнього валового продукту (ВВП) за паритету купівельної спроможності (ПКС) на одного мешканця країни, що перевищує 20 тис.дол.: США - 54,5 тис.дол, Австрія і Німеччина-46,5, Італія - 35,4, Франція - 40,7 тис.дол. Це доводить певний зв'язок між відносними втратами електроенергії та рівнем життя населення у певній країні [30].

Високий рівень втрат в електричних мережах під час воєнного стану пов'язаний з втратою частки генерації та магістральних електричних мереж і системоутворюючих підстанцій, низьким рівнем коефіцієнта потужності, швидкою деградацією ізоляції електричних машин та кабельних ліній, некоректними налаштуваннями засобів FACTS і регулювання напруги та проблемою якості електричної енергії [33, 38].

Незадовільний рівень сумісності призводить до зниження енергетичної ефективності електричних мереж за рахунок збільшення втрат активної

потужності та перетоків неактивних складових потужності, технологічних витрат електроенергії на транспортування та перетворення, зниження терміну служби електрообладнання, збільшення капітальних вкладень в електричні мережі, порушення умов нормального функціонування енергетичної системи [37-38].

З початком воєнного стану, жодних уточнень та рекомендацій до методик визначення втрат електроенергії при збереженні електропостачання стаціонарних промислових установок та зниження потужності енергосистеми не було введено в нормативні документи, тому одне з першочергових завдань забезпечення стійкості режиму функціонування систем електропостачання є моделювання адекватних значень втрат потужності та енергії в електричних мережах при невизначеності початкових умов та рандомних варіаціях вузла навантаження та власних джерел децентралізованої генерації [30].

Електромагнітна сумісність відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)

У країнах Євросоюзу частка генерації ВДЕ сьогодні значно перевищує долю джерел традиційної теплової генерації (наприклад у Німеччині та Іспанії). Це у деяких випадках призводить до масштабних системних аварій (блекаут у Іспанії та Португалії у квітні 2025 року).

До 2030 році частка ВДЕ становитиме 18,6%, а до 2050 р збільшиться до 48% [32]. Таким чином, спостерігається стрімке зростання ВДЕ у долі генерації електроенергії, до 2050 року ситуація зміниться в рази, при цьому генерація сонячних електростанцій зросте в 30 разів, при середньорічному темпі зростання 10,2%, а генерація ВЕС збільшиться в 11 раз при середньорічному темпі зростання 7,1% [33, 39].

Сонячна генерація має інший характер генерації, який корелюється з сонячною активністю, тому надлишок енергії протягом періодів максимальної сонячної активності викликає додаткові складності навіть для нормального режиму роботи енергосистеми. Ця нерегульована та складно прогнозована генерація повинна резервуватися джерелами енергії на вуглецевому паливі або гідроакумулюючими електростанціями, також перспективним є розвиток

систем накопичення енергії для забезпечення балансів потужності. Дослідження робіт закордонних вчених [42, 52, 61], показало проблему нерівномірності графіків генерації за реактивною потужністю та високих значень коефіцієнтів несинусоїдальності (рис. 1.1-1.2).

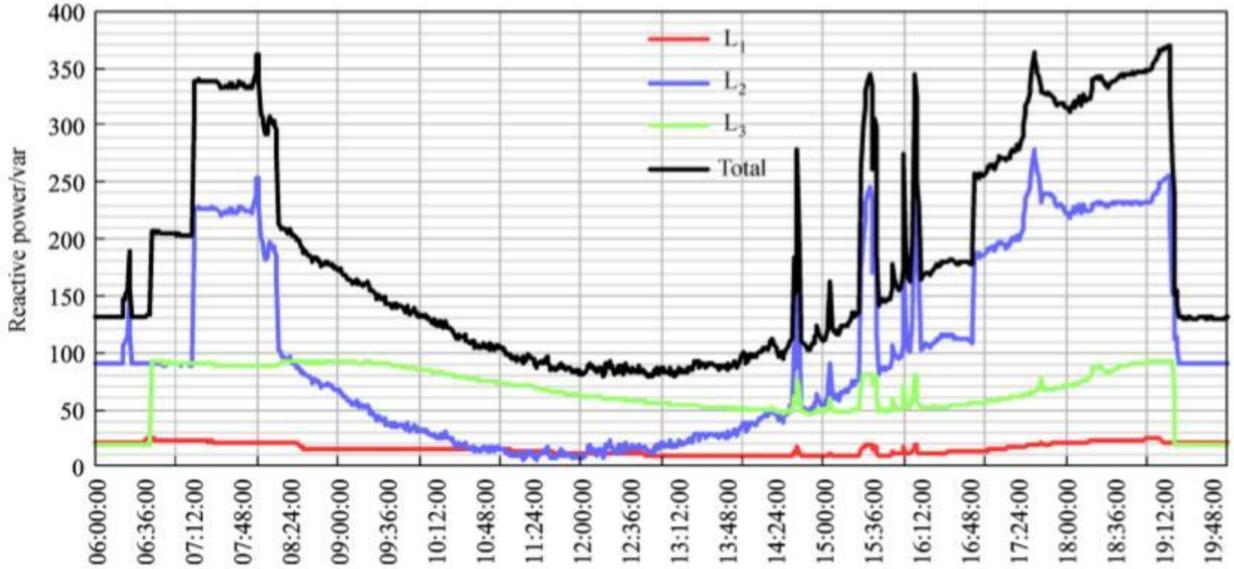


Рис. 1.1. Залежність реактивної потужності СЕС у часі

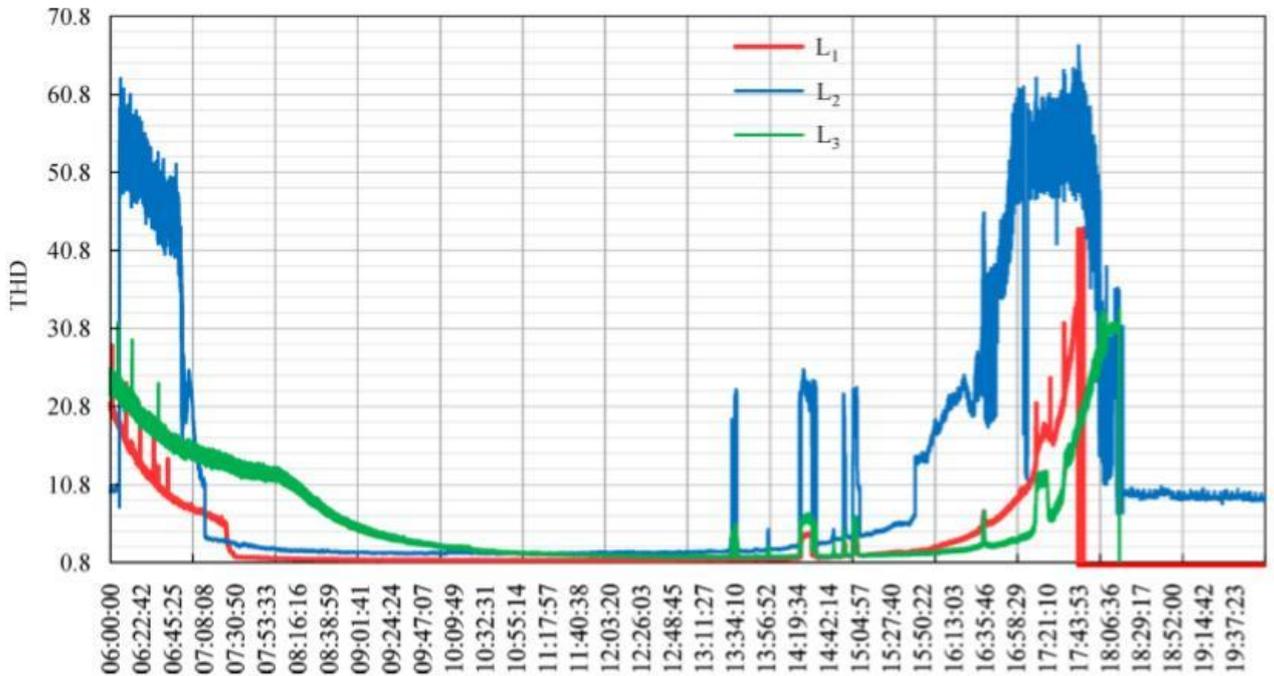


Рис. 1.2. Залежність коефіцієнта несинусоїдальності сонячного інвертора у часі

З електромагнітної точки зору та рівнів завад *вітрова генерація* визначається особливими режимами, технічними та мережевими викликами. Це пояснюється нестабільним вітровим ресурсом. Різкі зміни швидкості вітру створюють складності балансування потужності у енергосистемі, що вимагає наявності швидких резервів (наприклад, газових ТЕС або системи зберігання енергії). Проблеми з інтеграцією у мережу при масовому приєднанні ВЕС системно погіршує якість електроенергії (коливання напруги, гармоніки). Крім того, найкращі місця для вітряків часто віддалені від центрів споживання, що потребує будівництва довгих і дорогих ліній електропередач. Помилки у прогнозах погоди призводять до непередбачуваних дефіцитів або надлишків енергії, що збільшує витрати на балансування ринку. Великі вітропарки можуть впливати на локальну температуру поверхні та вологість ґрунту, перемішуючи шари повітря. Дослідження показали, що у масштабах цілого континенту цей ефект може спричиняти незначне локальне потепління. Будівництво фундаментів та під'їзних доріг призводить до ущільнення ґрунту, ерозії та фрагментації природних середовищ існування екосистем. Складний характер перехідних процесів показано на рис. 1.3 [30].

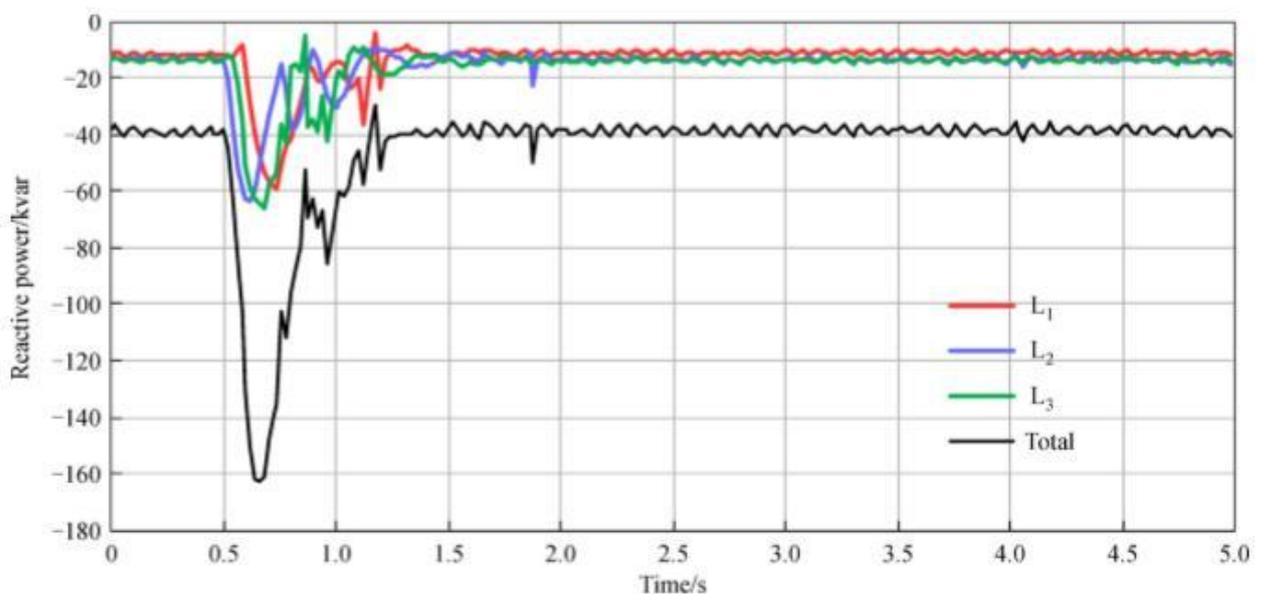


Рис. 1.3. Вигляд перехідного процесу за реактивною потужністю при роботі ВЕС

Пульсуючі режими генерації вітроелектростанцій при змінах швидкості та напрямку вітру призводить до низькочастотних коливань і створюють нові проблеми не тільки для стійкості енергосистеми, а й для існування живих організмів та здоров'я людей [29-30].

Структурні зміни енергетичного балансу при інтеграції ВДЕ призводить до зменшення постійних часу елементів систем електропостачання, збільшує чутливість параметрів режиму до малих збурень. В результаті енергосистема набуває нових нестійких властивостей, які проявляються у виникненні низькочастотних коливань її режимних параметрів. Експертними оцінками та експериментальним моніторингом встановлено, що ситуація значно погіршилася при поступовому переходу до децентралізованого принципу електропостачання та технічних обмеженнях потужності енергосистеми [28-29].

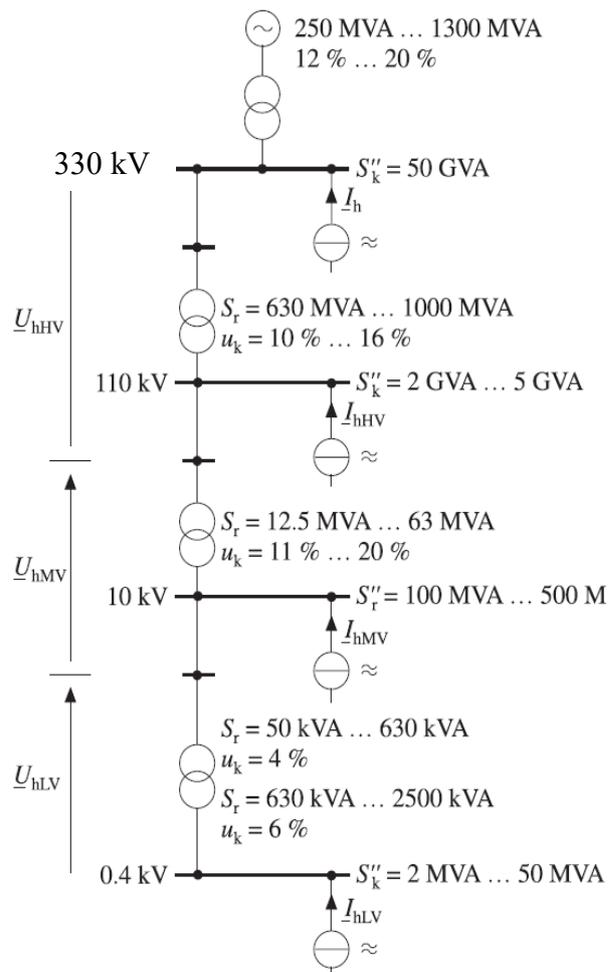


Рис. 1.4. Значення потужності КЗ енергосистеми на різних ступенях розподілу електроенергії

Український досвід інтеграції вітроелектростанцій показав наявність додаткового (в порівнянні з традиційними джерелами електроенергії) зменшення інерційності енергосистеми та системне погіршення ЕМС у післяаварійних режимів (несинусоїдальність, провали та флікери напруги).

Дослідження показали, що дана особливість притаманна потужним промисловим підприємствам. Як свідчить досвід, раціональний діапазон значень потужності короткого замикання становить: в мережах 0,4 кВ – 2...50 МВА, у мережах 10 кВ – 100...500 МВА, в мережах 110-220 кВ – 2000... 5000 МВА, в мережах 330 кВ – 50000 МВА (рис. 1.4).

Реальні значення потужності короткого замикання у вузлах навантаження дозволили виконати пошук уточнених теоретичних основ обмеження струмів короткого замикання, налаштування систем релейного захисту та інтелектуальних пристроїв FACTS [30].

1.2. Аналіз нормативних документів визначення рівнів електромагнітної сумісності

Електрична енергія як будь-який товар має відповідати ряду якісних критеріїв. В Україні якість електричної енергії має відповідати вимогам ГОСТ 13109-97 та ДСТУ EN 50160. Стандартами нормується кілька показників якості електроенергії (ПЯЕ).

Відхилення напруги визначається інтегральним значенням на інтервалі усереднення 1 хв, незалежно від класу електричної мережі, характеру навантаження, наявності засобів місцевого та централізованого регулювання напруги та стану мережі живлення. При цьому розрахункове середнє значення напруги визначається [30]:

$$U_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N U_i^2 / N}, \quad (1.1)$$

де U_i – значення напруги в i -тому спостереженні (В, кВ);

N – число спостережень (за 1 хв повинно бути не менше 18).

За нормами допустимі значення відхилень напруги на приєднаннях електроприймачів протягом доби вимірювань знаходяться в межах $\pm 10\%$ від $U_{ном}$, при цьому 95 % часу відхилення напруги повинні знаходитися в межах $\pm 5\%$ від $U_{ном}$ (допустимі значення). При цьому не враховується швидкість зміни навантаження та зв'язок відхилення напруги з параметрами несинусоїдальності [30].

Показники ЕМС за відхиленням напруги у точках розподілу мереж ОСП та ОСР мають бути висвітлені у договорах на користування електричною енергією між електропостачальною організацією і споживачем з урахуванням необхідності виконання норм стандарту на затисках потужних електротехнологічних установок.

Несинусоїдальність напруги стандартизується [30]:

- коефіцієнтом викривлення синусоїдальності напруги K_U (%);
- коефіцієнтом n -ї гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$ %, що

визначається за виразами:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100 \quad \text{і} \quad K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2} \cdot \frac{100}{U_{ном}}, \quad (1.2)$$

де U_n – діюче значення напруги n -ї гармоніки (В, кВ).

Нормально і гранично допустимі значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги в точках загального приєднання до електричних мереж наведені в табл. 1.1 [4].

Табл. 1.1. Значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги, %

Нормально допустимі				Гранично допустимі			
$U_{ном}$, кВ				$U_{ном}$, кВ			
0,38	6-20	35	11-330	0,38	6-20	355	110-330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Як видно, даний стандарт нормує лише показники несинусоїдальності за напругою в електричних мережах стандартних номінальних значень напруги. Жодних вимог до дозволеного спектру та амплітуд інтергармонік та субгармонік не передбачено. Системи електропостачання промислових підприємств проєктують з 3-4 рівнями ієрархії розподілу електроенергії, що формує особливий клас електричних мереж, де виконання необхідних рівнів електромагнітної сумісності ускладнено технічними та режимними особливостями.

Несиметрія напруг стандартизується [30]:

- коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} (%);
- коефіцієнтом несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U} (%),

що визначаються за виразами:

-

$$K_{2U} = 100 \cdot \frac{U_{2(1)}}{U_{ном}} \quad \text{і} \quad K_{0U} = 100 \cdot \frac{U_{0(1)}}{U_{ном}}, \quad (1.3)$$

де $U_{2(1)}$ – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг (В, кВ);

$U_{0(1)}$ – те ж саме нульової послідовності основної частоти (В, кВ);

$U_{ном}$ – номінальне значення лінійної напруги (В, кВ).

Номінальні та критично допустимі значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю в точках загального приєднання складають відповідно 2,0 % і 4,0 % [30].

Досліджуючи несиметрію в розподільчих мережах металургійних та гірничих підприємств, були отримані залежності показників несиметрії напруги при зміні електричних навантажень та потужності КЗ енергосистеми. Середнє значення коефіцієнта несиметрії K_{2U} протягом 4 діб не перевищувало значення 1,67% при максимальному значенні $K_{2U} = 2,5\%$.

Відхилення частоти Δf (Гц) розраховують за залежністю:

$$\Delta f = f_y - f_{ном}, \quad (1.4)$$

де f_y – усереднене значення частоти на інтервалі часу 20 с;

$f_{ном}$ – номінальне значення частоти (Гц).

Відповідно до [30] номінальні та критично допустимі значення відхилення частоти складають $\pm 0,2$ і $\pm 0,4$ Гц.

Відхилення частоти в системах електропостачання промислових підприємств можливе при невиконанні умов балансу активних потужностей та обмеженнях енергосистеми. При переході до децентралізованої енергетики питання розробки нових принципів виконання АЧР вимагає окремого дослідження та розробки додаткового комплексу уставок засобів мережевої автоматики.

До числа пріоритетних задач Уряду України під час воєнного стану слід віднести імплементацію ринку електроенергії та створення нової моделі захищеної енергетичної системи, сумісною з системами країн Євросоюзу та розвиток конкурентного середовища для виробників та споживачів електроенергії, забезпечення стійкості та надійності електричних режимів [33-35].

Для рішення цих задач необхідне вдосконалення системи державного технічного регулювання в енергетиці, методик забезпечення енергетичної ефективності функціонування енергосистеми та нормативно-правової бази для регулювання взаємовідносин об'єктів енергоринку, впровадження засобів цифрової трансформації енергетики [36-38]. Для забезпечення можливості паралельної роботи енергосистеми України з енергетичним об'єднанням країн Європи, необхідно привести стандарти України до відповідності європейським вимогам. [39-40]. При цьому має бути врахована частка розподіленої генерації від відновлюваних джерел енергії, розвиток системи диспетчеризації, захисту

та протиаварійної автоматики, а також технічних засобів для забезпечення економічно обґрунтованих рівнів електромагнітної сумісності [43-44].

Вирішення проблеми ЕМС знаходиться у виявленні режимів роботи споживачів з несиметричними та несинусоїдальними режимами роботи споживання електричної енергії для подальшої розробки рекомендацій з оптимізації перетворення енергії, сумісної з електричною мережею за певними параметрами. Для підприємств гірничо-металургійної промисловості такі дослідження є досить складними, враховуючи високі значення встановленої потужності споживачів та їх відповідальність [30].

Досліджуючи ЕМС як один з показників якості товару (електроенергії), необхідно на різних життєвих циклах енергії дотримуватися цілого ряду рекомендацій і норм, що охоплюють комплекс системних рішень [30].

При дослідженні індексів надійності та ЕМС систем електропостачання промислових підприємств під час воєнного стану, пропонується комплексне поняття «енергетична ефективність», яке об'єднує вимоги до якості напруги та стійкості режиму при формуванні спеціальних режимів споживання електроенергії з оптимальним перетоком реактивної потужності та врахуванні можливостей централізованої енергосистеми [29-30].

Американський стандарт IEEE 519-92

У різних країнах національні норми електромагнітної сумісності тісно пов'язані з такими організаціями, як Міжнародна конференція з великих енергетичних систем (СІГРЕ), Міжнародна спілка з виробництва та розподілу електроенергії (UNIPEDA), Спеціальний міжнародний комітет з радіоперешкод (СІСПР). Питаннями впливу споживачів електроенергії на мережі електропостачання займаються організації UNIPEDA та МЕК [45-46]. Технічні комітети CELENEC та СІСПР аналізують проблеми іскріння, розробляють європейські та світові рекомендації та норми електромагнітної сумісності. СІГРЕ займається проблемами техніки зв'язку, телемеханіки, розподільчих пристроїв, вторинної комутації, біологічного впливу високих напруг.

Стандарт ДСТУ EN 50160 [9].

Даний нормативний документ є перекладом Європейського стандарту та сьогодні є основним стандартом, який нормує показники якості напруги в Україні, встановлює терміни та значення для основних характеристик напруги в точках приєднання користувачів до електричних мереж змінного струму низької, середньої та високої напруги загальної призначеності в нормальних умовах експлуатації. Цей стандарт установлює норми або значення, у межах яких можна знайти очікувані характеристики напруги на будь-якому терміналі живлення електричних мереж загальної призначеності, але не визначає воєнні та техногенні ризики [9].

Згідно з ДСТУ EN 50160, електроенергія вважається якісною, якщо її параметри в точці приєднання відповідають таким нормам:

- Частота: Для ОЕС України має бути протягом 99,5% часу за рік.
- Відхилення напруги: Допустимі межі становлять від номінального значення. З 1 липня 2025 року стандартом напруги в Україні офіційно стає 230 В (раніше 220 В), тобто допустимий діапазон — від 207 В до 253 В.
- Коефіцієнт гармонік (*THD*) Сумарний показник спотворень до 25-ї гармоніки включно не повинен перевищувати 8% для мереж низької напруги.
- Флікер (мерехтіння): Показник довготривалого флікера (P_{lt}) має бути протягом 95% часу спостереження.
- Несиметрія напруги: Складник зворотної послідовності не повинен виходити за межі 0–2% від прямої послідовності.

Установлені в цьому стандарті характеристики напруги не призначено для використання як рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС) або допустимих норм емісії кондуктивних збурень для користувача, підключеного до електричної мережі загальної призначеності [9].

Показники якості напруги зазнають змін під час нормальної роботи системи електропостачання внаслідок коливання потужності навантаження,

наявності збурень, які генерують певні типи обладнання, а також під час аварій, які спричинено переважно зовнішніми подіями.

Таким чином, діючий стандарт не враховує сучасні воєнні виклики енергосистем та промислових систем електропостачання та вимагає уточнення при використанні післяаварійних та тимчасових схем забезпечення електропостачанням критичних промислових об'єктів.

1.3. Особливості електричних режимів промислових технологічних установок

Режими споживання енергії електротехнологічними установками (ЕТУ) найбільше залежать від відхилення та несинусоїдальності напруги. Вплив інших показників необхідно досліджувати індивідуально. При наявності тривалих відхилень напруги змінюється споживання активної потужності та енергії, а також неактивні складові повної потужності. Можливі незворотні процеси в ізоляції, порушення технологічних операцій, погіршення індексів SAIDI та SAIFI. Коригування можливостей виробництва ЕТУ від якості напруги пропонуємо оцінювати залежністю $Z = Z(\delta U)$.

Економічний збиток при роботі ЕТУ з відхиленнями напруги δU , представляється рівнянням [30]:

$$Z(\delta U) = (E_n K + I_{II})(1 - \Pi^*) + C_{y,\varepsilon} W_{II} \Pi^x (w^x - 1), \quad (1.5)$$

де K – значення капітальних витрат на електрообладнання;

I_{II} - незмінна частина витрат виробництва, тис. грн./рік;

Π^* - зміни продуктивності ЕТУ;

$C_{y,\varepsilon}$ - питома вартість ЕЕ, грн./кВт·год;

W_{II} - споживання активної енергії за 1 рік, кВт·год;

w^x - відносна зміна питомих витрат ЕЕ.

Графічні залежності змін продуктивності ЕТУ різних типів (печі опору періодичної дії (криві №2 та 5), дугові сталеплавильні печі (№№ 3,4) та індукційних тигельних печей (№№1, 6) наведено на рисунку 1.5.

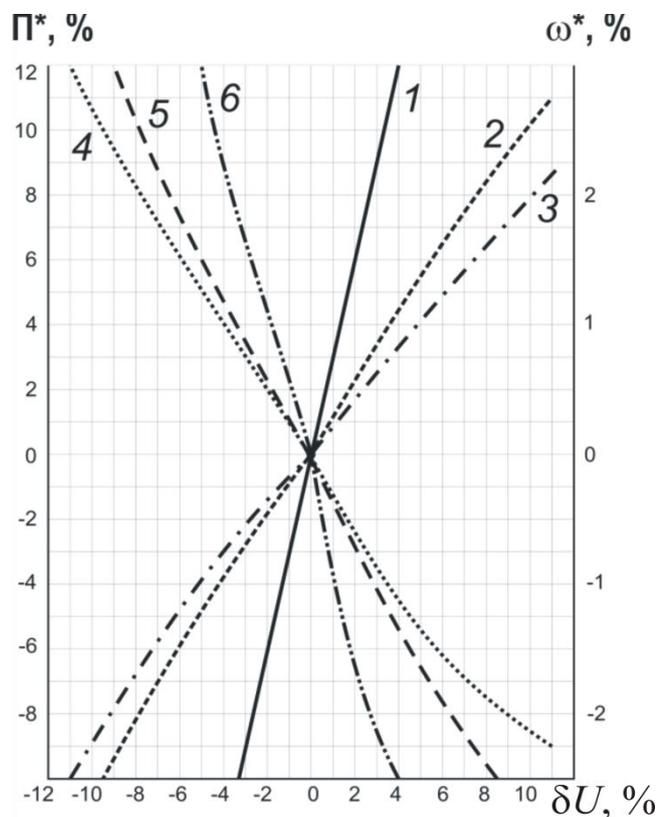


Рис. 1.5. Зміна продуктивності ЕТУ від показника відхилення напруги

Важливим показником функціонування ЕТУ є енергетична ефективність (раціональність використання електроенергії для технологічних операцій). Проаналізуємо енергетичні показники роботи ЕТУ, щоб визначитися з можливими варіантами пошуку їх раціональних (максимальних) значень під час реалізації спеціальних режимів живлення. Розглянемо основні показники раціональності використання електроенергії, щоб показати, як використовується енергія в електроприймачах з тиристорним керуванням за різних режимів споживання активної потужності. Для оцінки ефективності використання електроенергії у мережах змінного струму в електротехніці використовуються складові повної потужності та енергетичні показники споживачів. Складові повної потужності такі [25, 30]:

- активна потужність P дорівнює середньому значенню миттєвої потужності за період напруги живлення і визначає кількість електромагнітної енергії, що незворотно перетворюється в тепло;

- повна потужність S визначає розрахункові струми і напругу мережі, вона завжди більше фактично передається потужності через існування неактивних складових потужності, які, не створюючи корисного ефекту, призводять до збільшення втрат в мережі живлення і джерелі.

- реактивна потужність Q або потужність зсуву, обумовлена зсувом по фазі основної гармоніки струму навантаження щодо напруги синусоїдного джерела живлення.

Основні енергетичні показники, за якими оцінюватимемо ефективність роботи ЕТУ [30]:

- коефіцієнт k_m потужності показує, яка частка від найбільшої потужності, яку можна отримати від джерела живлення при заданих значеннях струму і напруги, використовується навантаженням;

- коефіцієнт зсуву k_c , характеризує зсув по фазі між першою гармонікою струму та напруги;

- коефіцієнт викривлення k_u показує зміст гармонійних складових.

Сьогодні технологічні процеси металообробки та плавки реалізується в електропечах з використанням трифазних симетричних режимів нагрівачів. Напруга, отже, і потужність на нагрівачах регулюється симетрично переважають у всіх трьох фазах. Залежність складових повної потужності та енергетичних показників джерела при трифазному живленні електропечей показані на рис. 1.6.

Аналіз залежностей, показав що високі енергетичні показники установки досягаються при роботі ЕТУ у режимі максимальної потужності $\left(\frac{P}{P_\sigma}\right) = 1$.

Такий режим досягається при кутах управління перетворювачів, що дорівнює нулю ($\alpha = 0$). Крім того, за таких режимів установка практично не споживає реактивну потужність. Зі збільшенням кута управління енергетичні показники

знижуються, і установка споживає реактивну потужність, незважаючи на активний характер опорів навантаження. Також зі зростанням кута управління струм установки носить уривчастий несинусоїдальний характер і відстає від напруги.

Таким чином, очевидно, що енергетичні показники нагрівальної установки підтримуються досить високому рівні при кутах . Однак, враховуючи специфіку режимів роботи електропечей опору, підтримка кута управління на заданому рівні можлива тільки при реалізації спеціальних (неповнофазних) режимів електроспоживання. Це зумовлює необхідність розробки аналітичних залежностей щодо аналізу зміни енергетичних показників ЕТУ при зміні фазності електропостачання.

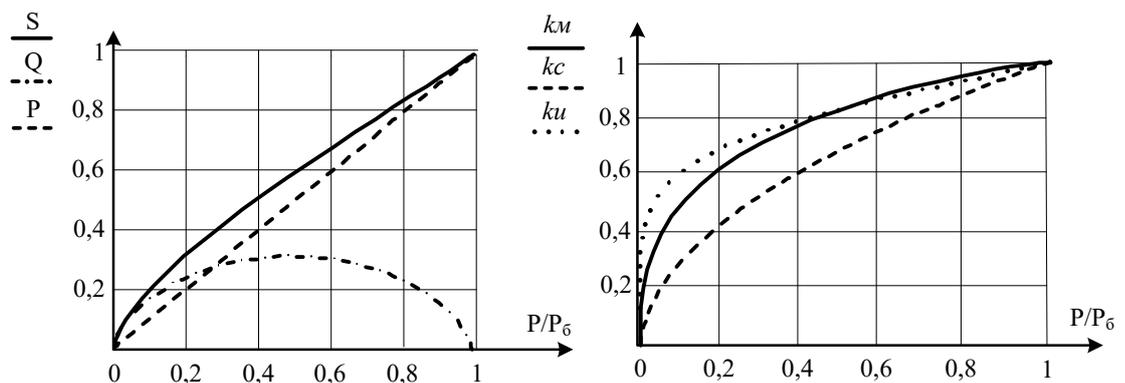


Рис. 1.6. Залежності складових повної потужності

Особливості електричних режимів електропечей опору

Електричні печі опору (ЕПО) застосовуються для технологічних операцій на машинобудуванні, металургії, хімічної промисловості. У цих установках реалізовано принцип отримання теплової енергії при протіканні електричного струму через провідник, згідно із законом Джоуля-Ленца. Електропечі опору випускаються двох типів: ЕПО непрямого нагріву та ЕПО прямого (контактного) нагріву. При прямому нагріванні тепло виділяється в самому оброблюваному виробі, яке включається послідовно в ланцюг струму. Однак найбільшого поширення набули установки непрямого нагріву, в яких тепло виділяється в спеціальних нагрівачах, поміщених в робочу камеру, і

передається оброблюваному виробу за законами теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Електропечі опору як приймачі електроенергії відносяться до споживачів із відносно спокійним графіком навантаження. Потужність їх порівняно невелика (100-150 кВт на одну зону), тому викликане позиційним регулюванням температури періодичне включення і відключення печей не викликає помітних коливань напруги в мережі живлення. ЕПО зазвичай отримують живлення від цехових розподільчих мереж напругою 380/220 безпосередньо або через пічний трансформатор (рис. 1.7).

При безпосередньому підключенні електропечі з позиційним регулятором температури до мережі живлення коефіцієнт потужності такої установки близький до одиниці. Якщо електропіч комплектується знижувальним або регулювальним трансформатором, то коефіцієнт потужності знижується за рахунок нелінійності характеристики намагнічування трансформатора.

Знижувальні трансформатори дозволяють знизити робочу напругу, дають можливість працювати з нагрівачами великого перерізу, більш міцними та надійними. Однак ККД малопотужного трансформатора не перевищує 92-95% при номінальному навантаженні. Застосування таких трансформаторів для живлення електропечей призводить до збільшення питомої витрати електроенергії, тому в даний час підприємства-виробники пічного обладнання відмовляються від застосування в схемах електропостачання печей регулювальних і знижувальних трансформаторів, віддаючи перевагу тиристорним джерелам регулювання напруги на нагрівачах [30].

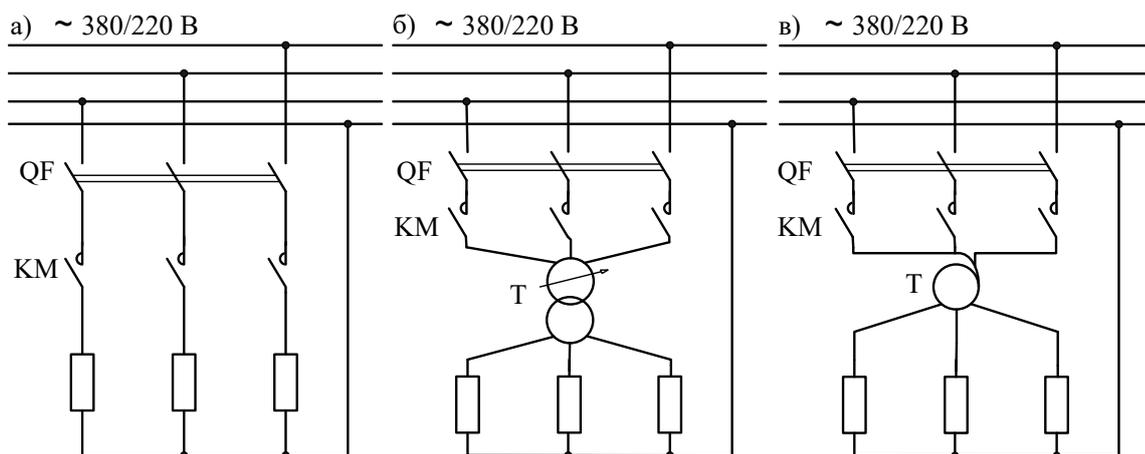


Рис. 1.7. Схеми електропостачання ЕПО:

а) - при прямому підключенні; б) – при підключенні через пічний трансформатор; в) – при підключенні через автотрансформатор

Електричне обладнання, що застосовується в ЕПО, може бути поділено на силове обладнання, апаратуру управління, вимірювальну апаратуру та пірометричне обладнання.

До силового обладнання відносяться понижувальні та регулювальні трансформатори та автотрансформатори, двигуни, що приводять в дію приводні механізми, силова комутаційна апаратура. Для живлення електропечей застосовуються знижувально-регулювальні трифазні трансформатори типу ТПТ і однофазні типу ТПО. Трансформатори типу ТПТ виконуються з номінальною потужністю від 40 до 250 кВА, трансформатори типу ТПО – від 25 до 250 кВА. Силова комутаційна апаратура, що застосовується в схемах електропостачання ЕПО, та сама, що і в схемах інших споживачів напругою 380/220 В: автоматичні вимикачі, захисні запобіжники, контактори, рубильники.

Пірометричними приладами має бути забезпечена будь-яка електрична піч. Для печей невеликої потужності – це термопара з приладом, для відповідальних високотемпературних печей – це термометри опору.

До сучасних електропечей пред'являються такі вимоги:

- автоматична підтримка температури на заданому значенні;
- широкий діапазон регулювання температури;

- надійність та економічність схеми електропостачання, особливо в умовах графіків відключення та обмежень можливостей енергосистеми;
- високий ККД і електромагнітна сумісність з мережею живлення.

Для автоматичного регулювання температури в електропечах необхідні пристрої зміни потужності, що підводиться до нагрівачів. Такими пристроями є позиційні чи адаптивні регулятори температури. Найбільшого поширення набули дво- і трипозиційні системи регулювання. При двопозиційному регулюванні температура в робочому об'ємі печі контролюється термодатчиком і досягаючи температури завдання відбувається відключення печі від джерела живлення за допомогою контактора. Далі піч працює в режимі „ввімкнено – відключено”, внаслідок чого спостерігаються пульсації температури.

Переваги двопозиційного регулювання: простота виконавчих органів, відсутність шкідливого впливу на мережу живлення у вигляді вищих гармонік, несиметрії, дешевизна конструкції.

При трипозиційному регулюванні потужність, яку забезпечує СЕП, змінюється при перемиканні нагрівачів із зірки на трикутник. Регулювання температури таким способом дозволяє знизити потужність, споживану з мережі, тим самим зменшити швидкість зміни температури і амплітуду її коливань.

Подібні алгоритми керування мають досліджуватись з позиції максимальної енергетичної ефективності з впровадженням інтелектуальних регуляторів температури та можливостями симетрування навантаження.

Особливості електричних режимів дугових сталеплавильних печей.

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) є поширеним видом потужних і енергоємних приймачів електроенергії на промислових підприємствах, особливо на металургійних та машинобудівних заводах. Зростання потужності і ускладнення електротермічних агрегатів, специфічні умови їх роботи викликають необхідність вирішенні складних електротехнічних завдань: підвищення надійності та економічності роботи як власне печей, так і системи

їх електропостачання, забезпечення достатньою мірою стабілізації струму та інших параметрів електричного режиму роботи дугових печей, зниження коливань напруги в електричних мережах. Проблема електромагнітної сумісності при роботі цих печей, особливо в частині коливання напруги та генерування ВГ стала ставати більш гострою [30].

ДСП є потужним споживачем електроенергії, і тому електросталеплавильні цехи включають в потужні централізовані енергосистеми з великим запасом динамічної стійкості. Особливості режимів ДСП - низький коефіцієнтом потужності (0,6 - 0,8), споживання потужності має складний різкозмінний характер, а електричний режим характеризується ударними накидами струму, а інколи згасанням фазних дуг при робочих коротких замиканнях [30].

Розповсюдженим методом отримання сталі у дугових сталеплавильних печах є плавка з окисленням. Для такої технології характерні три послідовно проходять періоди з різним характером електроспоживання:

- розплавлення,
- окислення,
- відновлення (рафінування).

У період розплавлення твердої фракції шихти піч споживає максимально допустиму потужність пічного трансформатора. Швидкість розплавлення металу прямо пропорційна потужності пічного трансформатора, тому металургійні серії трансформаторів характеризуються високими значеннями потужності. У окислювальний та відновлюваний періоди потужність печі значно зменшується, головним чином для компенсації теплових втрат та ендотермічних реакцій, а також для розплавлення легуючих добавок. У період розплавлення (до 60% часу плавки), витрачається до 80% всієї електроенергії плавки. Витрата електроенергії на тонну виплавленого металу становить наближено 700-950 кВт·год/т. У період окислення шихта знаходиться у розплавленному стані градієнти потенціалів в дугах зменшуються в 2 - 2,5 рази. Тому застосовують регулювання потужності дуг за рахунок відпайок

трансформатора. У період рафінування напруги на дугах ще більш знижують [30]. Ці режими створюють свій унікальний профіль споживання електроенергії від ДСП.

Електричне навантаження дугових сталеплавильних печей безперервно-циклічне. Циклічність роботи характеризується чергуванням плавок із зупинками печі для зливу рідкого металу, заправки печі і завалювання шихти. У потужних печей, що працюють цілодобово, велике число плавок.

Тривалі відключення печі відбуваються тільки при її ремонтах. Число ж короткочасних відключень в процесі однієї плавки сягає десятків (рис. 1.8).

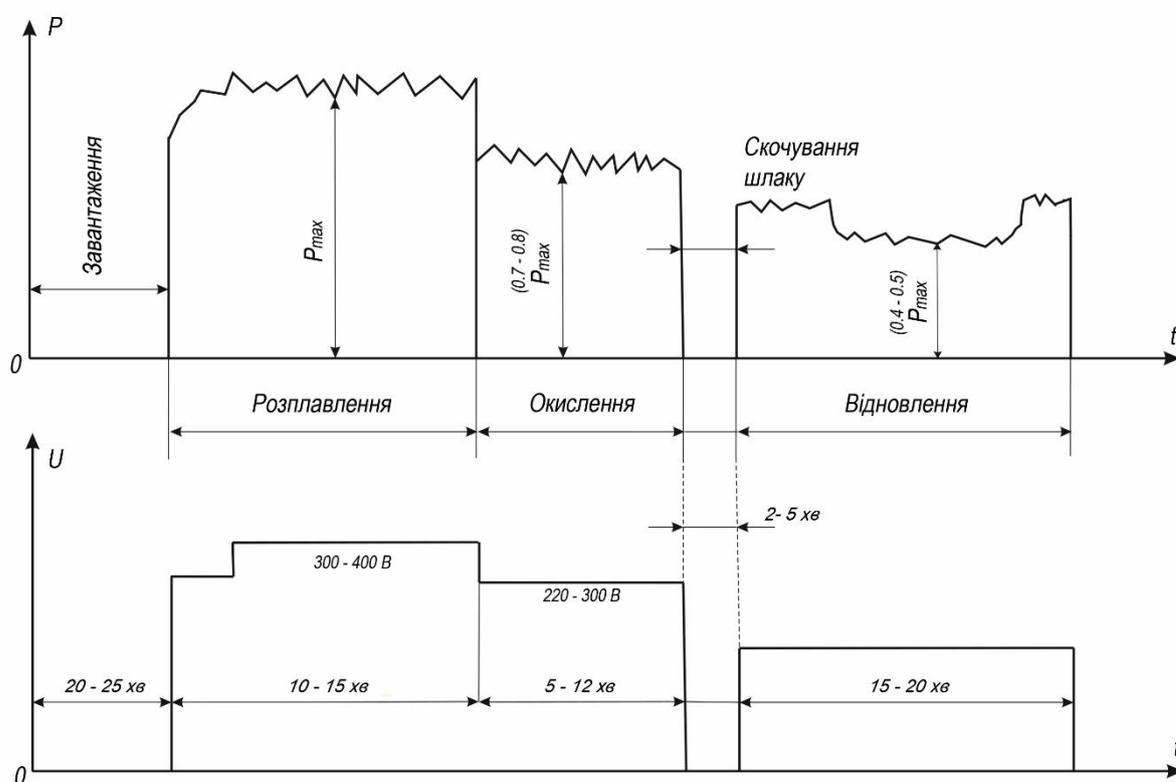


Рис. 1.8. Графік споживання активної потужності ДСП за цикл плавки металу

Насправді навантаження коливається, має нестійкий різко змінний характер, нерівномірний по фазах. Найбільш сильно навантаження змінюється в період розплавлення металу і на початку періоду окислення (рис. 1.9).

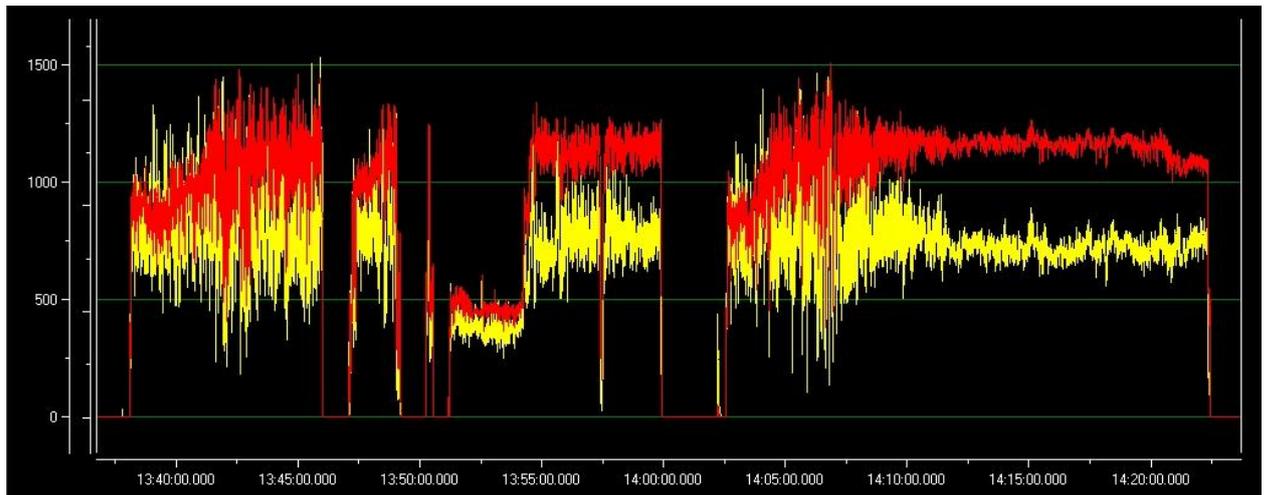


Рис. 1.9. Осцилограми активної та реактивної потужності, яка споживається ДСП під час плавки металу

Як видно з осцилограм, зміна навантаження печі носить характер нерегулярних коливань, пов'язаних з нестійким горінням дуг. Відповідно до особливостей електричних характеристик дугових сталеплавильних печей коливання реактивної потужності значно перевищують коливання активної потужності та залежить від параметрів енергосистеми [30].

Коливання навантаження дугових сталеплавильних печей, особливо коливання реактивної потужності, викликають значні коливання напруги в мережі живлення, які зростають зі збільшенням потужності пічного трансформатора і зменшенням потужності короткого замикання (КЗ) в точці приєднання дугового печі [30].

Зміна потужності споживання печі у часі є випадковим процесом, тому виробничі задачі, пов'язані з розрахунком коливань напруги і струмів повинні вирішуватися шляхом використання методів математичної статистики та теорії випадкових процесів. Імовірнісні характеристики навантаження ДСП, необхідні для відповідних розрахунків, визначається емпіричним методом на реальних об'єктах [30].

Найбільші значення коливань навантаження печі та найглибші провали напруги відбуваються при робочих КЗ при опусканню електродів у розплавлений метал. Значення коливань струмів при цьому можуть досягати $1,5-2 I_{ном}$ ДСП.

Слід зазначити, що такі коливання навантаження дугової сталеплавильної печі відбуваються порівняно рідко (не більше 5 - 6 разів на годину) і не повинні прийматися до уваги при розрахунку коливань напруги для порівняння з нормами ДСТУ. Ці коливання навантаження дугових печей мають важливе значення для визначення потужності мережевих трансформаторів та забезпечення електромагнітної сумісності.

Експериментальні дослідження показали, що струми та напруги ДСП нерівномірні по фазах, що викликає значну несиметрію у системі електропостачання, як за значенням напруги, так і за кутом зсуву вектору напруги (рис. 1.10, 1.11) [30].



Рис. 1.10. Несиметрія фазних напруг на електродах дугової сталеплавильної печі в процесі плавки металу

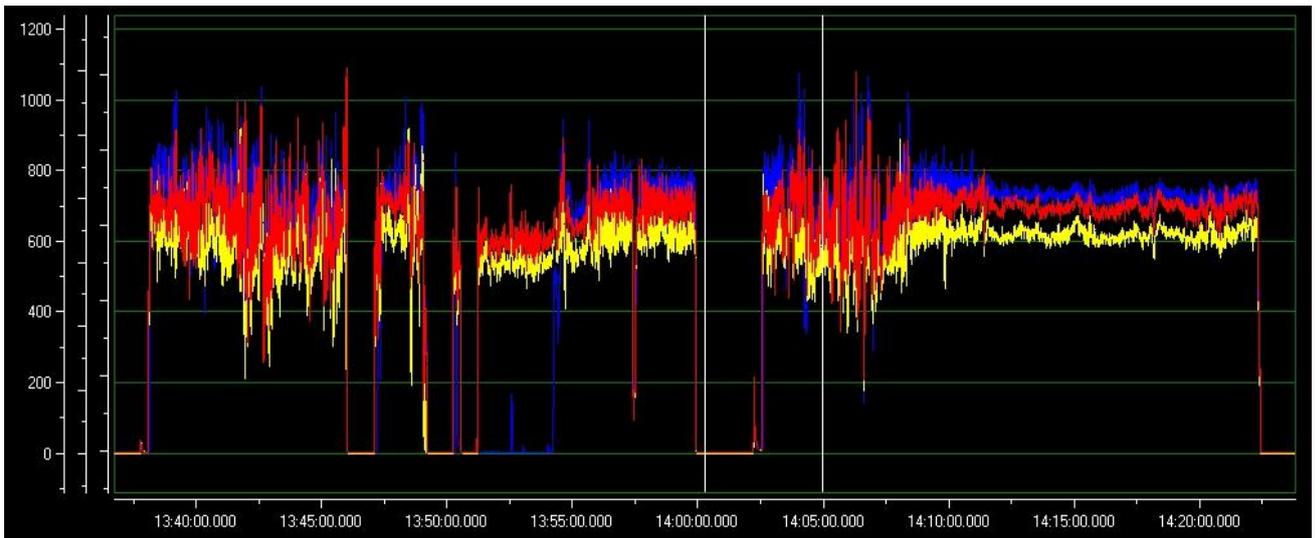


Рис. 1.11. Несиметрія фазних струмів на електродах дугової сталеплавильної печі в процесі плавки металу

Слід зазначити, що ця несиметрія носить випадковий характер і змінюється дуже швидко (приблизно за 0,03 с) відповідно до зміни активної і реактивної потужності. Це викликає певні труднощі, пов'язані з швидкодією симетруючих пристроїв, необхідних при роботі дугових сталеплавильних печей та спонукає до використання спеціальних швидкодіючих STATCOM.

Нелінійність вольт-амперної характеристики пічних установок, пов'язана з нелінійністю дуги та пічного трансформатора, що призводить до генерування вищих гармонік в живильну мережу, головним чином 2, 4, 5 і 7-й. Це також накладає певні обмеження на можливості нормальної роботи дугових печей в системах електропостачання промислових підприємств, зокрема можливість компенсації реактивної потужності в мережах з цими печами [30].

1.4. Особливості систем електропостачання та енергетичних балансів гірничих підприємств

Особливості проектних рішень та експлуатаційних режимів електропостачання вугільних шахт визначають кліматичні та механічні чинники, які впливають на особливості режимів електроспоживання [97-99].

При виконанні підземних гірничих роботах існує постійний вплив вологості, температури, пилу та хімічної корозії металів [97-99]. Перелічені фактори мають руйнівний вплив на ізоляцію електрообладнання та суттєво знижують індекси надійності.

Важкі режими роботи гірничого обладнання спонукали до застосування особливих електричних мереж, до яких не прийнятні стандартні підходи до проектування та моделювання електричних режимів при наявності несиметричних та несинусоїдальних навантажень [100]. Для адекватного математичного моделювання вводимо обгрунтовані припущення та початкові умови для шахтних електричних мереж [97-99]:

- індекси надійності приймаємо для системи електропостачання шахт небезпечних за газом та пилом;
- передбачене відокремлене (реакторне) живлення підземних споживачів;
- проблеми компенсації реактивної потужності в умовах пересувних підземних виробок;
- значна довжина силових кабельних ліній напругою 6-10 та 0,66-1,14 кВ (в межах однієї шахти до 100 км);
- висока потужність стаціонарних установок (до 5 МВт);
- циклічні режими роботи машин та механізмів з частими зупинками та холостим ходом;
- складність (інколи неможливість) виконання норм ЕМС для поверхневих та підземних електроприймачів одночасно.

Враховуючи ці припущення у дисертаційній роботі отримано уточнені моделі показників ЕМС гірничих підприємств для досягнення максимальної енергетичної ефективності [30].

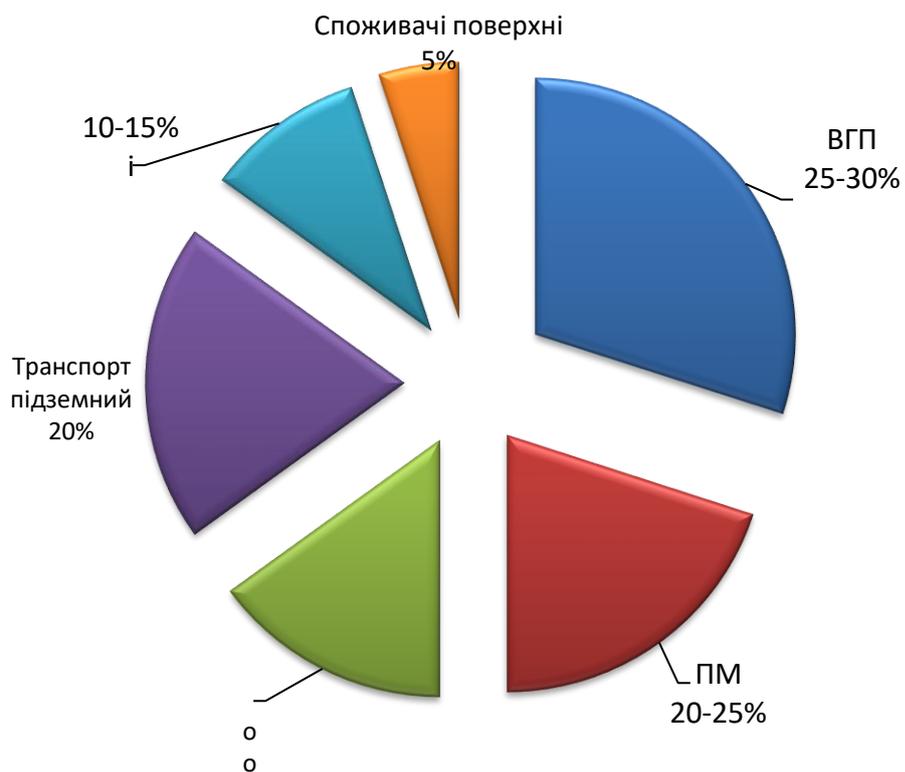


Рис. 1.12. Енергетичний баланс вугільної шахти по технологічним ланкам [30]

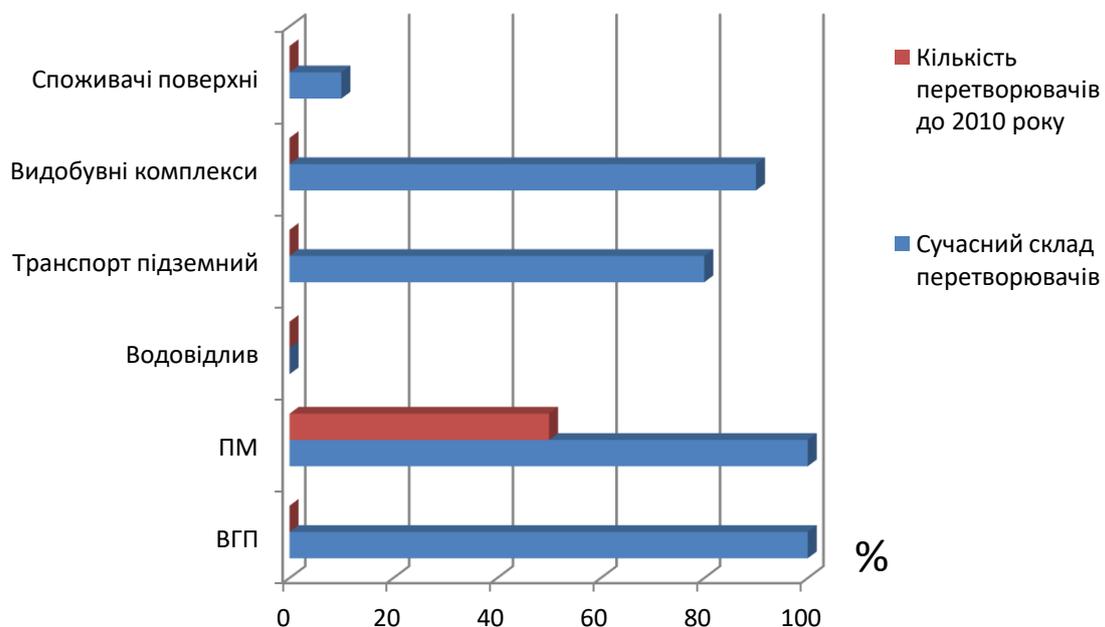


Рис. 1.13. Частка нелінійних навантажень у енергетичному балансі

Дослідження енергетичних балансів вугільних шахт по технологічним ланкам (рис. 1.12), виявили, що стаціонарні установки займають до 60% загальних витрат та формують режим споживання електроенергії за нехарактерними для інших виробництв повторно-короткочасними циклами [99-101].

На технологічних ланках гірничих підприємств використовуються перетворювачі частоти з ланкою постійного струму, які є джерелами ВГ та ПГ. На рис. 1.13 демонструється відсоток зростання нелінійного навантаження в енергетичному балансі гірничих підприємств:

Вентиляторні установки - застосовуються асинхронні тиристорні каскади та перетворювачі частоти з ланкою постійного струму потужністю 1,6...5,0 МВт.

Підйомні машини (вугільні, породні та клітьові) – в основному використовуються вентильні перетворювачі 6 або 12 фазною схемою комутації потужністю 0,8...4,0 МВт.

Видобувні комплекси лави – сучасний склад гірничо-видобувного обладнання однієї підземної ділянки складає близько 1 МВт при частотному керуванню електродвигунами.

Транспорт підземний – зарядні станції електровозів та приводи конвеєрних ліній мають вентильні перетворювачі.

Водовідлив – насосні установки головного водовідливу використовують прямий пуск асинхронних двигунів.

Тому, існуючі методи та моделі оцінки енергоефективності та ЕМС є застарілими та не відповідають сучасним промисловим умовам. Для забезпечення виживання критичного сектору промисловості необхідна розробка нових комплексних критеріїв ЕМС та надійності електропостачання з урахуванням особливостей несиметричних та несинусоїдальних навантажень.

1.5. Постановка задачі наукових досліджень

Проведений аналіз проблеми стійкості режиму споживання та електромагнітної сумісності систем електропостачання промислових підприємств критичних галузей економіки дозволяє сформулювати наступні положення, що обумовлюють задачі цього дослідження. Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання є розробка уточнених методик пошуку раціональних режимів роботи, а також показників якості напруги та індексів надійності. Небезпечний фактор, який проявляється при роботі нелінійних та несиметричних промислових навантажень, є значні рівні струмів зворотної послідовності та вищих гармонік при живленні підприємств від післяаварійних схем електропостачання. Проте закономірності, що пов'язують параметри енергосистеми та режими потужних промислових споживачів в умовах обмеженої потужності КЗ, не вивчалися і обґрунтування факторів, які забезпечують можливість живлення електротехнологічних навантажень при врахуванні резонансних явищ на частотах ВГ та ПГ до сьогоднішнього дня не проводилося. Незважаючи на те, що задачі електромагнітної сумісності були предметом численних вітчизняних і зарубіжних досліджень, слід зазначити, що більшість таких робіт розглядають процеси генерації електромагнітних перешкод в електричну мережу без зав'язків з електротехнологією та оцінюють показники якості, виходячи з вимог діючих стандартів, виконання яких під час воєнного стану інколи просто неможливо. Існуючі методики розрахунку не дозволяють прогнозувати та регулювати зони резонансних частот при наявності вентильних перетворювачів, що ускладнює налаштування статичних компенсаторів реактивної потужності. Недостатня вивченість процесів електромагнітної сумісності промислових систем електропостачання зі специфічними навантаженнями є одним із факторів, який обмежує трансформацію та перехід до цифрової енергетики.

Таким чином, метою роботи є розвиток теорії електромагнітної сумісності систем електропостачання промислових підприємств з

несиметричними та нелінійними навантаженнями з обґрунтуванням показників якості та ефективності електропостачання при умові технологічного обмеження потужності енергосистеми. Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі досліджено певні аспекти ЕМС:

1. Аналіз впливу вищих гармонік та струмів зворотної послідовності на елементи електричних мереж промислового підприємства з урахуванням особливостей післяаварійних схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання.

2. Дослідження типових графіків електричних навантажень промислових підприємств, для яких має бути забезпечена аварійна броня електропостачання.

3. Проведення експериментальних досліджень показників електромагнітної сумісності при застосуванні нетипових для нормального режиму післяаварійних схем електропостачання.

4. Дослідження резонансних процесів у промислових вузлах навантаження з джерелами розподіленої генерації на частотах канонічних гармонік та інтергармонік при врахуванні технічних особливостей схем багаторівневого резервування.

5. Визначення складових повної потужності, що споживає підприємство, та часових еволюцій вищих гармонік та інтергармонік для отримання залежностей енергетичних коефіцієнтів.

6. Обґрунтування рекомендацій з реалізації раціональних режимів роботи підприємства, що можуть бути забезпечені при комплексному врахуванні показників якості електропостачання.

1.6. Висновки по розділу 1

1. Гірничо-видобувна та металургійна промисловість сьогодні відіграє вирішальну роль для економіки України, враховуючи критичне значення ресурсів для енергетики у обороноздатності та стійкості держави. Концепція енергетичного переходу та реформування класичних енергетичних об'єднань

до рівня інтелектуальних систем Smart Grid на фоні воєнних загроз, передбачає розробку наукових підходів до впровадження принципово нових підходів в електропостачанні, основними завданнями яких є живучість електричних мереж та стійкість режимів навантаження. Розробка енергетично ефективних режимів роботи промислових підприємств можлива при одночасному врахуванні режимних особливостей електротехнологічних споживачів, відмінних особливостей систем електропостачання та наявності джерел розподіленої генерації.

2. Системні зміни у структурі генеруючих потужностей та магістральних електричних мереж при масовому використанні керованих вентиляльних перетворювачів у вузлах промислового навантаження вимагають сучасних швидких рішень для зміни структури внутрішньозаводської та цехової системи електропостачання та розробки уточнених методик визначення раціональних режимів електроспоживання промислових підприємств.

3. Аналіз літературних першоджерел проблематики електромагнітної сумісності вітчизняних та закордонних авторів довів, що забезпечення вимог якості напруги потужних промислових систем електропостачання при обмежених режимних можливостях енергосистеми, викликаних воєнними діями є недослідженим питанням в електроенергетиці, тому створення нової уточненої методики розрахунку показників якості напруги у нетипових режимах є актуальною науково-технічною задачею.

4. Незважаючи на відомі та науково обгрунтовані методи пошуку раціональних компоновок схем систем електропостачання промислових підприємств, за роки повномасштабного вторгнення росії був накопичений досвід, який необхідно впровадити у розробку нової методології створення та забезпечення енергоефективних режимів електроспоживання потужних підприємств з дотриманням норм електромагнітної сумісності та стійкості режиму, відмінними особливостями яких є врахування специфічних нелінійних та несиметричних навантажень та схемних варіацій вентиляльних перетворювачів джерел розподіленої генерації.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ВІД ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Під час воєнних ризиків та загроз, а також масовому переселенні українців з регіонів, постраждалих від війни, відбулися значні зміни у формуванні електричних режимів приймачів електричної енергії. Всі види підприємств перейшли на використання резервних джерел живлення та утилізації електричної енергії у перетвореному вигляді. Металургійна, гірничо-та машинобудівна промисловість визначається споживанням перетвореної енергії (майже 100%) [30, 43, 51]. Тобто, як свідчать дослідження деяких авторів [55, 56, 58], масово використовуються вентильні перетворювачі для управління режимами роботи електротехнологічних установок. На підприємствах гірничо-видобувної промисловості працюють потужні вентильні перетворювачі для стаціонарних комплексів, видобувних комбайнів та транспортних системах. В умовах обмежень енергосистеми це порушує ЕМС систем електропостачання підприємств за багатьма показниками. Для дослідження електричних режимів систем електропостачання підприємств гірничо-металургійного профілю за умови системного зниження потужності короткого замикання енергосистеми, та розробки рішень забезпечення енергетично-ефективних режимів їх роботи виконаємо аналіз характеристик типових промислових електроустановок з моделюванням показників електромагнітної сумісності.

2.1 Електромагнітна обстановка в системах електропостачання металургійних підприємств

Технології впровадження електрометалургії в Україні призвели до зростання кількості та потужності дугових сталеплавильних печей (ДСП), що викликає погіршення ЯЕ у системах електропостачання промислових підприємств. Дієвим способом оптимізації роботи ДСП з позиції якості та енергоефективності є установка інтелектуальних FACTS-пристроїв на основі

STATCOM. Статичні компенсатори для СЕП підприємств з потужними ДСП повинні задовольняти ряду вимог, що витікають з особливостей їх режимів роботи. Обґрунтування доцільності впровадження STATCOM залежить від швидкодії, діапазону та плавності регулювання реактивної потужності, можливості виключення небезпечних резонансів, виникаючих в системі електропостачання ДСП. Використання STATCOM у вузлах промислового навантаження з джерелами розподіленої генерації має свої особливості та вимагає додаткових досліджень амплітудно-частотних характеристик (АХЧ) для виявлення резонансних явищ. Різноманіття законів керування та індуктивно-ємнісний характер компенсації у системах електропостачання з нелінійними, несиметричними та ударними навантаженнями викликає необхідність комплексного, системного рішення цих питань [30].

2.1.1 Вплив ДСП на якість електроенергії

Установка ДСП включає в свій склад, окрім власне печі та її механізмів з електро- або гідроприводом, також комплектуюче електрообладнання: пічний трансформатор, струмопроводи від трансформатора до електродів дугової печі — так звану коротку мережу, розподільний пристрій (РП) на стороні вищої напруги трансформатора з пічними вимикачами; регулятор потужності; щити і пульти управління, контролю і сигналізації; програмуючий пристрій для управління режимом роботи печі та ін [30].

В зв'язку з цим для установок печей характерна наявність спеціальної пічної підстанції з трансформаторами і РП. Пічні підстанції розташовують в безпосередній близькості від печей. Електропостачання трансформаторів пічної підстанції проводиться від мережі 6,10-35 кВ, а для потужних підстанцій до 330 кВ. Приєднання вимірювальних і захисних приладів до проводів високої напруги проводиться через трансформатори струму і напруги. Широко застосовується виділення пічних підстанцій на самостійне живлення, пов'язане з іншими споживачами на напругу 110-150 кВ. У цьому випадку викривлення

кривих струму і напруги у інших споживачів вдається нормалізувати в допустимих діапазонах.

Система електропостачання металургійного комплексу є унікальною, так як живлення шин напругою 330 кВ виконане кабельною лінією довжиною 14.3 км від централізованої енергосистеми. Живлення ДСП виконується через підстанцію глибокого вводу (ПГВ) з потужними силовими трансформаторами типу ТДНМ-160000/330 з первинною напругою 330 кВ та вторинною 35 кВ.

Для різкозмінних навантажень типу ДСП, характерне велике споживання реактивної потужності і кидки реактивної потужності, які у кілька разів перевищують номінальну потужність електроспоживача. При цьому в мережі живлення виникають коливання напруги (флікер), які шкідливо впливають на інших споживачів електроенергії. Тому питання компенсації реактивної потужності на об'єктах подібного класу вирішується STATCOM (рис. 2.1).

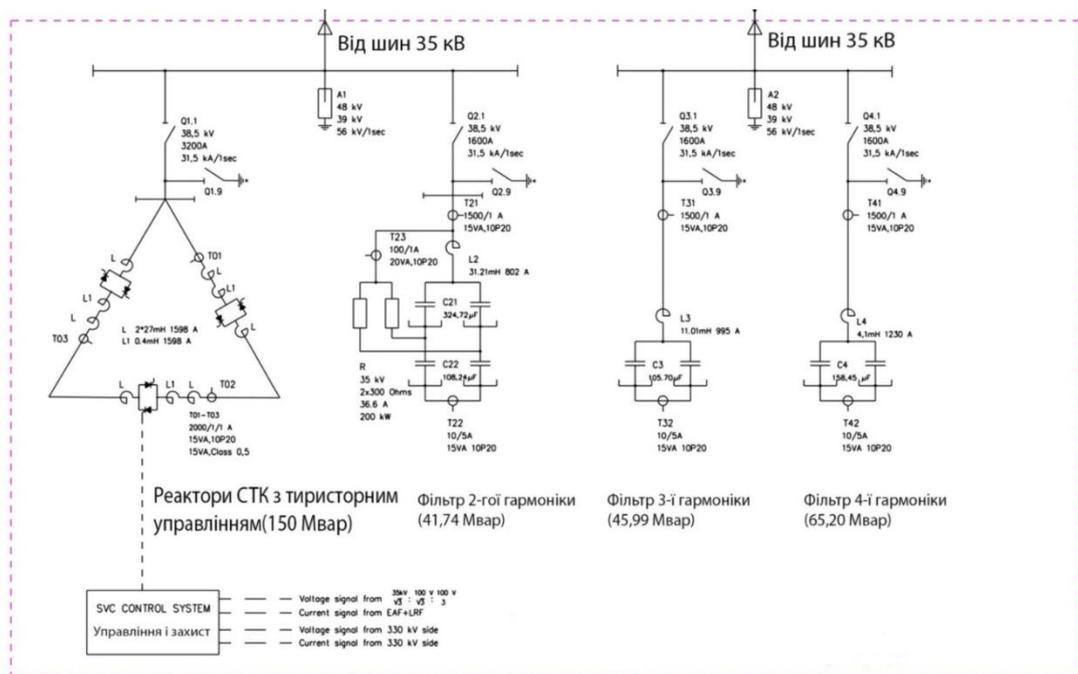


Рис. 2.1. Приклад STATCOM для української енергосистеми

Процес зміни напруги в СЕП підприємств, зазвичай є стохастичним. У електричних мережах зі спокійними навантаженнями зміна напруги відбувається порівняно повільно, а у мережах з різко змінними (ударними) навантаженнями, чим відрізняється режим ДСП, напруга змінюється швидко. Для адекватної

оцінки впливу ЕМЗ на електрообладнання та динамічні процеси доцільно використовувати математичний апарат спектральної теорії випадкових процесів. Оскільки ЕМЗ мають енергетичний зміст, показники ЕМС (ПЯН) оцінюються ставленням енергетичного спектру ЕМП до номінальної напруги основної частоти [25, 30]. На рис 2.2 представлена крива енергетичного спектра напруги.

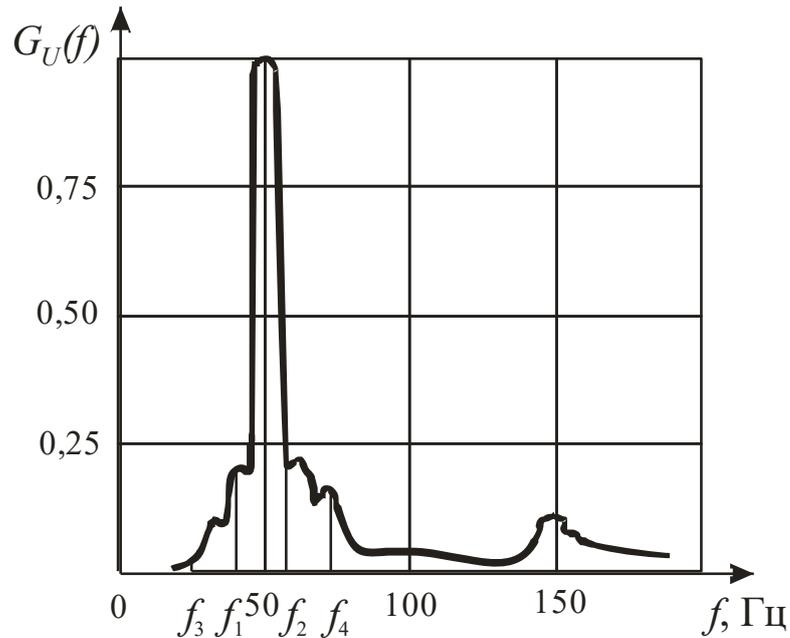
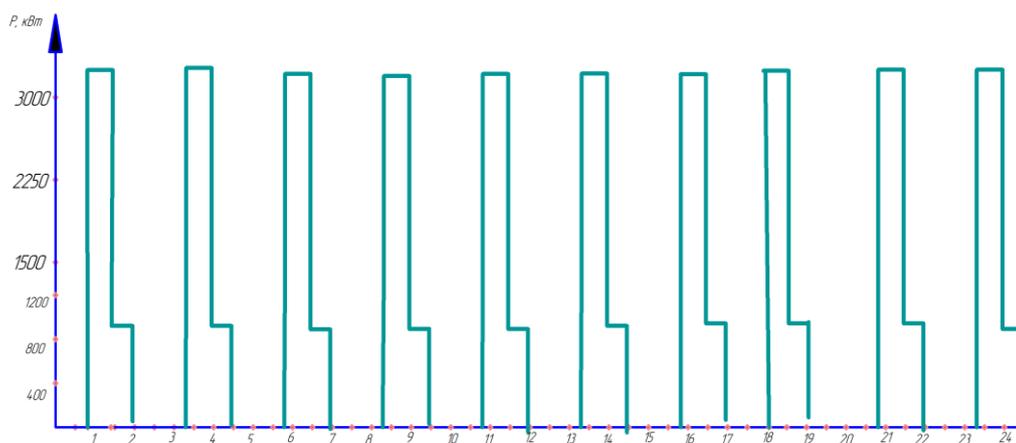
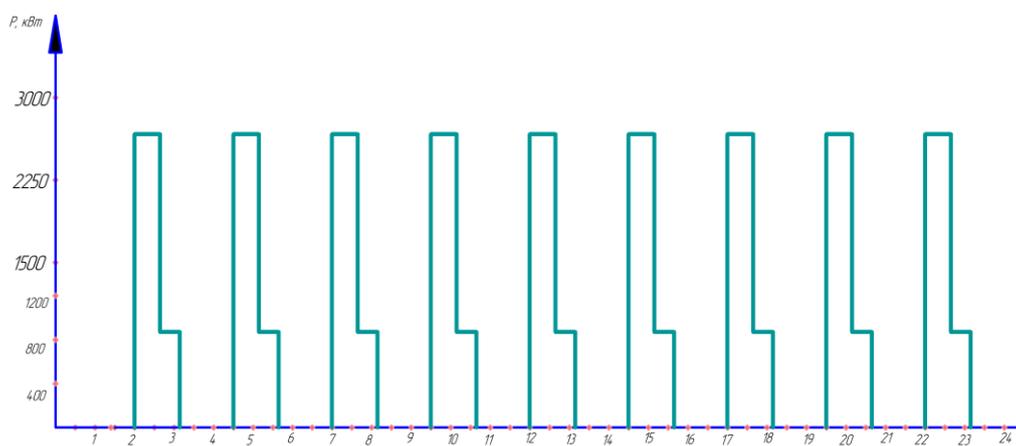
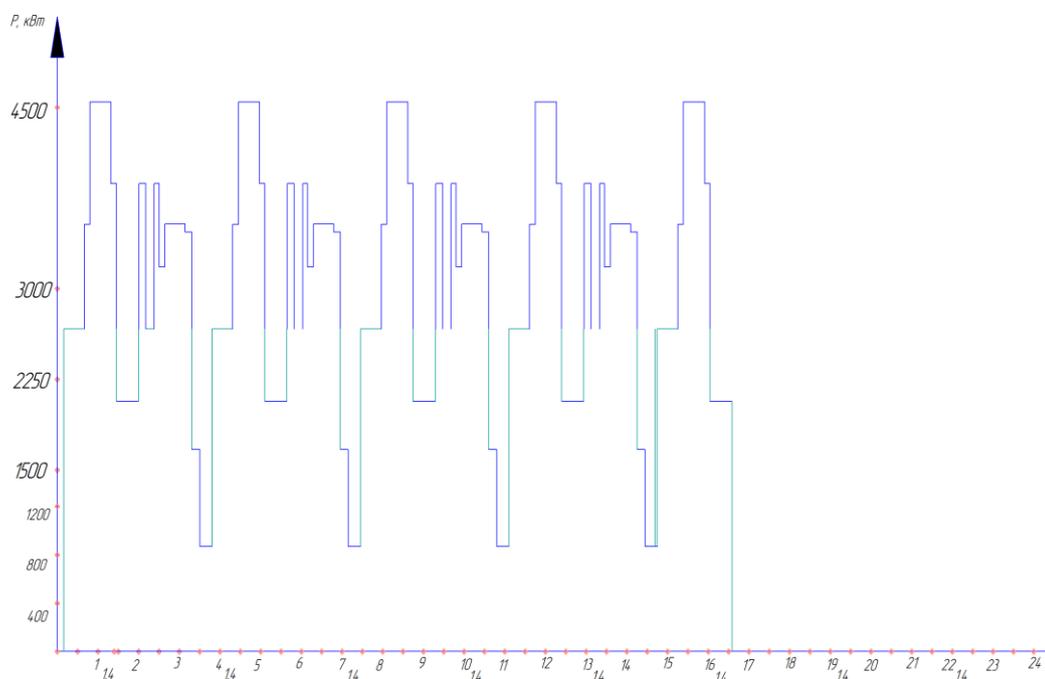


Рис. 2.2. Крива енергетичного спектра напруги

Зміни параметрів напруги у вузлах промислових навантажень призводять до пульсування активних і реактивних потужностей, ковзання струмів статорів синхронних генераторів блок-станцій підприємств. Графіки електричних навантажень при індивідуальному та груповому живленні ДСП наведені на рис. 2.3.



а)



б)

Рис. 2.3. Добові графіки електричних навантажень ДСП при індивідуальному (а) та груповому живленні (б)

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) вважаються одними з найбільш «проблемних» споживачів електроенергії через їхню нелінійність, високу потужність та різко змінний характер навантаження.

Основні показники, за якими оцінюється їхній негативний вплив [25, 30]:

1. Коливання напруги та флікер (коливання). Через нестабільне горіння дуги (особливо в період розплавлення) виникають різкі стрибки струму. Це призводить до коливань напруги, що викликає втому очей у людей (ефект флікера) та збої в роботі чутливої електроніки.

2. Вищі гармоніки. Дуга - це нелінійний елемент, яка генерує широкий спектр гармонік (2-а, 3-я, 4-а, 5-а тощо). Це спричиняє перегрів трансформаторів, кабелів та конденсаторних установок, а також може призвести до резонансних явищ.

3. Несиметрія напруги. Процес плавки в трьох фазах відбувається нерівномірно (різна довжина дуг, обриви). Це створює струми зворотної послідовності, які негативно впливають на роботу електродвигунів інших споживачів.

4. Низький коефіцієнт потужності. ДСП споживають значну кількість реактивної потужності. Без компенсації це призводить до додаткових втрат енергії в мережі та падіння рівня напруги [25, 30].

Ці фактори формують особливі умови до СЕП металургійних підприємств:

Системи електропостачання (СЕП) металургійних заводів є одними з найскладніших у промисловості. Їхня головна задача - забезпечити величезну потужність при екстремальних режимах роботи.

Вагомі особливості, що відрізняють їх від інших систем [25, 30]:

- *Висока енергоємність та концентрація потужності.* Необхідність побудови підстанцій глибокого вводу 35-330 кВ.

- *Специфічний графік навантаження.* Наявність потужних споживачів (ДСП та прокатні стани) створює «ударні» навантаження.

- *Забруднене середовище.* Наявність пилу, газів та пари металів вимагає використання закритої ізоляції, посиленого захисту підстанцій.

- *Власні джерела розподіленої генерації*. Багато підприємств мають ТЕЦ, когенераційні установки або утилізаційні електростанції, які працюють паралельно з енергосистемою.

2.1.2. Вплив показників якості напруги на питомі витрати електроенергії

Дослідження засад зниження втрат від неякісної електроенергії під час використання існуючого для підприємства устаткування проводились в умовах діючого виробництва.

Електробаланс підприємства складено для випадку місяця роботи підприємства з рівнем споживання, близьким до реалізації проектної потужності. У табл.2.1. наведено відповідні рівні витрат енергії та відсоток цих витрат у загальному енергобалансі.

Таблиця 2.1 – Складові енергобалансу металургійного підприємства

Обладнання	Споживання, кВт·год	Відсоток витрат, %
ДСП та піч-ковш	49976168	83,6
ФКУ	666753	1,1
Газоочистка	2856380	4,7
Водопідготовка	2303810	3,8
Компресорна	975030	1,6
Ливарна машина та крани	1746343	2,9
Загальні навантаження	1200000	2,3

Коефіцієнт кореляції розраховують за такою формулою [76-77]:

$$r = \frac{\sum (x_i - x_0)(y_i - y_0)}{(n-1)S_x S_y}, \quad (2.1)$$

де $x_0 = \frac{1}{n} \sum x_i$; $y_0 = \frac{1}{n} \sum y_i$;

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - x_0)^2}, \quad S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (y_i - y_0)^2}.$$

x_i - випуск продукції у i -ому місяці;

y_i - електроспоживання у i -ому місяці;

n - кількість вимірів змінних (місяців).

Коефіцієнт кореляції може набувати значення від 0 до 1. Чим більше його значення, тим сильніший зв'язок між змінними, тим ефективніше використовується енергія. Для розрахунку коефіцієнтів кореляції для кожного виду обладнання, наведеного в табл.2.1, розраховано відповідні масиви даних щомісячного енергоспоживання та масив випуску продукції за один рік. Результати зведені в табл.2.2. Регресійні залежності для окремих технологічних ланок наведено на рис. 2.4-2.9.

Таблиця 2.2 – Розрахунок коефіцієнтів кореляції

Місяць	Електроспоживання, тис. кВт·год						Виплавка сталі, тис.тон
	ДСП та піч- ковш	ФКУ	Газоо- чистка	Водопід- готовка	Компрес- орная	Лиття та крани	
Січень	43988	703	2583	2611	987	1595	88,8
Лютий	44008	635	2490	1711	908	2145	89,3
Березень	51353	703	2587	2474	944	2101	109,1
Квітень	49976	666	2856	2303	975	1746	107,6
Травень	47334	656	2695	2341	976	2049	108,2
Червень	48500	279	2757	2620	953	2017	106,8
Липень	31300	237	1796	1800	784	1132	95,1
Серпень	47500	328	2632	2619	994	2032	107,3
Вересень	35460	299	2186	2167	927	1628	75,5
Жовтень	47334	656	2695	2341	976	2049	58,8
Листопад	44290	311	2464	2565	994	1953	66,2
Коефіцієнт кореляції, r	0,33	0,103	0,235	0,103	0,07	0,059	

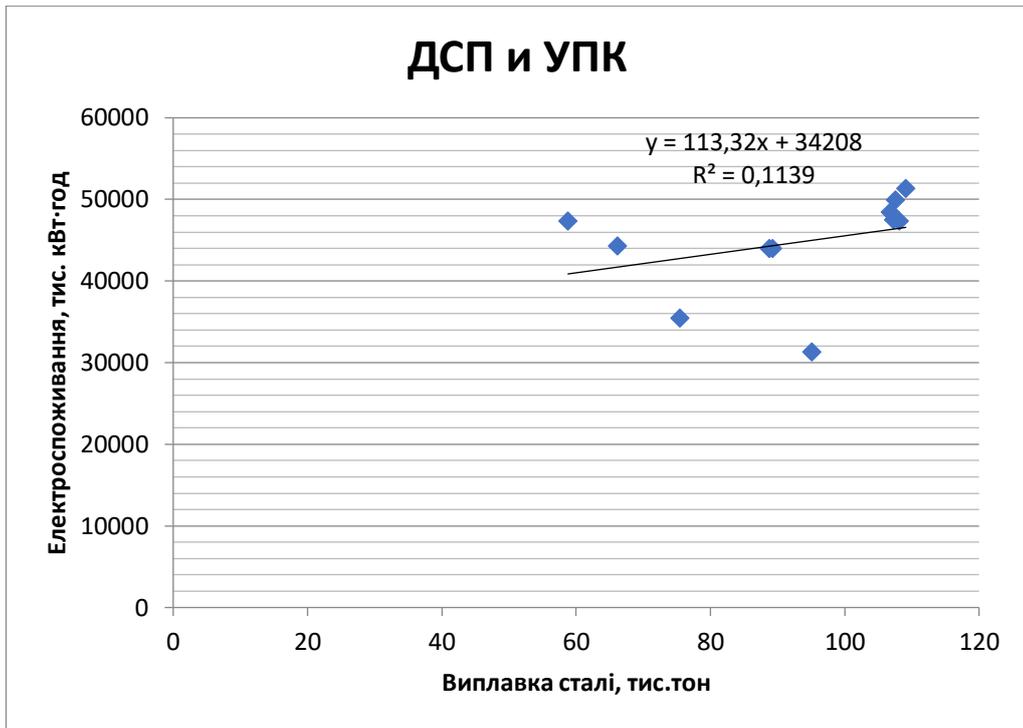


Рис. 2.4. Регресійні залежності для ДСП та УПК

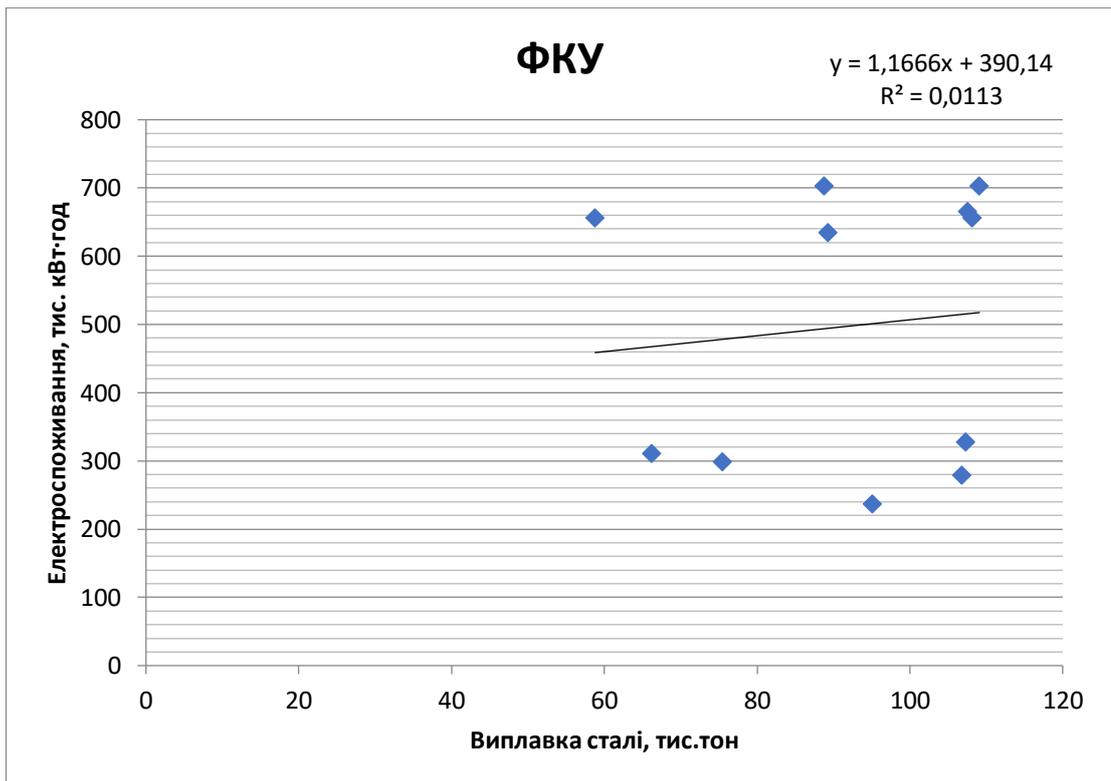


Рис. 2.5. Регресійні залежності для ФКУ

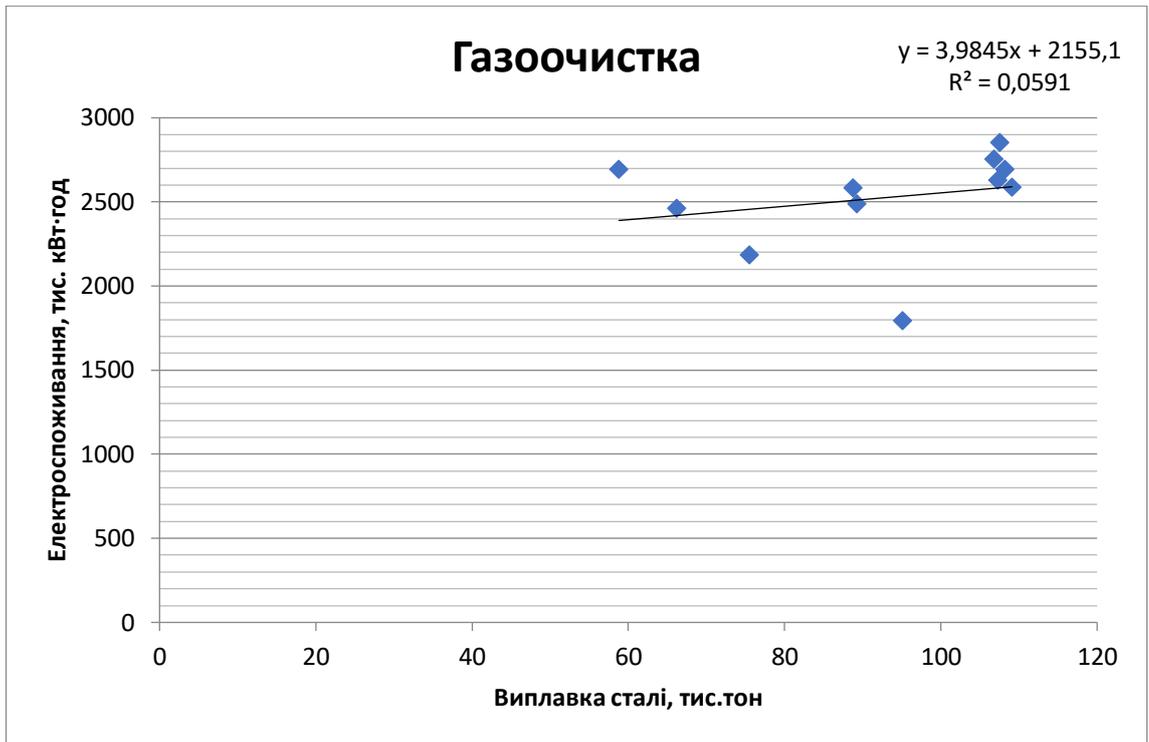


Рис. 2.6. Регресійні залежності для газоочистки

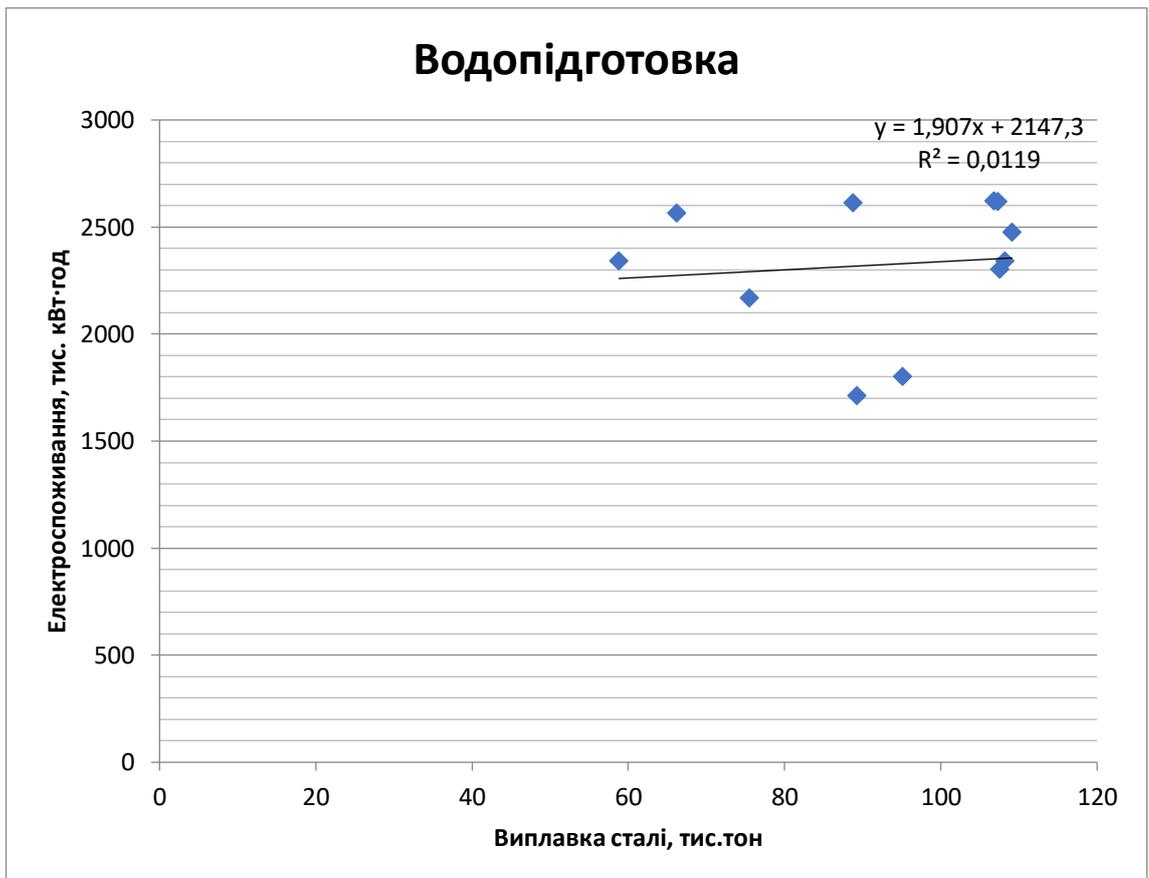


Рис. 2.7. Регресійні залежності для водопідготовки

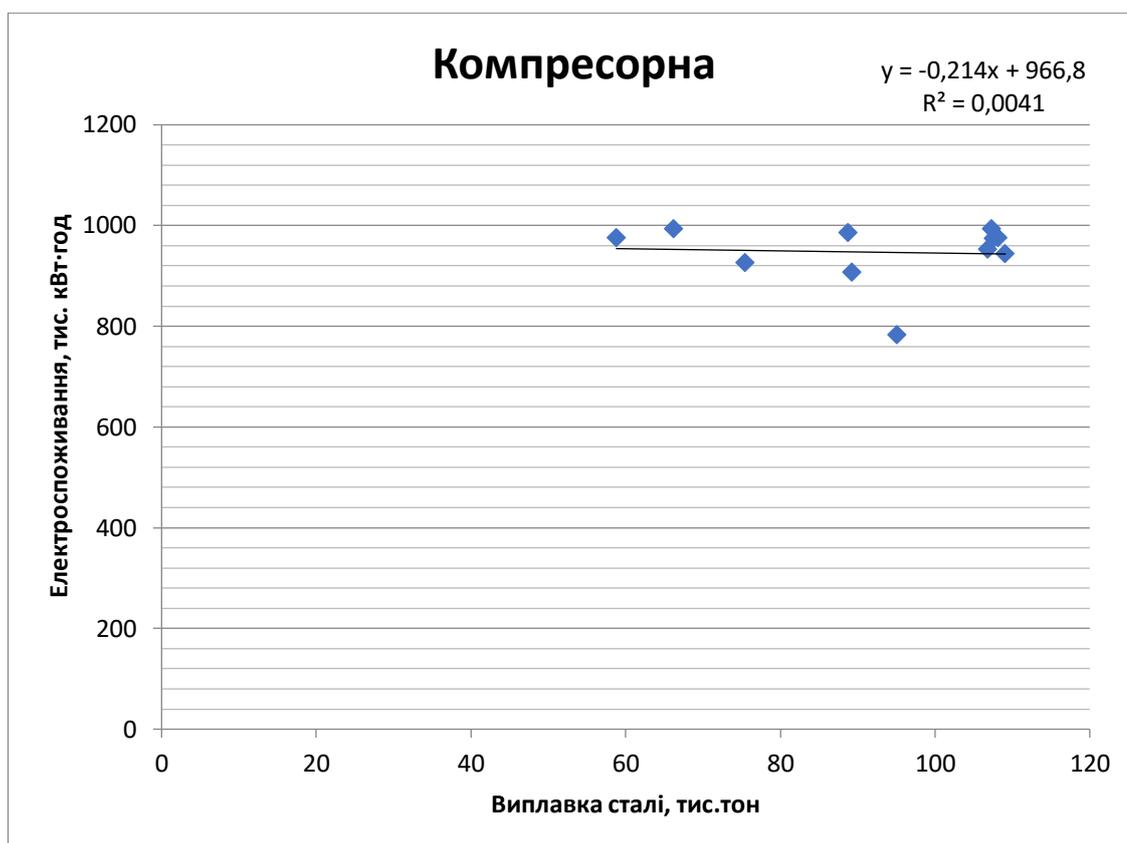


Рис. 2.8. Регресійні залежності для компресорної

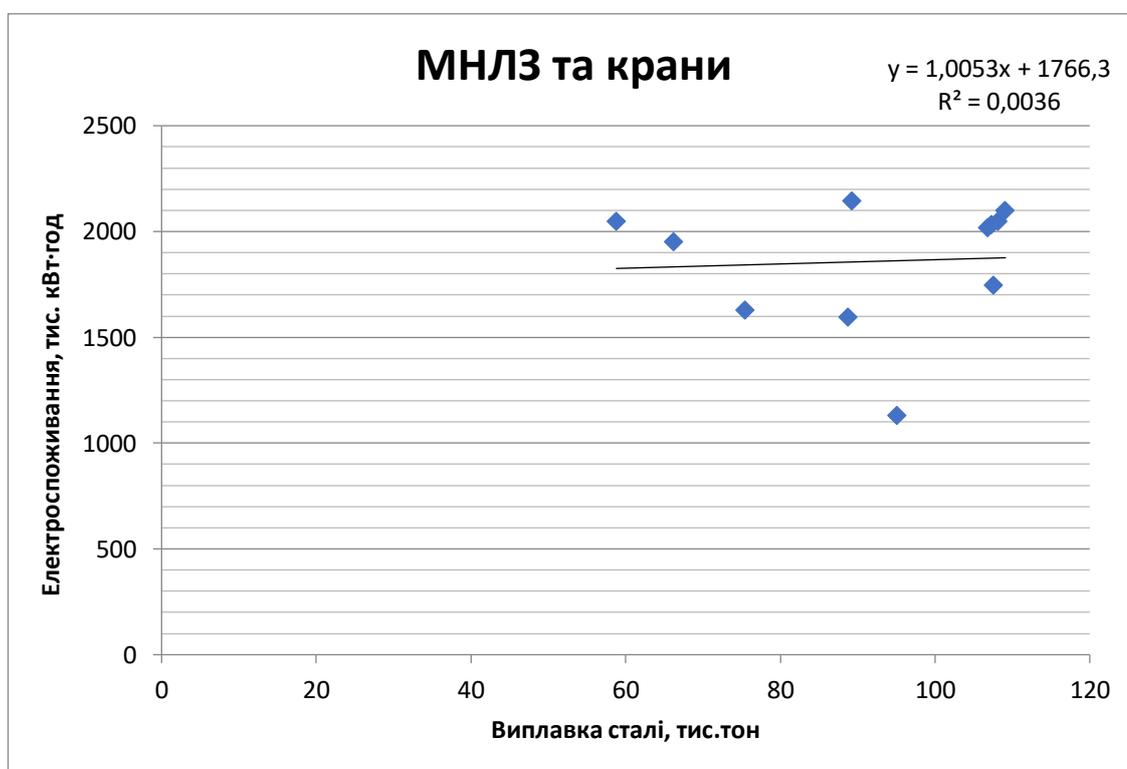


Рис. 2.9. Регресійні залежності для кранів

Для максимального ефекту покращення енергоефективності потрібні нові заходи та засоби для зниження рівнів високочастотних коливань у різних режимах енергосистеми. Також доцільним є аналіз форми напруги на вторинній обмотці трансформатора ГЗП з метою виявлення можливих перенапруг визначення рівня високочастотних коливань (аналіз був виконаний вище).

2.2. Якість електроенергії в системах електропостачання гірничо-видобувних підприємств

Вугледобувна промисловість України має стратегічне значення для частки теплової генерації, яка забезпечує незмінну частину графіка електричних навантажень України та резервування непередбачуваних коливань генерації від відновлюваних джерел енергії. Значні кошти вкладаються у модернізацію гірничодобувного та енергетичного обладнання для підвищення ефективності видобутку вугілля та можливості мати власні джерела розподіленої генерації у випадку блекаутів. Застосування частотного регулювального електропривода для потужних стаціонарних електроустановок шахт (вентилятори головного провітрювання, усі види підйомних установок, конвеєрний транспорт) – це єдино можливий варіант виконати запуск електричних машин при обмежених можливостях генерації [30]. Широке розповсюдження силової енергоелектроніки у системах електроспоживання шахт та рудників приводить до емісії широкого спектру електромагнітних завад (ЕМЗ), які мають гармонічний та несиметричний характер [30].

Виконання умов ЕМС у промислових системах електропостачання дозволяє економити первинні вуглеводні та інші види матеріальних ресурсів, частина яких при погіршеній якості напруги витрачається на браковану та утилізовану продукцію.

Пригнічення амплітуд вищих гармонік у електромережах є частиною проблеми оптимізації впливу нелінійних навантажень на живлячу мережу і покращення якості електроенергії в мережах електропостачання підприємств. Комплексне рішення цієї задачі, засноване на застосуванні інтелектуальних

пристроїв FACTS, вигідне економічно, та впливає безпосередньо на форму напруги.

Дефіцит реактивної потужності на шинах підстанції доцільно компенсувати правильно обраними фільтро-компенсуючими пристроями (ФКП) з установленою потужністю конденсаторів на рівні 80-90% від дефіциту. Паралельне з'єднання LC-кіл, налаштованих на частоти окремих гармонік покладено в основу синтезу резонансних ФКП.

Ускладнює ситуацію компенсації реактивної потужності наявність у складі навантаження підприємства електроприймачів з вентильними перетворювачами, які створюють резонанси коливального контуру «мережа живлення – батарея конденсаторів». Особливістю таких режимів є взаємозв'язок з циклічними процесами деяких технологічних операцій. При цьому приєднання ступеней конденсаторної батареї змінює вигляд амплітудно-частотної характеристики ввімкнення батареї конденсаторів обумовлює нелінійний характер частотної характеристики (резонансна група частот 200-350 Гц). В аварійному режимі роботи підприємства, наприклад, при паралельній роботі двох вводів, резонансна частота підвищується до 300-400 Гц. Подібні режими небезпечні та викликають масштабні аварії з тяжкими наслідками.

Дослідниками НТУ «Дніпровська політехніка» набуто виробничий досвід боротьби з несинусоїдальною напругою в системах електропостачання промислових підприємств з потужними вентильними перетворювачами та ДСП. На одній з шахт Західного Донбасу були встановлені ФКП 5-ї гармоніки виробництва «ЧКД-Електротехніка» (Чехія), налаштовані на фільтрацію 5-ї гармоніки, потужність конденсаторів складає 2*2500 квар. Необхідністю розбудови системи електропостачання та встановлення ФКУ була модернізація вентилятора головного провітрювання шахти з заміною приводного двигуна та встановленням системи асинхронного тиристорного каскаду (АТК) для керування режимами провітрювання. Крім того, вугільний та породний підйоми обладнані двигунами постійного струму з вентильними перетворювачами напруги та системою тиристорного управління електроприводом. Це призвело

до покращення якості напруги за показниками несинусоїдальності та дозволило масштабувати рішення для інших підприємств з подібними викликами.

Використовуючи дане гірничодобувне підприємство України у якості науково-дослідного майданчика, був проведений експериментальний моніторинг показників якості напруги при різних режимах роботи підприємства.

В результаті комплексних практичних досліджень за допомогою аналізатора якості напруги «FLUKE», були отримані часові еволюції коефіцієнтів несинусоїдальності, несиметрії та коефіцієнту потужності. Залежності показали високу ефективність застосування регульованих ФКП для підвищення ЯЕ і компенсації реактивної потужності в мережах вугільних шахт України. Моделювання АЧХ та експериментальні дослідження режимів роботи підприємств дозволили визначити, що резонансні процеси проявляються на шинах напругою 6-10 кВ. Виникнення резонансів неминуче при одночасному приєднанні ємності та вентильних перетворювачів різних типів. Для нівелювання цих загроз та аварій систем електропостачання, зниження рівнів додаткових втрат потужності, пролонгації терміну служби ізоляції електричних машин і кабелів необхідно контролювати рівні вищих гармонік при подальшому зростанню відсоткової частки перетворювачів.

2.3. Моделювання параметрів силових резонансних фільтрів

Моделювання виконаємо для умов сучасного металургійного комбінату з глибоким вводом 330 кВ, потужними ДСП та STATCOM. Живлення навантажень здійснюється через знижувальний трансформатор 330/35 кВ, 160 МВА $u_k=12.5\%$. Потужність короткого замикання у номінальному режимі складає 15090 МВА. Пічний трансформатор потужністю 140 МВА $u_k=10\%$, та трансформатор ковшової печі потужністю 30 МВА $u_k=8.5\%$, 35 кВ/390-270 В складають основне навантаження підстанції.

Загальна ємність компенсації розподілена між трьома ФКУ канонічних гармонік для забезпечення необхідного ступеня ВГ. Задача моделювання –

перевірити відповідність умов фільтрації при зниженні потужності КЗ на шинах живлячої підстанції (рис. 2.10).

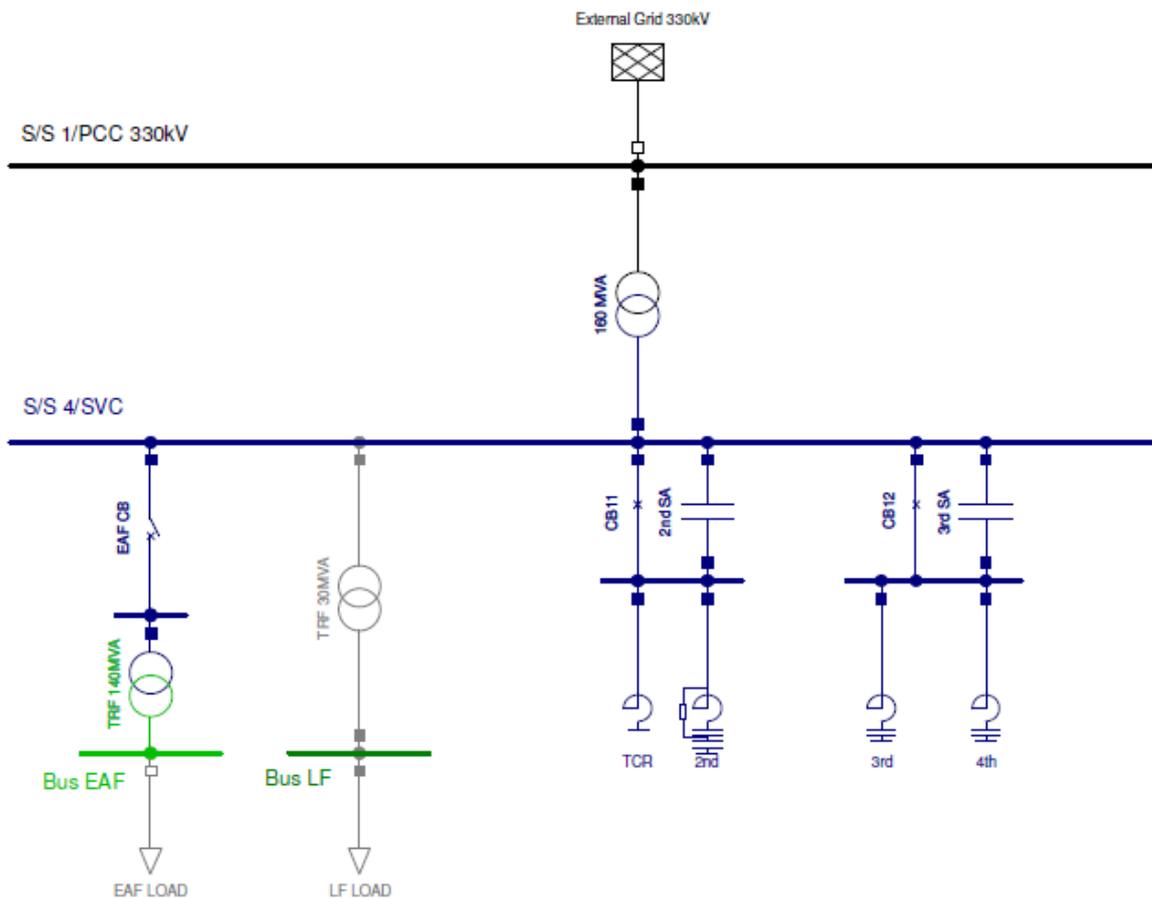


Рис 2.10. Модель трансформаторної підстанції 330/35 кВ

Результати моніторингу значень ВГ наведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Рівні ВГ напруги на шині 330 кВ

Номер гармоніки	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_v, \%$	0.5	0.75	0.3	1.5	0.2	1.0	0.2	0.2	0.2	1	0.2	0.7
Номер гармоніки	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$U_v, \%$	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Загальне гармонійне викривлення – $U_{THD}=2.0 \%$

1. Середній коефіцієнт потужності повинен бути витриманий в межах 0,95 і 1,0 протягом 24 годин.

2. Флікер $P_{st}(95\%) < 1.0$ відповідає зниженню флікера на 38 % за допомогою системи STATCOM.

3. Несиметрія напруги – $U_{2U} < 2.0\%$ в періоді 10 хвилин.

Потужність короткого замикання на шині 330 кВ складає 10000-15000 МВА.

2.3.1. Моделювання флікера напруги та параметрів режиму

При ступені компенсації 0,8...1,0 STATCOM може обмежити флікер коефіцієнтом, близьким до 2. Коефіцієнт зменшення флікера 2 – це максимальне значення, яке реалізує STATCOM. Ступінь компенсації 1 означає, що потужність STATCOM рівна максимальній реактивній потужності при трифазному замиканні в дуговій печі плюс сталий реактивній потужності ковшової печі. Перевищення потужності STATCOM лімітує можливість максимального ефекту зменшення флікера.

Потреба в реактивній потужності для компенсації:

1. ДСП – 118,4 МВт, $\cos\varphi=0,76$, реактивна потужність – 101,3 Мвар
2. Ковшова піч – 19,9 МВт, $\cos\varphi=0,68$, реактивна потужність – 22,9 Мвар. Всього: 124,2 Мвар.

З погляду максимального обмеження флікера найбільша потужність системи STATCOM складає:

$$Q_{STATCOM} = 0,8 \cdot 233 \text{ Мвар} + 22,9 \text{ Мвар} = 209,3 \text{ Мвар.}$$

Ємнісна складова потужності STATCOM повинна складати 150 Мвар відповідно до прийнятого ступеня компенсації 68%. Потужність STATCOM достатня для зниження флікера приблизно на 40% та підтримки коефіцієнта потужності в заданих межах.

Таблиця 2.4. - Результати розрахунку флікера

Розрахунок флікера	Позначення	Розрядність	Значення
Потужність КЗ на шині 330 кВ	S_k	МВА	15 090
Силовий трансформатор:			
- первинна напруга	U_{trp}	кВ	
- вторинна напруга	U_{trs}	кВ	35

Продовження табл. 2.4			
- потужність	S_{tr}	МВА	160
- реактивна напруга к.з. %	X_s	%	12.5
Пічний трансформатор:			
- первинна напруга	U_p	кВ	
- вторинна напруга	U_s	кВ	1.189
- потужність	S_{ftr}	МВА	140
- реактивна напруга к.з. %	X_{ftr}	%	11.5
Вторинний реактивний опір печі	X_{arc}	МОм	3.7
- вторинний закритий трикутник (припущення)		1.4	
- вторинні кабелі (припущення)		1.2	
- електроди (припущення)		1.1	
Струмообмежуючий реактор на НН	X_r	Пм	0.000
Реактанс, приведений до шин 330 кВ			
- мережа	X_{net}	Ом	7.2
- лінія	X_{sulin}	Ом	0
- мережа плюс лінія	$X_{net}+X_{sulin}$	Ом	7.2
- знижувальний трансформатор	X_s	Ом	0.0
- знижувальний трансформатор	X_s	Ом	85.1
- трансформатор дугової печі	X_{ftr}	Ом	89.5
- пічний трансформатор	X_{arcpsc}	Ом	285.0
- струмообмежувальний реактор	X_r	Ом	0
Сумарний реактанс, приведений до шин 330кВ	X_{sum}	Ом	467
$X_{sum} = X_{net} + X_{sulin} + X_s + X_{ftr} + X_{arcpsc} + X_r$			
Максимальна реактивна потужність на РСС Q_{max}	U_{trp}^2 / X_{sum}	Мвар	233
Флікер Pst без СТК	$K_{st} \cdot Q_{max} / S_k$		1.00
Потужність СТК	Q_{svc}	Мвар	150
Коефіцієнт флікера дугової печі (припущення)	K_{st}		65
Флікер Pst без СТК			1.00
Коефіцієнт зниження по досліді			1.67
Флікер Pst (95%) із СТК			0.75
Флікер Plt (95%) із СТК			0.64

2.3.2. Несиметрія напруги від ДСП

Максимальна несиметрія напруги, викликана роботою ДСП на шині 330 кВ, може бути розрахований таким чином:

$$I_{k2} = \frac{U}{2 \cdot X_L} = \frac{330 \cdot 10^3}{2 \cdot 467} = 353 \text{ A}, \quad (2.2)$$

$$\Delta U = \frac{I_{k2} \cdot X_N}{\sqrt{3}} = \frac{353 \cdot 7,22}{\sqrt{3}} = 1,472 \text{ кВ}$$

$$U_{ub(\%)} = 1 - \frac{190,5 - 1,472}{190,5} \cdot 100 = 0,77\%$$

де I_{k2} – струм зворотньої послідовності на шині 330 кВ, коли в електродах дугової печі є двофазне коротке замикання;

X_L - загальний реактивний опір дугової печі;

X_N – реактивний опір мережі (при 15090 МВА на шині 330 кВ).

У разі компенсації тільки реактивної потужності у вище вказаній обстановці за допомогою СТК, залишкова несиметрична напруга складає:

$$\Delta U = \frac{(I_{k2} - I_{SVC}) \cdot X_N}{\sqrt{3}} = \frac{(353 - 152) \cdot 8,1}{\sqrt{3}} = 0,842 \text{ кВ}$$

$$U_{ub(\%)} = 1 - \frac{190,5 - 0,842}{190,5} \cdot 100 = 0,44\%$$

Цей метод розрахунку дає явну індикацію про можливий абсолютний максимальний рівень несиметрії напруги.

Незбалансоване несиметричне трифазне навантаження може бути переведене на баланс з погляду джерела за допомогою системи компенсації реактивної потужності.

$$B_C^{ab} = -B_L^{ab} + \frac{(G_L^{ca} - G_L^{bc})}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

$$B_C^{bc} = -B_L^{bc} + \frac{(G_L^{ab} - G_L^{ca})}{\sqrt{3}}$$

$$B_C^{ca} = -B_L^{ca} + \frac{(G_L^{bc} - G_L^{ab})}{\sqrt{3}}$$

B_C – реактивна провідність компенсаційної системи;

B_L – реактивна провідність навантаження (дугова піч);

G_C – провідність навантаження (дугова піч).

Очевидно, що для симетрування навантаження, реактивна провідність компенсаційної системи повинна бути більше ніж реактивна провідність

навантаження. Для забезпечення можливості компенсаційної системи балансувати навантаження, вона повинна мати 20% індуктивної потужності від номінальної ємнісної вихідної потужності. Параметр надмірної ємності заснований на досвіді по застосуваннях дугових печей.

Вибір параметрів силових фільтрів

Система STATCOM призначена для підключення до шин 35 кВ. Ємнісна потужність 150 Мвар розподілена між трьома фільтровими ланцюгами. Пропонована схема наступна:

- 2^{ий} фільтр 41.6 Мвар на 35 кВ – 50Г ц, тип С з демпферним резистором 150 Ом;
- 3^{ий} фільтр 46.0 Мвар на 35 кВ – 50Гц;
- 4^{ий} фільтр 65.2 Мвар на 35 кВ – 50Г ц

Розрахунок ВГ виконаний для найгіршого варіанта післяаварійної схеми підприємства.

Таблиця 2.5 - Розрахунок рівнів ВГ струму

Номер ВГ, n	Частота ВГ, Гц	Реактор		ДСП		Ковшова піч		Сума	
		$K_v, \%$	$I_{ВГ}, A$	$K_v, \%$	$I_{ВГ}, A$	$K_v, \%$	$I_{ВГ}, A$	$I_{ВГ}, A$	$K_v, \%$
2	100			7.5	199.2	1.5	7.4	207	30.90
3	150	8	282.8	7	185.9	3.5	17.3	486	72.70
4	200			3.5	93.0	0.7	3.5	96	14.42
5	250	5.1	180.3	4.5	119.5	2.8	13.9	314	46.91
6	300			2	53.1	0.5	2.5	56	8.32
7	350	2.6	91.9	2.5	66.4	1.5	7.4	166	24.79
8	400			2.3	61.1	0.2	1.0	62	9.28
9	450	1	35.3	1.2	31.9	0.1	0.5	68	10.13
10	500			1	26.6		0.0	27	3.97
11	550	1.1	38.9	1	26.6	0.1	0.5	66	9.86
12	600			0.8	21.2		0.0	21	3.18
13	650	0.75	26.5	0.8	21.2	0.1	0.5	48	7.22
14	700			0.5	13.3		0.0	13	1.99
15	750	0.5	17.7	0.5	13.3		0.0	31	4.63
16				0.5	13.3			13	1.99
17	850	0.44	15.6	0.5	13.3		0.0	29	4.31
18				0.5	13.3			13	1.99

Продовження таблиці 2.5									
19	950	0.35	12.4	0.5	13.3		0.0	26	3.84
20				0.5	13.3			13	1.99
21	1050	0.2	7.1	0.5	13.3		0.0	20	3.04
22				0.5	13.3			13	1.99
23	1150	0.24	8.5	0.5	13.3		0.0	22	3.26
24				0.5	13.3			13	1.99
25	1250	0.2	7.1	0.5	13.3		0.0	20	3.04

Сумарна компенсація гармонік повинна розраховуватися відповідно до рекомендацій МЕК, таким чином, напруга гармонік повинна порівнюватися з основною напругою. Цей метод дає достатню гарантію при розрахунку фільтрів. Струм реакторів розраховувався виходячи з гіршого випадку схеми.

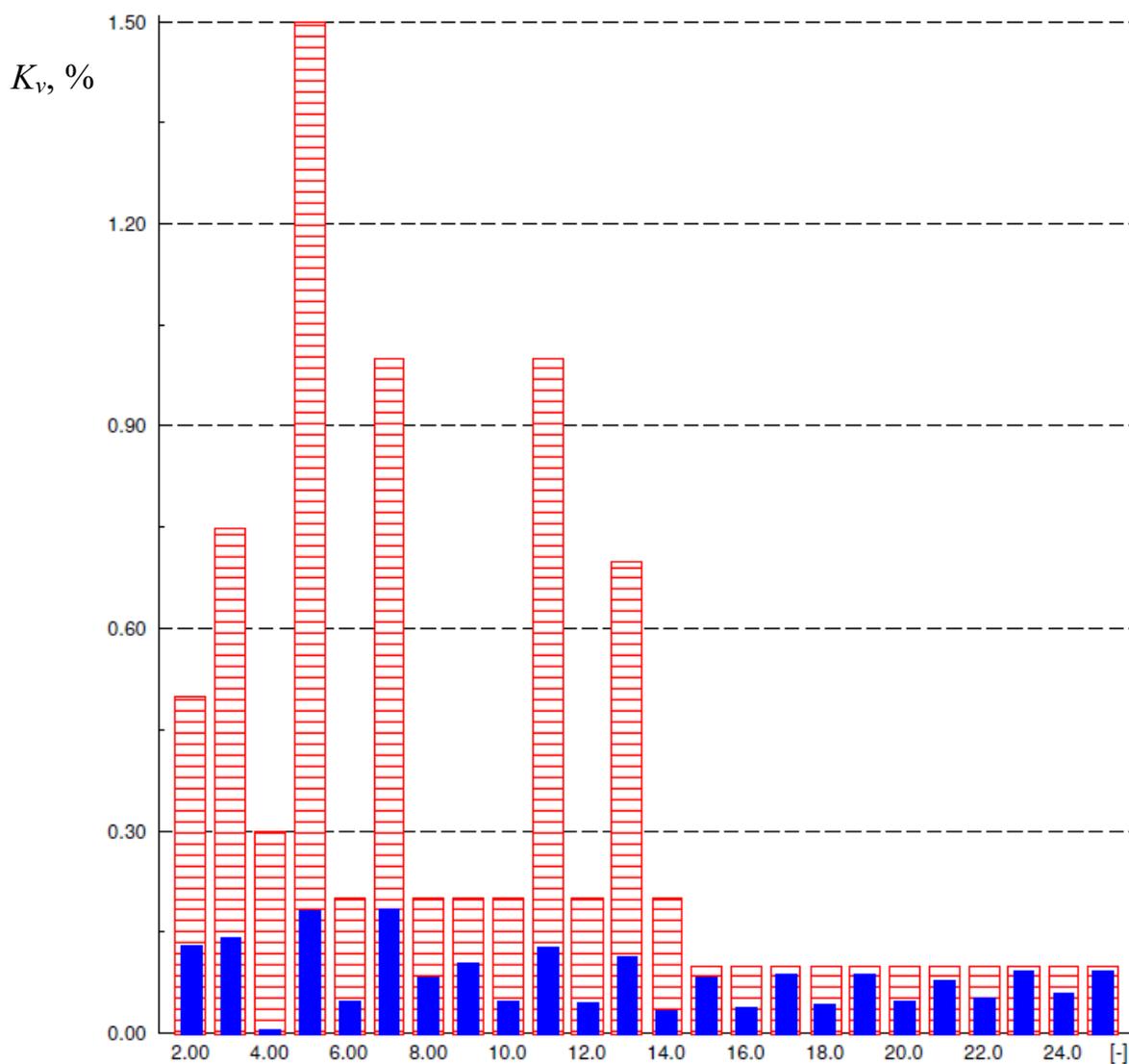


Рис. 2.11. Абсорбція ВГ фільтрами трьох частот

Номер ВГ

2.3.3. Параметри кіл фільтрів ВГ

Прийmemo до розрахунку найгіршу комбінацію навантаження STATCOM та повного навантаження ДСП та ковшових печей при зазначеному рівні ВГ на шинах 330 кВ (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Нормативні рівні вищих гармонік на шинах 35 та 330 кВ

Непарні гармоніки некрatні трьом			Непарні гармоніки кратні трьом			Парні гармоніки		
Порядок n	Напруга гармоніки %		Порядок n	Напруга гармоніки %		Порядок n	Напруга гармоніки %	
	MV	HV-EHV		MV	HV-		MV	HV-
5	5	2	3	4	2	2	1.6	1.5
7	4	2	9	1.2	1	4	1	1
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.4	0.4
17	1.6	1	>21	0.2	0.2	10	0.4	0.4
19	1.2	1				12	0.2	0.2
23	1.2	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.2	0.7						
>25	0.2+ 0.5*(25/n)	0.2+ 0.5*(25/n)						

Увага: Загальне гармонійне спотворення: 6.5 в мережі MV і 3 % в мережі HV

Параметри фільтрових ланцюгів по струму і напрузі ґрунтуються на вимогах EN50160. Напруга, що впливає на конденсатори, була визначена як арифметична сума напруги основної частоти і напруги гармонік, що впливають на конденсатор.

Комутація фільтро-компенсуючих пристроїв супроводжується імпульсними перенапругами та потребує розробки спеціальних пристроїв захисту ізоляції електричних машин та апаратів. Моделювання комутаційних процесів приєднання фільтра другої гармоніки показав складний спектральний склад струму перехідного процесу, що теж порушує EMC при певних комбінаціях потужності КЗ на шинах 330 кВ (рис. 2.12).

Розрахункові ємнісні струми фільтрів на стороні 35 кВ мають значення:

- ФКУ другої гармоніки 41.6 Мвар на 35 кВ - 50 Гц 802 А;
- ФКУ третьої гармоніки 46.0 Мвар на 35 кВ - 50 Гц 995 А;

- ФКУ четвертої гармоніки 65.2 Мвар на 35 кВ - 50 Гц 1230 А.

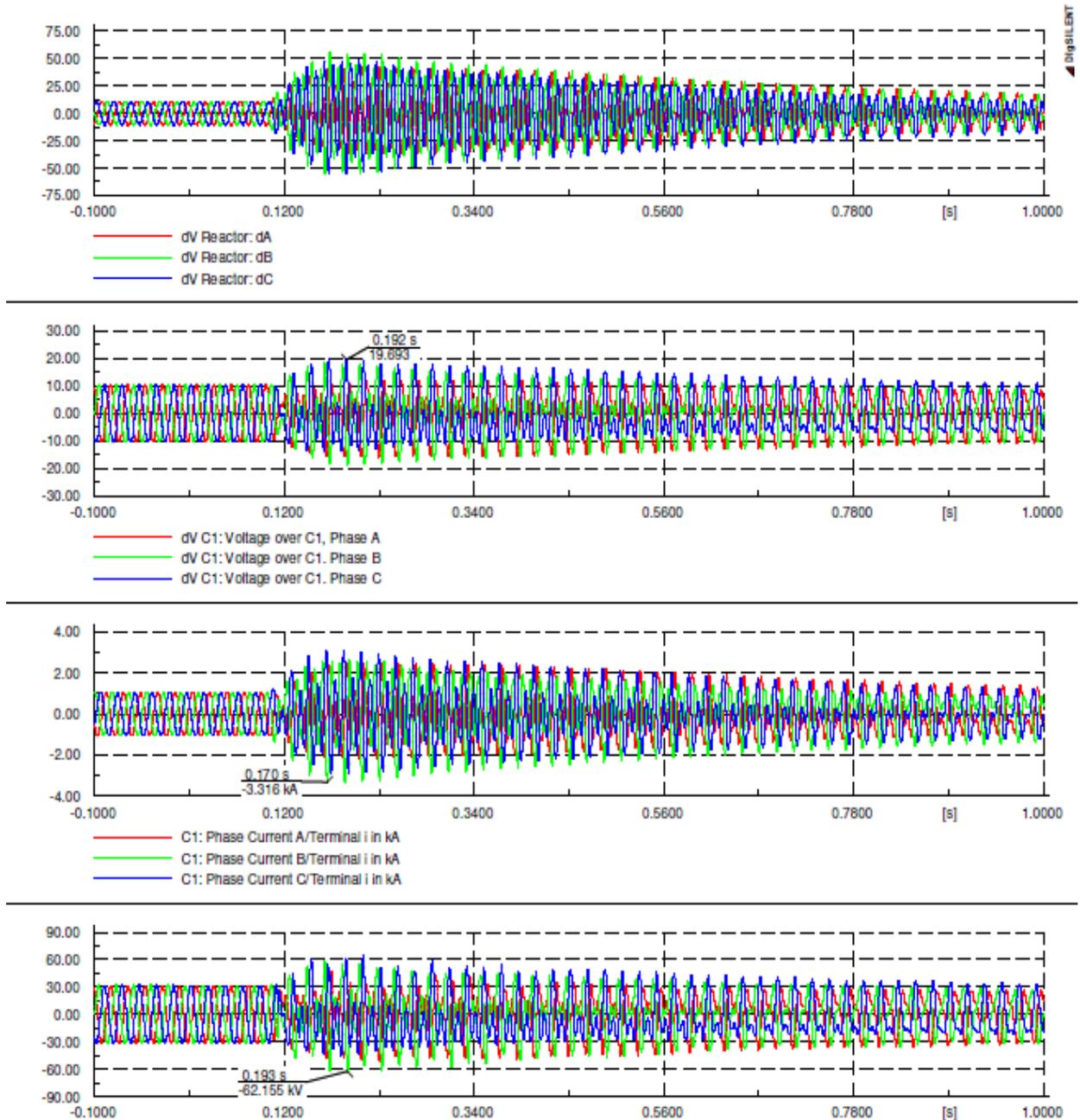


Рис. 2.12. Перехідні процеси комутації фільтра другої гармоніки

2.3.4. Рівні ВГ при роботі сонячних електростанцій у вузлах промислового навантаження

Експеримент з дослідження рівнів ВГ на шинах діючих підстанцій з джерелами розподіленої генерації від сонячних електростанцій показав особливості графіків генерації ВГ (рис. 2.13) та особливого частотного «фону» від сонячних інверторів.

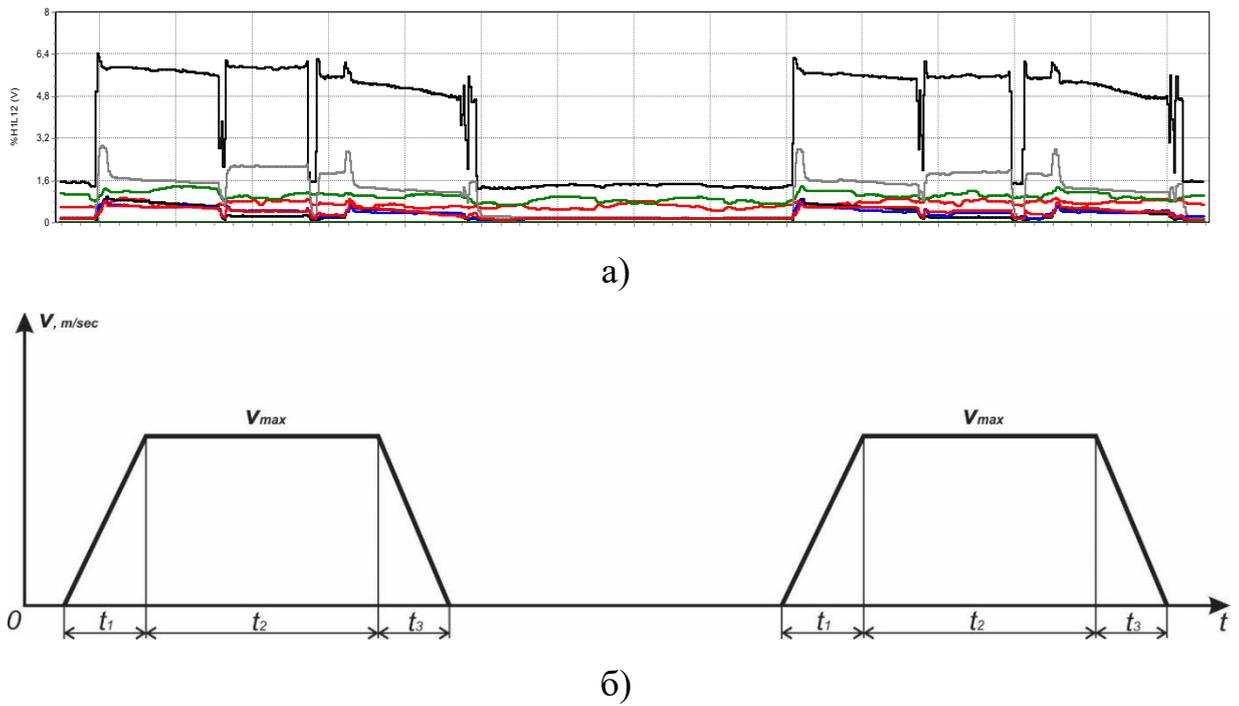


Рис. 2.13. Часові еволюції вищих гармонік при роботі вугільного підйому (а) та швидкісна діаграма підйомної машини (б)

Виявлено, що основним «маркером» роботи потужних сонячних станцій в системах електроспоживання є K -фактор - параметр, що характеризує наявність вищих гармонік струму у частотному спектрі нелінійного навантаження [30]:

$$K_{fact} = \frac{\sum_{h=1}^{50} (i_h \cdot h)^2}{\sum_{h=1}^{50} i_h^2},$$

де h - номер гармоніки струму, i_h – середньоквадратичне значення струму гармоніки за номером h .

У частотному діапазоні дослідження проводились до гармоніки номер 50 включно для виявлення потенційно можливих резонансних (можливості аналізатора якості електроенергії FLUKE. Метод розрахунку експериментальних значень K -фактору прийнято зі стандарту IEEE:

$$K'_{fact} = \frac{\sum_{i=1}^n i^2 \cdot RMS_i^2}{\sum_{i=1}^n RMS_i^2},$$

де i - номер гармоніки струму (емпіричне значення); n - кількість гармонічних складових; RMS_i – середньоквадратичне значення гармоніки з номером i .

$$RMS_i = \sqrt{Real_i^2 + Imag_i^2} = \sqrt{Power_i^2}$$

де $Real_i$ – активна потужність гармоніки за номером i ; $Imag_i$ - реактивна потужність гармоніки за номером i .

На рис. 2.14 представлена крива мережевого струму інвертора $\omega_m = 2\pi \cdot 30c'^1$. Амплітудний спектр мережевого струму представлено на рис.3: виражено гармоніки у діапазоні 150-350 Гц, гармоніки 5 і 7-го порядків - суперпозиція відповідних канонічних гармонік і гармонік, що утворюються в результаті модуляції кривої мережевого струму.

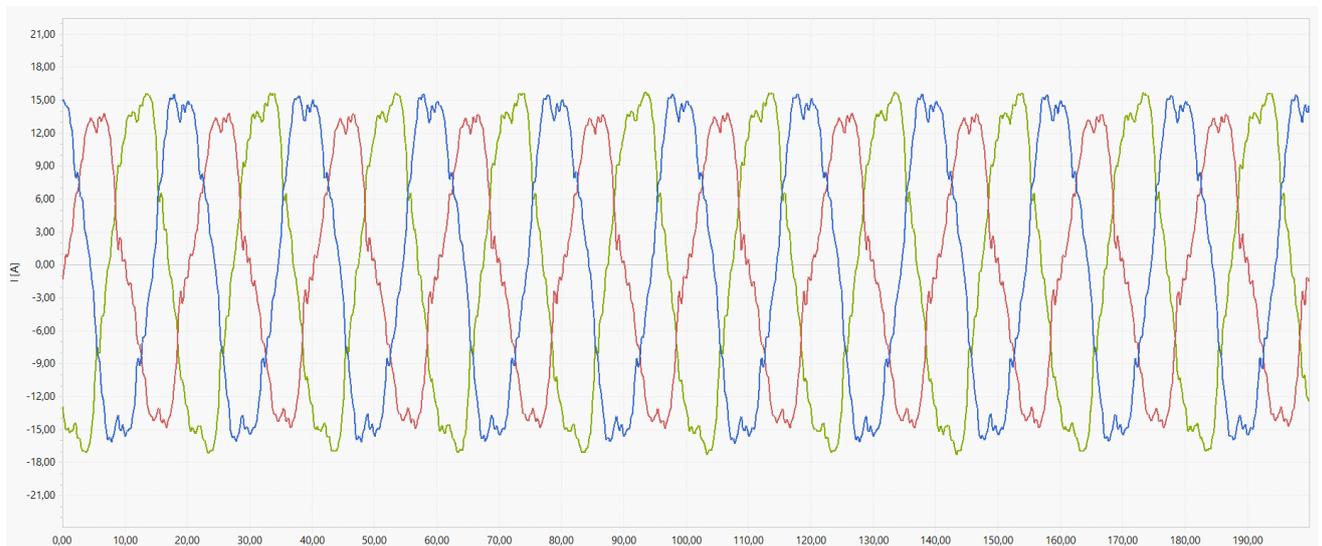


Рис. 2.14. Форма мережевого струму інвертора сонячної станції

Спектральний склад первинного струму інвертора сонячної станції містить канонічні гармоніки та інтергармоніки інвертора [30]:

$$i(t) = \frac{-3\sqrt{3}}{\pi^2} u_{lm} \left[\sum_{s=-n}^n \left[\sum_{q=-n}^n \frac{(-1)^s \cdot (-1)^q}{(6 \cdot q + 1) \cdot (6 \cdot s + 1) \cdot Z(s)} \left[\sin \left[(6 \cdot q + 6 \cdot s + 2) \cdot \omega_m \cdot t - \omega_l \cdot t - \frac{2\pi}{3} + \varphi(s) \right] + \sin \left[(6 \cdot q - 6 \cdot s) \cdot \omega_m \cdot t + \omega_l \cdot t - \frac{2\pi}{3} - \varphi(s) \right] \right] \right] \right],$$

де ω_l частота мережі, ω_m частота на виході інвертора.

$$\varphi(s) = \arctan \left[\left[(6 \cdot s + 1) \cdot \left(\frac{\omega_m}{\omega_l} \right) - 1 \right] \cdot \operatorname{tg} \varphi_n \right]$$

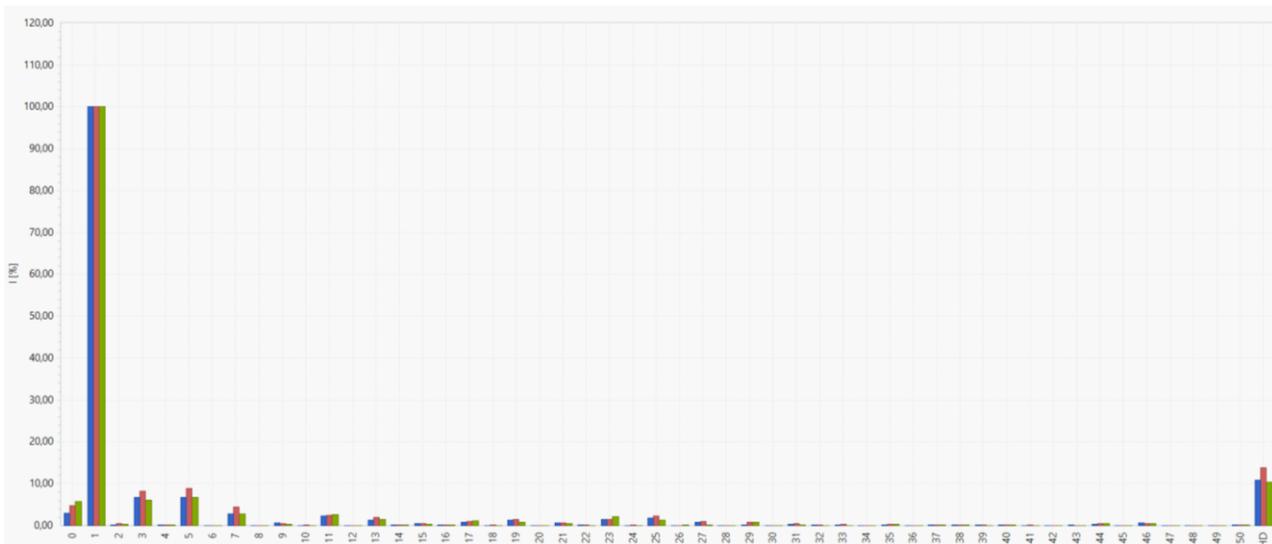


Рис. 2.15. Спектральний склад мережевого струму інверторів СЕС

2.4. Математична модель для визначення показників несиметрії напруги

Сформулюємо завдання моделювання. Доведено, що на параметри несиметрії впливають значення несиметричних струмів і потужність (опір) джерела живлення. Для оцінки регульовального впливу режиму СРН на режим цехової мережі з позиції зниження несиметрії необхідно записати системи рівнянь, які враховували б ці зв'язки. Джерелами живлення у цеховій мережі є трансформатори комплектних підстанцій напругою 6/0,4 кВ. Для оцінки поведінки трифазної системи при використанні неповнофазних режимів живлення СРН припустимо, що від магістрального шинопроводу отримує живлення власне одиничний СРН та інше трифазне симетричне навантаження. Такий загальний підхід дозволяє оцінити якість можливого симетруючого ефекту. Схеми заміщення для послідовностей наведено на рис. 2.17.

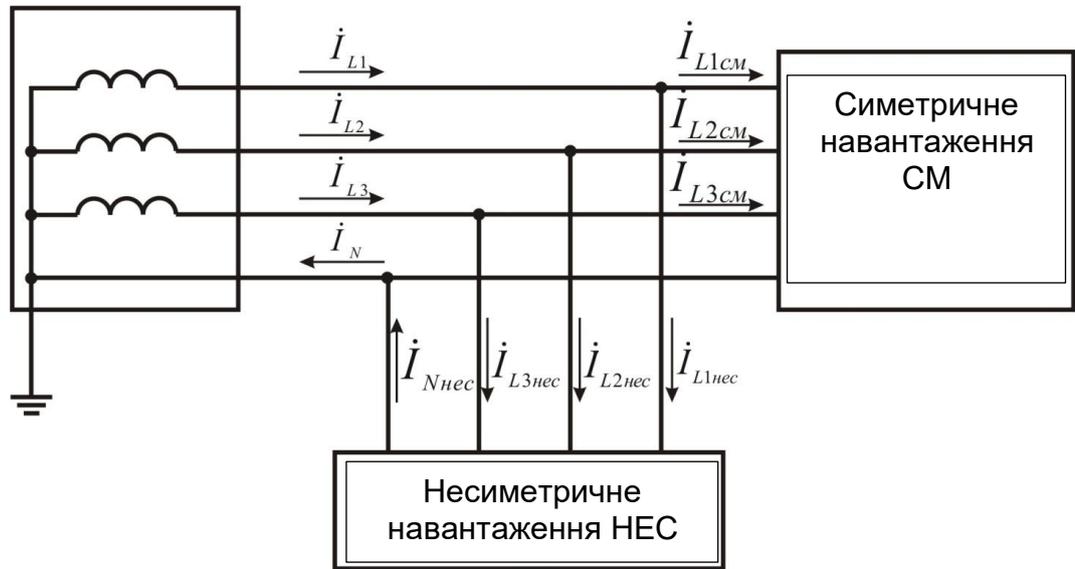


Рис. 2.16. Склад електричної мережі з комплексними навантаженнями

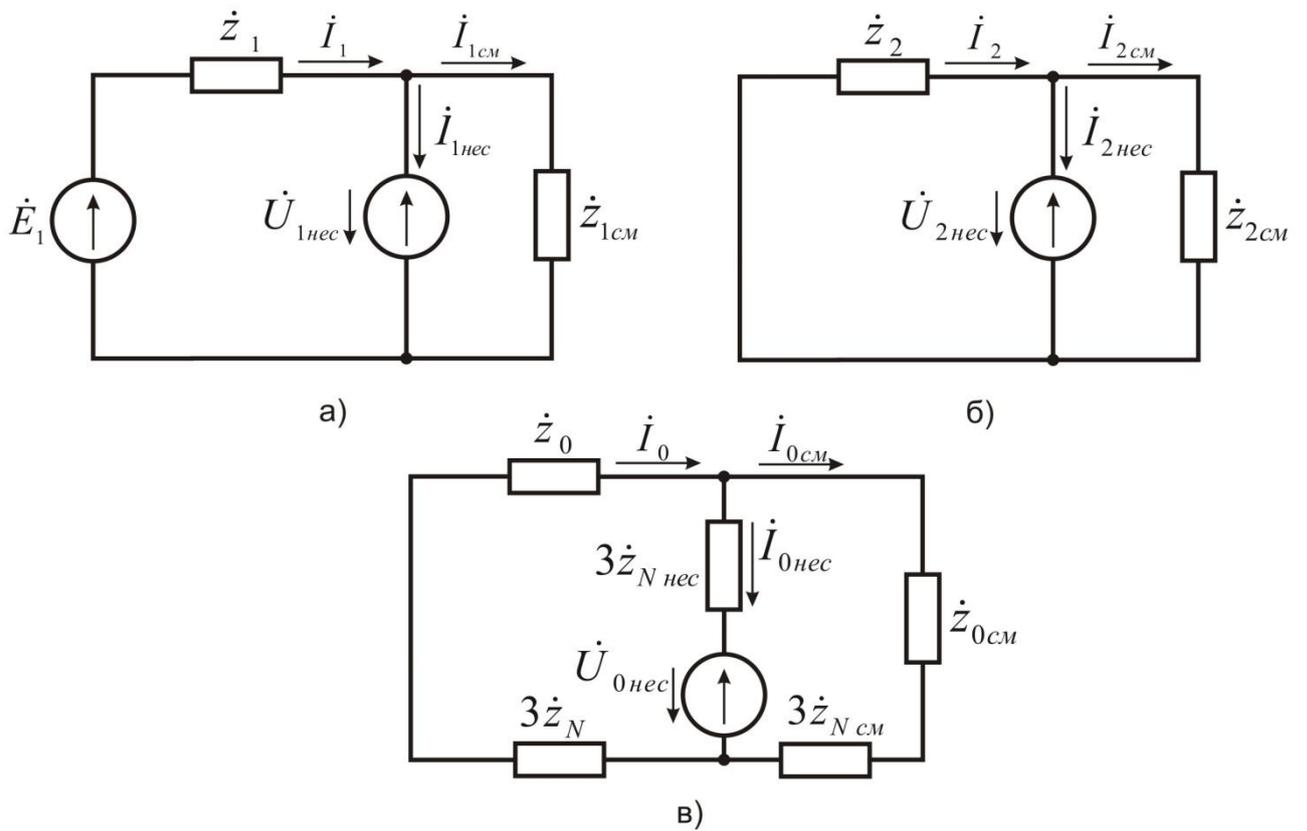


Рис. 2.17. Схеми заміщення прямої (а), зворотної (б), та нульової (в) послідовностей

Введемо позначення у схемах заміщення:

\dot{E}_1 — пряма послідовність джерела ЕРС;

z_1, z_2 — опір джерела живлення;

$\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ — струми прямої, зворотної та нульової послідовності;

$\dot{I}_{1\text{см}}, \dot{I}_{2\text{см}}, \dot{I}_{0\text{см}}$ — струми прямої, зворотної та нульової послідовності в ланцюзі симетричного навантаження (СМ);

$\dot{I}_{1\text{нес}}, \dot{I}_{2\text{нес}}, \dot{I}_{0\text{нес}}$ — струми прямої, зворотної та нульової послідовності в ланцюзі несиметричного навантаження (НЕС);

$\dot{U}_{1\text{нес}}, \dot{U}_{2\text{нес}}, \dot{U}_{0\text{нес}}$ — складові прямої, зворотної та нульової послідовності напруги;

$z_{1\text{см}}, z_{2\text{см}}, z_{0\text{см}}$ — опір прямої, зворотної та нульової послідовності;

$z_{N\text{см}}, z_{N\text{нес}}$ — опір симетричного та несиметричного навантаження;

z_N — опір нейтралі та нульової послідовності.

Основні системи рівнянь даної математичної моделі за схемою заміщення прямої послідовності рис. 2.16, а:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 z_1 + \dot{U}_{1\text{нес}} = \dot{E}_1; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\text{см}} + \dot{I}_{1\text{нес}}; \\ \dot{U}_{1\text{нес}} = \dot{I}_{1\text{см}} z_{1\text{см}}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Рівняння для схеми заміщення зворотної послідовності рис. 2.16, б:

$$\begin{cases} \dot{I}_2 z_2 + \dot{U}_{2\text{нес}} = 0 \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_{2\text{см}} + \dot{I}_{2\text{нес}} \\ \dot{U}_{2\text{нес}} = \dot{I}_{2\text{см}} z_{2\text{см}}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Рівняння схеми заміщення нульової послідовності рис. 2.16, в:

$$\begin{cases} \dot{I}_0 (z_0 + 3z_N) + \dot{U}_{0\text{нес}} + 3\dot{I}_{0\text{нес}} z_{N\text{нес}} = 0 \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_{0\text{см}} + \dot{I}_{0\text{нес}} \\ \dot{U}_{0\text{нес}} + 3\dot{I}_{0\text{нес}} z_{N\text{нес}} = \dot{I}_{0\text{см}} (z_{0\text{см}} + 3z_{N\text{см}}). \end{cases} \quad (2.6)$$

Рівняння у системах (2.4-2.6) є основними рівняннями узагальненої трифазної системи. Враховуємо, що СРН зазвичай має схему з'єднання трифазних нагрівальних елементів “зірка з нульовим виводом”.

Джерелом несиметрії в даній математичній моделі є трифазний СРН (наприклад піч опору) при неповнофазних режимах живлення. Схема з'єднання симетруючих елементів СРН показано на рис. 2.18.

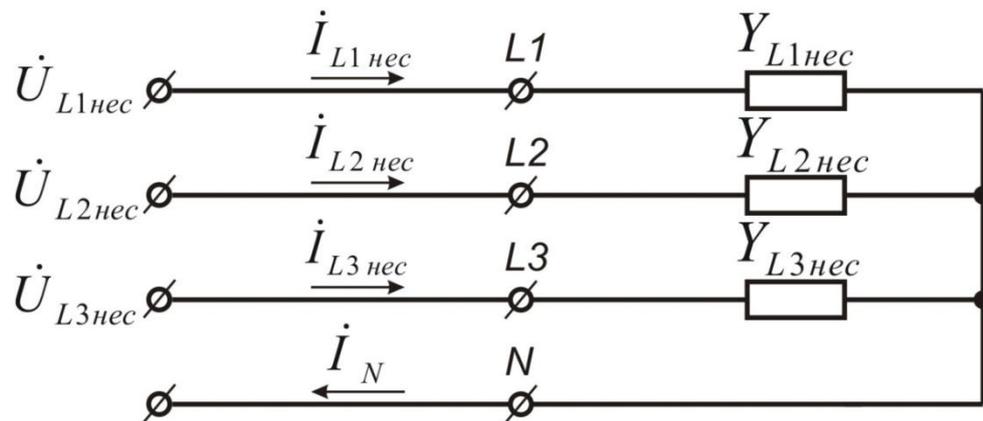


Рис. 2.18. Схема СРН зі з'єднанням провідностей у зірку з нулем
При з'єднанні опорів у зірку фазні струми дорівнюють лінійним:

$$\dot{I}_{L1нес} = \dot{I}_{L1}, \dot{I}_{L2нес} = \dot{I}_{L2}, \dot{I}_{L3нес} = \dot{I}_{L3}. \quad (2.7)$$

Необхідні для розрахунків несиметрії фазні струми визначаються через параметри режиму СРН:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{L1нес} &= \dot{U}_{L1нес} Y_{L1нес}, \\ \dot{I}_{L2нес} &= \dot{U}_{L2нес} Y_{L2нес}, \\ \dot{I}_{L3нес} &= \dot{U}_{L3нес} Y_{L3нес}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Значення струмів та напруг несиметричних елементів:

$$\begin{cases} \dot{U}_{L1\text{нес}} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{L2\text{нес}} = a^2\dot{U}_1 + a\dot{U}_2 + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{L3\text{нес}} = a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 + \dot{U}_0. \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{3}(i_{L1\text{нес}} + ai_{L2\text{нес}} + a^2i_{L3\text{нес}}) \\ i_2 = \frac{1}{3}(i_{L1\text{нес}} + a^2i_{L2\text{нес}} + ai_{L3\text{нес}}) \\ i_0 = \frac{1}{3}(i_{L1\text{нес}} + i_{L2\text{нес}} + i_{L3\text{нес}}). \end{cases} \quad (2.10)$$

Виконаємо перетворення:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{3} \left[(\underline{Y}_{L1\text{нес}} + \underline{Y}_{L2\text{нес}} + \underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_1 + (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a^2\underline{Y}_{L2\text{нес}} + a\underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_2 + \right. \\ \left. (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a\underline{Y}_{L2\text{нес}} + a^2\underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_0 \right] \\ i_2 = \frac{1}{3} \left[(\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a\underline{Y}_{L2\text{нес}} + a^2\underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_1 + (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + \underline{Y}_{L2\text{нес}} + \underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_2 + \right. \\ \left. (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a^2\underline{Y}_{L2\text{нес}} + a\underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_0 \right] \\ i_0 = \frac{1}{3} \left[(\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a^2\underline{Y}_{L2\text{нес}} + a\underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_1 + (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + a\underline{Y}_{L2\text{нес}} + a^2\underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_2 + \right. \\ \left. (\underline{Y}_{L1\text{нес}} + \underline{Y}_{L2\text{нес}} + \underline{Y}_{L3\text{нес}})\dot{U}_0 \right] \end{cases} \quad (2.11)$$

Приймаємо такі позначення для приведення системи рівнянь до більш зручного для подальших розрахунків вигляду:

$$\begin{cases} \underline{Y}_{dY\text{нес}} = \underline{Y}_{L1\text{нес}} + \underline{Y}_{L2\text{нес}} + \underline{Y}_{L3\text{нес}} \\ \underline{Y}_{eY\text{нес}} = \underline{Y}_{L1\text{нес}} + a\underline{Y}_{L2\text{нес}} + a^2\underline{Y}_{L3\text{нес}} \\ \underline{Y}_{kY\text{нес}} = \underline{Y}_{L1\text{нес}} + a^2\underline{Y}_{L2\text{нес}} + a\underline{Y}_{L3\text{нес}}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Система рівнянь (2.11) відображає параметри трифазного несиметричного електроприймача, що є нехарактерним для досліджень у цій дисертаційній роботі. Тому представимо систему рівнянь при двофазному та однофазному режимах роботи СРН. Припустимо, що у двофазному режимі відключена фаза $L1$, а однофазному фази $L1$ і $L2$:

$$\begin{cases} \underline{Y}_{dY\text{нес}(2\phi)} = \underline{Y}_{L2\text{несЭПС}} + \underline{Y}_{L3\text{несЭПС}} \\ \underline{Y}_{eY\text{нес}(2\phi)} = a\underline{Y}_{L2\text{несЭПС}} + a^2\underline{Y}_{L3\text{несЭПС}} \\ \underline{Y}_{kY\text{нес}(2\phi)} = a^2\underline{Y}_{L2\text{несЭПС}} + a\underline{Y}_{L3\text{несЭПС}}. \end{cases} \quad \begin{cases} \underline{Y}_{dY\text{нес}(1\phi)} = \underline{Y}_{L3\text{несЭПС}} \\ \underline{Y}_{eY\text{нес}(1\phi)} = a^2\underline{Y}_{L3\text{несЭПС}} \\ \underline{Y}_{kY\text{нес}(1\phi)} = a\underline{Y}_{L3\text{несЭПС}}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Подібним чином складаємо матрицю фазних провідностей для довільних комбінацій несиметричних режимів при відключенні будь-яких фаз при переході СРН у неповнофазний режим.

Представимо систему (2.13) у матричній формі запису для узагальненого запису несиметричних режимів СРН:

$$\begin{Bmatrix} \underline{Y}_d \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) \\ \underline{Y}_e \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) \\ \underline{Y}_k \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) \end{Bmatrix} = \|\underline{s}\| \cdot \begin{Bmatrix} \underline{Y}_{L3\text{несЭПС}} \\ \underline{Y}_{L2\text{несЭПС}} \\ \underline{Y}_{L1\text{несЭПС}} \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

де $\|\underline{s}\|$ — матриця системи симетричних координат.

Після перетворень отримаємо систему (2.14) у матричній формі запису:

$$\begin{Bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{Bmatrix} \underline{Y}_d \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) & \underline{Y}_k \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) & \underline{Y}_e \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) \\ \underline{Y}_e \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) & \underline{Y}_d \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) & \underline{Y}_k \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) \\ \underline{Y}_k \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) & \underline{Y}_e \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) & \underline{Y}_d \underline{Y}_{\text{нес}}(i\phi) \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

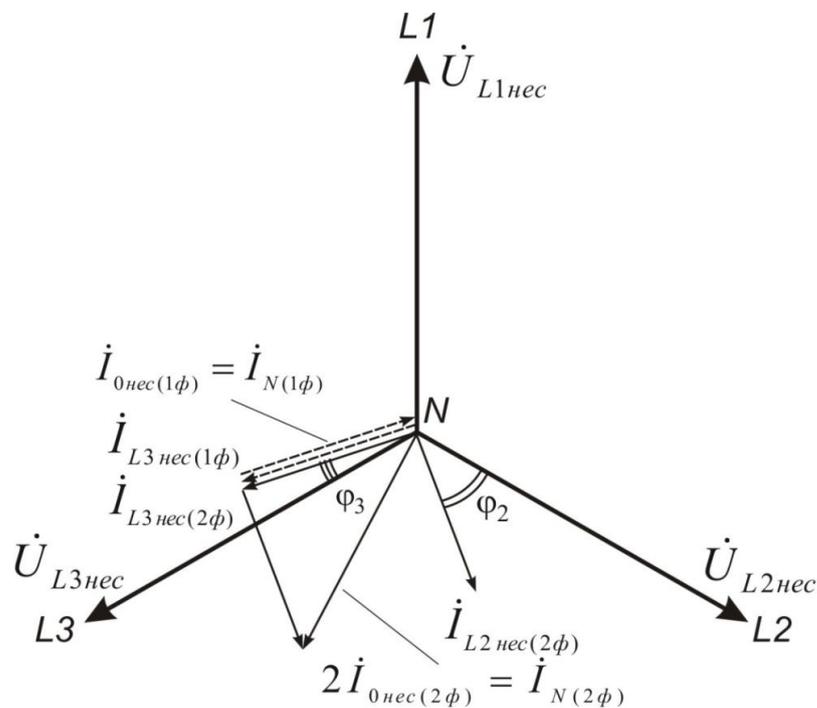


Рис. 2.19. Векторна діаграма струмів та напруги

Для даного етапу моделювання:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{L1} = & \dot{I}_{L1\text{нес}}(k_{\phi}R_{\text{наг}}) \cos \varphi_1 + \dot{I}_{L1\text{нес}}(k_{\phi}X_{\text{наг}}) \sin \varphi_1 + \\ & + [\dot{I}_{L1\text{нес}} \cos \varphi_1 + \dot{I}_{L2\text{нес}} \cos(\varphi_2 + 120^\circ) + \dot{I}_{L3\text{нес}} \cos(\varphi_3 + 240^\circ)] \frac{(R_0 - (k_{\phi}R_{\text{наг}}))}{3} \\ & + [\dot{I}_{L1\text{нес}} \sin \varphi_1 + \dot{I}_{L2\text{нес}} \sin(\varphi_2 + 120^\circ) + \dot{I}_{L3\text{нес}} \sin(\varphi_3 + 240^\circ)] \frac{(X_0 - (k_{\phi}X_{\text{наг}}))}{3}, \end{aligned}$$

де k_{ϕ} — коефіцієнт режиму СРН;

$R_{\text{наг}}, X_{\text{наг}}$ — активний та реактивний опір елементів СРН.

Падіння напруги у будь-якій з фаз визначається системою рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{L1\text{нес}} = \dot{I}_{L1\text{нес}}z_{\text{нес}} + \dot{I}_{0\text{нес}}(z_{0\text{нес}} + z_{\text{нес}}) \\ \Delta \dot{U}_{L2\text{нес}} = \dot{I}_{L2\text{нес}}z_{\text{нес}} + \dot{I}_{0\text{нес}}(z_{0\text{нес}} + z_{\text{нес}}) \\ \Delta \dot{U}_{L3\text{нес}} = \dot{I}_{L3\text{нес}}z_{\text{нес}} + \dot{I}_{0\text{нес}}(z_{0\text{нес}} + z_{\text{нес}}). \end{cases} \quad (2.16)$$

Отже, представимо алгоритм математичної моделі для оцінки симетруючого ефекту СРН:

1. Складання системи рівнянь встановленого режиму для схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовності мережі (2.4-2.6).

Рівняння мають вигляд:

$$[\dot{Y}][\dot{I}_{\text{в}}]=0,$$

$$[\dot{Z}][\dot{U}_{\text{в}}]=0,$$

де $[\dot{Y}]$ — матриця з'єднань вузлових провідностей;

$[\dot{Z}]$ — матриця з'єднань контурних опорів;

$[\dot{I}_{\text{в}}]$ — матриця-стовпець струмів кіл схеми;

$[\dot{U}_{\text{в}}]$ — матриця-стовпець напруг на затискачах кіл.

2. Для несиметричного елемента (СРН) запис додаткових рівнянь, які мають вигляд:

$$[I]_s = [\dot{C}][\dot{U}]_s, \quad (2.17)$$

де $[I]_s, [\dot{U}]_s$ — матриці-стовпці симетричних складових;

$[\dot{C}]$ — матриця коефіцієнтів.

Матрична форма запису:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{10} \\ C_{21} & C_{22} & C_{20} \\ C_{01} & C_{02} & C_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

3. Визначення функціональних умови у вигляді виразів, що дають значення параметрів режиму, а також залежності між різними параметрами неповнофазного режиму, отримані при аналізі векторної діаграми. Ці умови записані у вигляді:

$$V(p_1, p_2, \dots, p_n) = V_0,$$

де p_1, p_2, \dots, p_n — параметри режиму;

V_0 — задане значення функції.

4. Визначаємо умови для напруги:

— симетрування напруги на шинах цехової підстанції.

$$\text{Умова має вигляд: } |\dot{U}_2^H| = U_{2\text{зад}},$$

де $|\dot{U}_2^H|$ — модуль напруги зворотної послідовності на шинах;

$U_{2\text{зад}}$ — задане значення напруги зворотної послідовності.

— компенсація реактивної потужності з урахуванням симетрування напруги на шинах навантаження до значення $|\dot{U}_2^H| = 0$, тобто при повному усуненні несиметричних режимів.

$$\text{Умова наступна: } \sqrt{3}U_{\text{л.ном}} \text{Im}(I_{1\Sigma}^*) = Q_{\text{зад}},$$

де $I_{1\Sigma}^*$ — спряжений комплекс сумарного струму прямої послідовності вузла навантаження (магістрального шинопроводу типу ШМА);
 $Q_{зад}$ — задане значення реактивної потужності вузла навантаження;
 $U_{л.ном}$ — номінальна лінійна напруга мережі.

Режими компенсації реактивної потужності при симетруванні напруги за допомогою СРН розглянуті в розділі 4.

— регулювання напруги на шинах навантаження.

Вираз наступний:

$$\delta U_{доп}^{(min)} \leq \frac{|\dot{U}_{L1L2}| - U_{лном}}{U_{лном}} 100\% \leq \delta U_{доп}^{(max)},$$

$$\delta U_{доп}^{(min)} \leq \frac{|\dot{U}_{L3L1}| - U_{лном}}{U_{лном}} 100\% \leq \delta U_{доп}^{(max)},$$

$$\delta U_{доп}^{(min)} \leq \frac{|\dot{U}_{L2L3}| - U_{лном}}{U_{лном}} 100\% \leq \delta U_{доп}^{(max)},$$

де $|\dot{U}_{L1L2}|$, $|\dot{U}_{L3L1}|$, $|\dot{U}_{L2L3}|$ — модулі лінійної напруги на шинах навантаження;

$\delta U_{доп}^{(min)}$, $\delta U_{доп}^{(max)}$ — максимальне та мінімальне допустиме відхилення напруги.

Згідно ДСТУ EN50160, допустимі відхилення напруги в мережах 380 В у нормальному режимі роботи мережі $\delta U_{доп} = \pm 10\%$.

2.5. Прогнозування електромагнітної обстановки при наявності розподіленої генерації

Характер графіків електричного навантаження у мережах із розподіленою генерацією залежить від специфічних особливостей технологій розподіленої генерації (рис. 2.20), структури мережевої інфраструктури, а також від чинної нормативно-правової бази. Вказані аспекти потребують детального аналізу та розробки удосконалених стратегій управління з метою забезпечення надійного та ефективного функціонування енергосистеми.

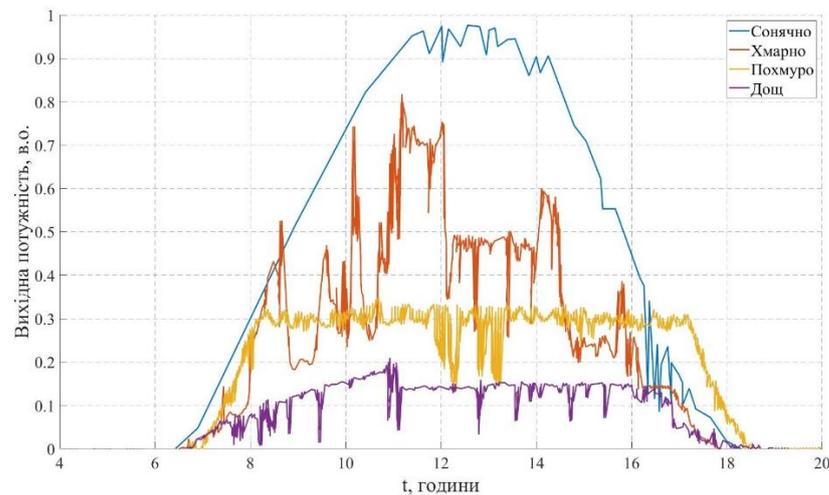


Рис. 2.20. Денна генерація електроенергії СЕС

Дослідження інтеграції ВДЕ у конкретні розподільчі мережі є вкрай важливим. Розробка оптимальних методів управління та експлуатації дозволить максимально використовувати потенціал ВДЕ, забезпечуючи при цьому стабільність та надійність роботи енергосистеми. Основні етапи інтеграції ВДЕ до енергосистеми:

- *Етап 1* (0-15 %). Потужність ВДЕ повністю поглинається місцевим навантаженням.
- *Етап 2* (15-30 %). Попит на місцеве навантаження може бути меншим, ніж вихідна потужність ВДЕ.
- *Етап 3* (30-60 %). Значна частина енергії для місцевого споживання буде надходити від ВДЕ, реверс електроенергії може відбуватися частіше і мати великий вплив на існуючу розподільчу мережу.

На рис. 2.21 приведено приклад графіку електричних навантажень при різних рівнях інтеграції ВДЕ в енергосистему.

Частка встановленої потужності ВДЕ (CP , %) - це показник, який відображає співвідношення між максимальною річною потужністю СЕС та максимальним річним навантаженням на систему в конкретному регіоні. Енергетичні компанії зазвичай використовують CP для оцінки здатності розподіленої потужності ВДЕ по відношенню до регіонального навантаження.

$$CP = \frac{P_{PV,MAX}}{P_{LOAD,MAX}} \cdot 100\%, \quad (2.19)$$

де $P_{pv.max}$ – максимальна вихідна потужність СЕС за рік;

$P_{load.max}$ – максимальне навантаження за рік.

Таким чином, ступінь інтеграції фотоелектричної енергії визначається як відношення доступної PV-енергії до річного енергоспоживання навантаження в межах досліджуваної енергосистеми.

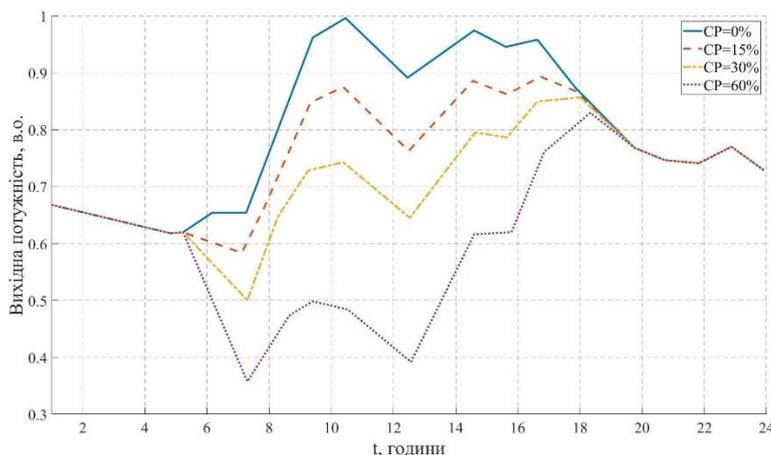


Рис. 2.21. Характер денного графіка при різних рівнях частки ВДЕ у енергосистемі

Традиційно для оцінки продуктивності сонячних панелей сьогодні застосовуються методи, засновані на реальному виміряному значенні сонячного випромінювання в місці їх встановлення.

2.6. Висновки по розділу 2

1. Враховуючи особливості технології гірничих та металургійних підприємств, що пов'язані із циклічністю роботи електричного обладнання, дослідження коефіцієнту потужності показало значну вагу даного показника у забезпеченні енергетично ефективних режимів роботи підприємства. При цьому натуральне значення $\text{tg } \varphi$ складає 2,15, тому для вирішення поставлених наукових завдань та розробці оптимальних режимів електропостачання значення $\text{tg } \varphi$ приймається на рівні 0,48...0,75, що прийнято в основу проектування параметрів ФКУ.

2. Несиметрія напруги за сторони 6-35 кВ живлення ДСП за нормальних режимів енергосистеми знаходиться у межах $K_{2U}=2\dots4\%$, однак у короткочасних режимах при відключенні дуги в одній фазі або децентралізованих режимах енергосистеми, значення коефіцієнта несиметрії по зворотній послідовності підвищується $K_{2U}=4\dots10\%$, що обумовлює стрімке зростання додаткових втрат активної потужності у силовому електрообладнанні та порушує електромагнітну сумісність.

3. Аналіз часових еволюцій $\cos\phi$ протягом плавки ДСП свідчить про те, що в період розплавлення усереднене значення коефіцієнта потужності знаходиться на рівні до 0,7, що відповідає куту зсуву фаз 46° . Це значення кута забезпечує режим безперервного струму і свідчить, що індуктивний опір трансформатора достатній для забезпечення плавки у цьому режимі, тобто приєднання додаткового реактора з інтелектуальним керуванням для покращення електромагнітної сумісності неефективне.

4. Аналіз осцилограм струму та напруг на первинній стороні пічного трансформатора показав, що несинусоїдальність напруги в мережі 35 кВ при централізованому живленні незначна і не викликає помітного підвищення додаткових втрат потужності та енергії в електрообладнанні при зниженні потужності КЗ не більше ніж на 30% від номінального значення. Перенапруги у колі 35 кВ виникають при деяких комбінаціях схеми зовнішнього електропостачання, що потребує додаткових коригувань LC-ланцюгів.

5. Сформовано уточнену математичну модель визначення параметрів несиметрії напруг у розподільчих мережах 0,4 кВ промислових підприємств. Відмінними рисами даної моделі є облік спеціальних неповнофазних режимів живлення електротехнологічних установок в умовах несиметрії, що змінюється, у разі наявності інших джерел несиметрії. Коригуючий ефект по несиметрії при експлуатації СРН у спеціальних режимах залежить від параметрів мережі та віддаленості навантаження від шин низької напруги трансформатора, що дозволяє врахувати зазначені параметри для вибору раціональних режимів роботи підприємства при обмежених можливостях генерації.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

3.1 Аналіз теоретичних основ визначення параметрів електричної енергії

Ефективність роботи сучасних промислових підприємств в умовах технологічних обмежень енергосистеми, викликаних наслідками російського вторгнення, значною мірою залежить від раціонального функціонування електричних мереж на всіх рівнях розподілу електроенергії. Промислові підприємства та енергопостачальні компанії вимушені застосовувати особливі режими забезпечення надійності та електромагнітної сумісності. Можливості участі підприємств на ринку допоміжних послуг створюють додаткові можливості забезпечення стійкості енергосистеми та економічного розвитку індустріального сектору. Електричні розподільчі мережі 0,4 кВ займають вагомую частину загальної кількості мереж. Останнім часом проблеми втрат та якості електроенергії – несинусоїдальності та несиметрії напруги набули особливого значення, враховуючи рівень пошкодження генеруючих потужностей та транзитних ліній електропередач [49, 50].

Розроблено і застосовуються кілька способів зниження шкідливого впливу вищих гармонік та струмів зворотної послідовності на мережу живлення (покращення електромагнітної сумісності) [51], проте всі відомі способи ефективні для умов централізованої енергосистеми та значно гірше працюють при острівних режимах та в умовах автономних систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії, залишаючи проблему якості електроенергії актуальною для багатьох підприємств. Застосування нового промислового обладнання з частотними приводами, а також несиметричні навантаження, лише посилює ситуацію, що склалася.

Один із можливих способів часткового вирішення зазначеної проблеми у системах електропостачання – це пошук раціональних режимів роботи

технологічних установок з урахуванням критичних рівнів потужності короткого замикання. При формуванні раціональних режимів критеріями можуть вважатися мінімальний рівень вищих гармонік в мережі і напруг зворотної послідовності [52-54].

Викликає науковий інтерес дослідження закономірностей зміни неактивних складових повної потужності при несинусоїдальності та несиметрії напруги у промислових електричних мережах при острівних режимах енергосистеми та автономних системах електропостачання з відновлюваними джерелами енергії.

Несиметрія та несинусоїдальність напруги – це поширене явище в цехових розподільних мережах 0,4 кВ промислових підприємств. Специфічні режими роботи електротехнологічних установок впливають на розподіл навантаження по фазах трифазної мережі та призводять до несиметрії напруг. Тому виникла необхідність дослідження закономірностей формування складових повної потужності при наявності джерел вищих гармонік у трифазному та/або неповнофазних режимах [55].

Несиметричним режимом багатofазної електричної системи вважається такий режим, у якому умови роботи фаз неоднакові. Ступінь несиметрії трифазної системи характеризується коефіцієнтами несиметрії зворотної та нульової послідовності.

Проаналізуємо вплив несиметрії та несинусоїдальності напруги на основне електрообладнання систем електропостачання. Коефіцієнти, які характеризують якість напруги, у загальному випадку можуть набувати будь-яких чисельних значень від нуля до нескінченності. Чим вони більші, тим сильніший вплив електроустановок з нелінійним та несиметричним характером навантаження на електричну мережу. Дослідження, проведені раніше [30], показали, що зменшення крутного та пускового моментів асинхронних двигунів (АД) при несиметрії напруг дорівнює квадрату коефіцієнта несиметрії напруг. Зазначимо, що понад 20% АД виходять з ладу внаслідок їхньої роботи в несиметричних електричних системах [56-57].

Несиметрія струмів у магістральних лініях електропередач, розподільних мережах та трансформаторах зменшує пропускну здатність трифазної системи. Якщо при цьому найбільш навантажена фаза працює на межі пропускну здатності, то інші фази виявляються недовантаженими. У разі постачання електроенергії промисловими мережами низької напруги втрата потужності у разі несиметричного розподілу струмів по фазах може бути в три-чотири рази більше, ніж при симетричному режимі [58]. Дослідження, проведені в електричних мережах напругою 6-10/0,4 кВ, показали, що додаткові втрати електроенергії в лініях та трансформаторах внаслідок несиметрії майже на 39% більше втрат при рівномірному навантаженні фаз [59].

Специфіка режимів електричної мережі за наявності несиметричного та несинусоїдального навантаження така, що необхідно розглядати складові повної потужності, які відображають енергетичні процеси, пов'язані з наявністю в мережі вищих гармонік, а також зворотної та нульової послідовності напруги. Для цього найточніше підходить уявлення повної потужності при несиметричному нелінійному навантаженні [60-61].

Зазначимо, що енергетичні процеси у електричних мережах обмеженої потужності за наявності нелінійного та несиметричного навантаження є малодослідженими. Невідомий вплив характерних для таких умов режимів на вибір числа та потужності цехових трансформаторів, а також на перетікання реактивної потужності при наявності стохастичного характеру генерації ВДЕ [62-63].

Для виконання аналізу енергетичних процесів розглянемо вираз суми миттєвих потужностей окремих фаз:

Система напруг з урахуванням симетричних складових [64-65]:

$$\begin{aligned}
 u_{L1} &= \frac{\sqrt{2}}{2} (\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L1}^*); \\
 u_{L2} &= \frac{\sqrt{2}}{2} (\underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L2}^*) = \frac{\sqrt{2}}{2} (a^2 \underline{U}_{L1} + a \underline{U}_{L1}^*); \\
 u_{L3} &= \frac{\sqrt{2}}{2} (\underline{U}_{L3} + \underline{U}_{L3}^*) = \frac{\sqrt{2}}{2} (a \underline{U}_{L1} + a^2 \underline{U}_{L1}^*).
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Миттєві значення несинусоїдальних струмів несиметричної та неврівноваженої систем струмів (для чотирипровідної мережі) виразимо з виділенням першої (основної) гармоніки струму та застосовуючи розкладання в ряд Фур'є [64-65]:

$$\begin{aligned}
 i_{L1} &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{(L1)v} = i_{(L1)1} + \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L1)v} = \frac{\sqrt{2}}{2} (\underline{I}_{(L1)1} + \underline{I}_{(L1)1}^*) + \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L1)v}; \\
 i_{L2} &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{(L2)v} = i_{(L2)1} + \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L2)v} = \frac{\sqrt{2}}{2} (\underline{I}_{(L2)1} + \underline{I}_{(L2)1}^*) + \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L2)v}; \\
 i_{L3} &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{(L3)v} = i_{(L3)1} + \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L3)v} = \frac{\sqrt{2}}{2} (\underline{I}_{(L3)1} + \underline{I}_{(L3)1}^*) + \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L3)v}; \\
 i_N &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{Nv} = i_{N1} + \sum_{v=2}^{\infty} i_{Nv} = \frac{\sqrt{2}}{2} (\underline{I}_{N1} + \underline{I}_{N1}^*) + \sum_{v=2}^{\infty} i_{Nv}, \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

де $i_{(L1)v}$, $i_{(L2)v}$, $i_{(L3)v}$ — миттєві значення v -х гармонік відповідно у фазах L1, L2, L3 та нейтральному проводі N.

Провівши перетворення та застосовувши метод симетричних складових, виразимо фазні потужності у вигляді, що характеризує зміни неактивних складових, викликаних несиметрією та несинусоїдальністю напруги:

$$\begin{aligned}
 p_{L1} &= \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_0 + \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}] + \\
 &\quad + u_{L1} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L1)v}; \\
 p_{L2} &= \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + a \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[a \underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[a^2 \underline{S}_0 + a^2 \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}] + \\
 &\quad + u_{L2} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L2)v}; \\
 p_{L3} &= \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + a^2 \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[a^2 \underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}] + \frac{1}{3} \operatorname{Re}[a \underline{S}_0 + a \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}] +
 \end{aligned}$$

$$+u_{L3} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L3)v}. \quad (3.3)$$

Зручність запису рівнянь (3.3) полягає в тому, що у вирази миттєвих потужностей фаз введені складові несиметричних потужностей, розкладені на симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовності, а також окремої складової виділені потужності, зумовлені вищими гармоніками та інтергармоніками. У рівняннях (3.3) можна назвати чотири складових потужності, також званих частковими потужностями, три з них деякі автори називають неактивними [64-65].

Виконаємо аналіз кожної складової в контексті отримання залежностей енергетичних показників промислового навантаження у випадку обмеження потужності енергосистеми.

Перший доданок містить складові потужності прямої послідовності:

$$\begin{aligned} S_{(L1)1} &= \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}]; \\ S_{(L2)1} &= \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + a \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}]; \\ S_{(L3)1} &= \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\underline{S}_1 + a^2 \underline{S}_1^* e^{j2\omega t}], \end{aligned} \quad (3.4)$$

Сума миттєвих значень складових потужностей прямої послідовності:

$$S_1 = S_{(L1)1} + S_{(L2)1} + S_{(L3)1} = \frac{1}{3} \operatorname{Re}[3\underline{S}_1 + (1 + a + a^2)\underline{S}_1^* e^{j2\omega t}] = \operatorname{Re}[\underline{S}_1] \quad (3.5)$$

Значення S_l має постійне значення, так як змінні складові потужності окремих фаз зрушені відносно один одного на 120° та їх сума в кожний момент часу дорівнює нулю. За порушення симетрії живлення нагрівачів ця умова не

виконується і рівняння (3.5) дозволяє оцінити рівень змінної потужності залежно від виду несиметрії (однофазне або двоплечеве навантаження) [66-67].

Вираз $S_1 = Re[\underline{S}_1] = P$ прийнято називати активною потужністю спотвореної системи. Уявну частину комплексу складової потужності прямої послідовності називають реактивною потужністю $Q = Im[\underline{S}_1]$.

Очевидно, що при несиметричному та нелінійному навантаженні повна потужність не повною мірою відображає енергетичні процеси перетворення електроенергії. Крім того, складові потужностей при несиметрії та несинусоїдності не враховуються при виборі потужності трансформаторів КТП, перерізів проводів і кабелів. Острівні режими енергосистеми та масове впровадження місrogrid систем значно поглиблюють проблему несиметрії та несинусоїдальності, тому необхідно розробити методики, які враховують усі складові потужності та особливості їх змін.

Другий доданок містить складові потужності зворотної послідовності:

$$\begin{aligned} S_{(L1)2} &= \frac{1}{3} Re[\underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}]; \\ S_{(L2)2} &= \frac{1}{3} Re[a\underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}]; \\ S_{(L3)2} &= \frac{1}{3} Re[a^2 \underline{S}_2 + \underline{S}_2^* e^{j2\omega t}], \end{aligned} \quad (3.6)$$

де $\underline{S}_2 = 3\underline{U}_{L1} \underline{I}_{(L1)21}^*$.

Параметр S_2 називають потужністю пульсацій, яка показує, що при несиметрично завантаженій трифазній мережі виникає потужність пульсацій, частота зміни якої вдвічі більша за частоту мережі живлення, а середнє значення дорівнює нулю [66-67].

Третій доданок містить складові потужності нульової послідовності:

$$\begin{aligned} S_{(L1)0} &= \frac{1}{3} Re[\underline{S}_0 + \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}]; \\ S_{(L2)0} &= \frac{1}{3} Re[a^2 \underline{S}_0 + a^2 \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}]; \\ S_{(L3)0} &= \frac{1}{3} Re[a \underline{S}_0 + a \underline{S}_0^* e^{j2\omega t}], \end{aligned} \quad (3.7)$$

де $\underline{S}_0 = 3\underline{U}_{L1}\underline{I}_{(L1)01}^*$.

Цю потужність називають прихованою потужністю, оскільки середнє її значення на періоді дорівнює нулю. Ця складова потужності проявляється під час передачі активної потужності в неврівноваженій трифазній чотирипровідній мережі [68].

Четвертий доданок містить складові потужності викривлення:

$$S_{(L1)BK} = u_{L1} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L1)v}; \quad S_{(L2)BK} = u_{L2} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L2)v}; \quad S_{(L3)BK} = u_{L3} \sum_{v=2}^{\infty} i_{(L3)v}. \quad (3.8)$$

Потужність викривлення виражається добутком основної гармоніки напруги та струмів відповідних фаз. Дані потужності називаються фазними потужностями викривлення і виявляються при несинусоїдальних струмах навантаження. Середнє значення за період дорівнює нулю. Для наочності подаємо перераховані потужності на узагальненій векторній діаграмі (рис. 3.1).

Повну потужність трифазної чотирипровідної системи при несиметричному та нелінійному навантаженні подаємо у спрощеному вигляді [69]:

$$S_d = \sqrt{P^2 + Q^2 + S_2^2 + (3n + 1)S_0^2 + D^2}. \quad (3.9)$$

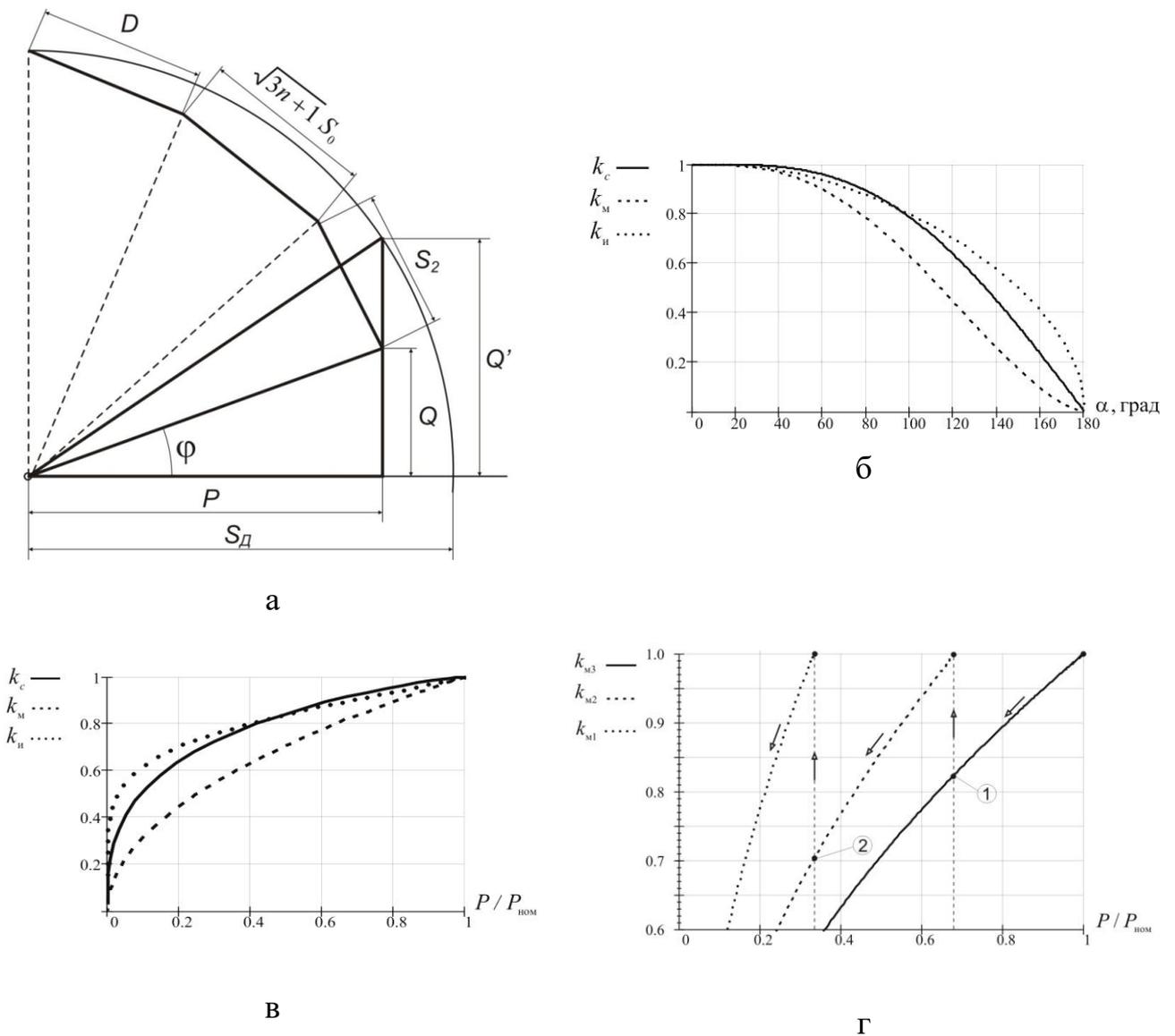


Рис. 3.1. Складові повної потужності при нелінійних та несиметричних навантаженнях (а), залежності енергетичних коефіцієнтів навантаження (б-г)

Перелічені складові повної потужності: потужності зворотної послідовності, потужності нульової послідовності та потужності викривлення виникають при передачі активної потужності. Ці потужності не беруть участь у передачі енергії від джерела до навантаження. Однак подібно до реактивної потужності вони мають свої складові в струмі навантаження, що збільшують втрати в мережах і знижують пропускну здатність трансформаторів.

Розрахунок енергетичних показників «проблемного» несиметричного та нелінійного навантаження було виконано за граничних умов зміни потужності

короткого замикання для умов цехових розподільчих мереж 0,4 кВ (рис.3.1, б-г).

3.2 Моделювання коефіцієнтів несиметрії

Сучасні електротехнологічні установки (електропічне обладнання) мають технічні засоби регулювання потужності окремо за трьома фазами, що може бути використане при симетруванні трифазної системи напруг [69-70]. Для коректної класифікації режимів споживача-регулятора необхідно визначити межі зміни показників несиметрії за різних комбінацій мережевих параметрів та навантажувальних характеристик. Запропонований підхід має перспективи впровадження для усунення несиметрії та отримання раціональних структур співвідношень загальноцехового та електропічного навантажень. У режимах обмеженої потужності енергосистеми використання спеціальних симетруючих режимів активних споживачів-регуляторів якості напруги (СРН) є дієвим способом забезпечення електромагнітної сумісності.

Для моделювання регулюючого ефекту несиметричного навантаження виконано дослідження електричних режимів типового електротехнічного обладнання промислових підприємств. Навантаження по стороні 0,4 кВ цехового трансформатора має симетричний характер, а джерелом несиметрії є керований активний споживач (трифазна електропічна установка з тиристорним регулюванням потужності). Такий підхід дозволяє оцінити частку несиметрії, яка відповідає неповнофазним режимам роботи установки.

Таким чином, використання спеціальних режимів роботи СРН, визначених як енергоефективних, дозволить сформулювати наступні режими роботи цехових електричних мереж [71]:

1. Поява несиметрії напруг зворотної та нульової послідовностей. Такий режим може мати місце у разі переведення СРН в несиметричний режим роботи при абсолютно симетричному розподілі залишкового цехового навантаження по фазах. Доцільність застосування такого режиму повинна оцінюватися шляхом порівняння загальних витрат в електромережі з

величиною збитків від виникнення несиметрії напруг та зменшення несинусоїдальності.

2. *Зменшення коефіцієнтів зворотної та нульової послідовності напруги.* Даний режим реалізується при правильному визначенні найбільш завантаженої фази мережі та розподілі навантаження СРН на фази, що мають менше навантаження (при двофазному режимі живлення СРН) або перемиканні всього резерву регулюючої потужності на фазу з найменшим навантаженням (при однофазному режимі живлення СРН).

Для оцінки симетруючих властивостей СРН необхідно сформувати нові залежності, коефіцієнтів несиметрії K_{U2} і K_{U0} від параметрів електроенергетичної системи. Ефект симетрування оцінюється при припущенні, що несиметрія обумовлюється тільки СРН, а решта навантаження має симетричний характер.

При аналізі даних залежностей особлива увага приділена потужності короткого замикання мережі, а також співвідношенням потужність СРН - потужність цехового трансформатора та потужність СРН - потужність симетричного навантаження. Коригування несиметричних режимів здійснюється за допомогою комплексних опорів навантаження.

Схемні обмеження на підключення коригувальних елементів СРН представлені у вигляді двофазної та однофазної схем живлення (рис. 3.2).

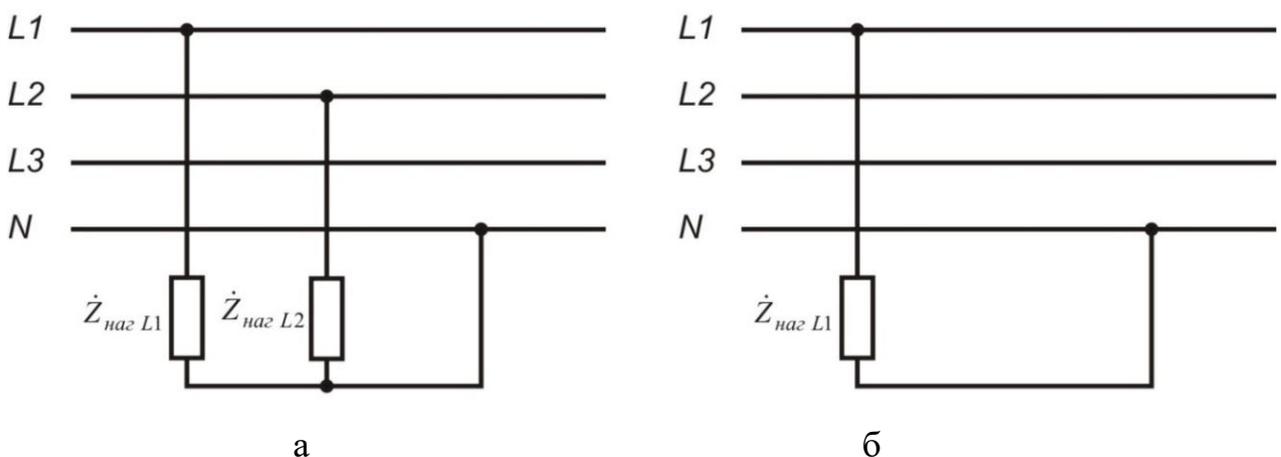


Рис. 3.2. Схеми пристроїв, що коригують поперечну структуру СРН при двофазному (а) та однофазному (б) режимах її роботи

На основі уточненої математичної моделі, яка базується на методі симетричних складових, отримано ряд залежностей коефіцієнтів несиметрії зворотної та нульової послідовності від потужності СРН $K_{U2} = f(S_{СРН}^*)$, $K_{U0} = f(S_{СРН}^*)$, приведеної до симетричного трифазного навантаження цехового трансформатора (рис. 3.3-3.4).

При моделюванні прийнято стандартний ряд потужностей силових цехових трансформаторів, які найчастіше застосовуються у КТП з потужністю силових трансформаторів 400, 630, 1000, 1600 кВА.

Зазвичай коефіцієнти несиметрії мають граничні (максимальні) значення за будь-яких відносин потужностей. Тому в розрахунках враховуються максимально можливі значення потужностей у неповнофазних режимах. У реальних режимах роботи ця умова не завжди виконується, так як потужність регульованого навантаження може знижуватися. При цьому будуть знижуватися і значення коефіцієнтів несиметрії. Однак отримані залежності впливу параметрів енергетичної системи з можливістю оцінки граничних коефіцієнтів несиметрії і граничних регульовальних характеристик мають наукову новизну та практичну цінність.

Залежності коефіцієнтів нульової послідовності аналогічні розглянутим. Для усунення несиметрії нульової послідовності є більш ефективні способи (наприклад, зниження опору нульової послідовності цехових трансформаторів шляхом зміни схеми з'єднання обмоток). Значення коефіцієнта несиметрії нульової послідовності найбільш ефективно можна знизити схемними рішеннями, а не перерозподілом навантажень по фазах.

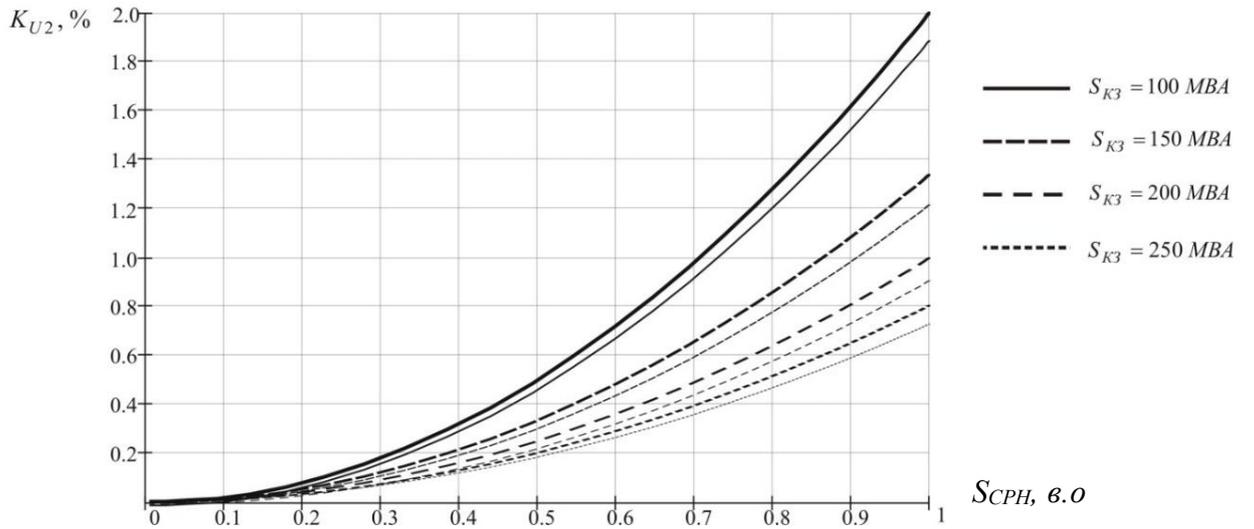


Рис. 3.3. Функції коефіцієнта несиметрії напруги при роботі СРН
при $S_{нт} = 400$ кВА

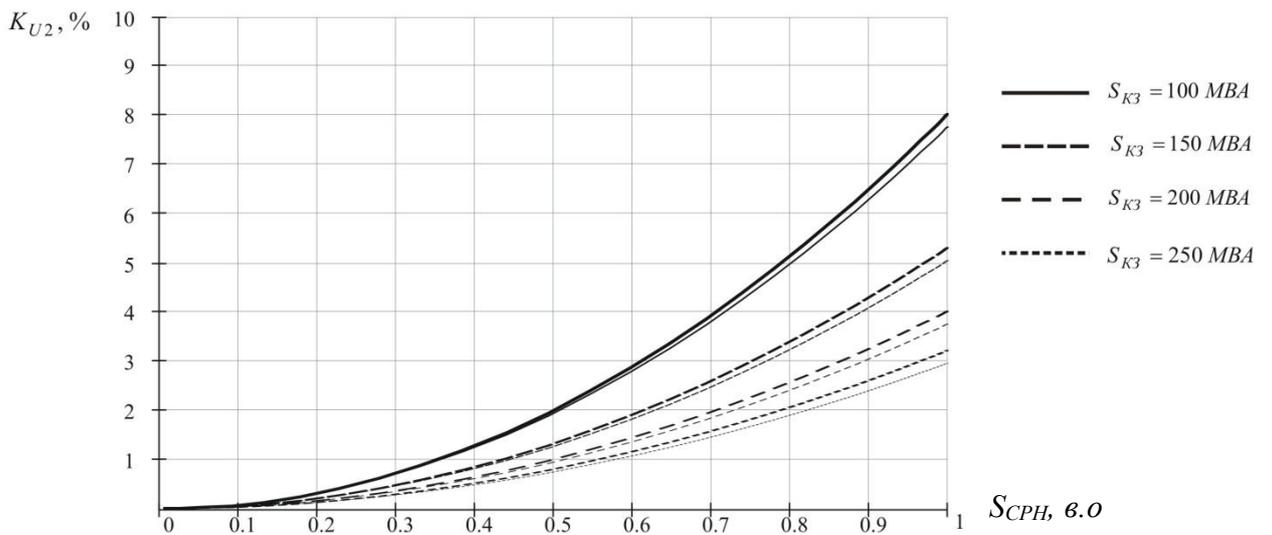


Рис. 3.4. Функції коефіцієнта несиметрії напруги при роботі СРН
при $S_{нт} = 1600$ кВА

З отриманих залежностей випливає, що регулюючий ефект від застосування неповнофазних режимів живлення СРН оцінюється мережевими параметрами (потужність КЗ) та співвідношенням несиметричного навантаження до трифазної симетричної. Слід зазначити, що при моделюванні

опрацьовано повний можливий діапазон зміни зазначених параметрів. Екстремальні значення коефіцієнтів несиметрії досягаються при співвідношенні параметрів $\frac{S_{\text{СРН}}^*}{S_{\text{СИМ}}^{(3)}} = 1$, наведених у табл. 3.1, що справедливо при рівності потужностей регульованого навантаження СРН та трифазного симетричного. При цьому більші коефіцієнти несиметрії спостерігаються при двофазному режимі роботи СРН, порівняно з однофазним.

За наявності в системах цехового електропостачання трансформаторів з номінальними потужностями із зазначеного вище ряду, коефіцієнти несиметрії з граничними значеннями, не будуть реалізовані через надвисоке значення потужності СРН. Тому з практичної точки зору найбільший інтерес має ділянка характеристики $\frac{S_{\text{СРН}}^*}{S_{\text{СИМ}}^{(3)}} = (0 \dots 0,5)$.

Таблиця 3.1. Граничні значення коефіцієнтів несиметрії напруги зворотної послідовності в неповнофазних режимах роботи СРН

$S_{\text{КЗ}}, \text{МВ}\cdot\text{А}$	$K_{U2}, \%$			
	$(0 \dots 0,25)S_{\text{СИМ}}^{(3)}$	$(0,25 \dots 0,5)S_{\text{СИМ}}^{(3)}$	$(0,5 \dots 0,75)S_{\text{СИМ}}^{(3)}$	$(0,75 \dots 1,0)S_{\text{СИМ}}^{(3)}$
100	2	3,15	5	8
150	1,33	2,1	3,33	5,33
200	1	1,58	2,5	4
250	0,8	1,26	2	3,2

3.3. Моделювання коефіцієнтів несинусоїдальності

У цехах сучасних промислових підприємств більше 80% електроенергії використовують у перетвореному вигляді (на металургійних заводах – понад 90 %). Широко застосовувані *вентильні перетворювачі (ВП)*, різного роду перетворювачі частоти, електроприлади побутового класу, що працюють як у статичних, так і перехідних режимах, є потужними генераторами ЕМЗ. Нелінійні навантаження, які створюються дуговими сталеплавильними печами (ДСП), феросплавними та індукційними печами, електрозварювальними установками, сонячними та вітровими електростанціями, силовими

трансформаторами та електродвигунами також генерують значні ЕМЗ. У табл. 3.1 зазначені джерела ЕМЗ на підприємствах різних галузей промисловості [30].

Таблиця 3.1. Промислові джерела ЕМЗ

Споживач	Електромагнітна завада (ЕМЗ)
Виробництво синтетичного волокна	Відхилення напруги
Машинобудування з робототехнічними комплексами	Відхилення, коливання, несиметрія напруги
Комбінати чорної металургії з дуговими та феросплавними печами	Відхилення, коливання, несинусоїдальність та несиметрія напруги
Комбінати кольорової металургії з установками електролізу	Відхилення, коливання, несинусоїдальність напруги
Заводи з однофазними та двофазними навантаженнями	Відхилення, та несиметрія напруги
Тягові підстанції електрифікованих залізниць	Відхилення, несинусоїдальність та несиметрія напруги

Вентильні перетворювачі (особливо перетворювачі частоти) є потужними концентрованими джерелами гармонійних завод у вигляді ВГ [30, 71]. У 6-пульсних мостових схемах основними є 5, 7, 11, 13-та гармоніки, так звані канонічні, рівні яких обернено пропорційні номеру, тобто: $1/5$, $1/7$, $1/11$, $1/13$. При використанні 12-пульсних схем теоретично немає 5 і 7 гармонік, а переважають 11 та 13-та. Такі перетворювачі застосовуються у схемах головних приводів прокатних станів, електролізному виробництві та ін. У практиці розрахунку ВГ вентильних перетворювачів різних типів випрямляч враховується як джерело канонічних ВГ струму, рівень яких обернено пропорційний номеру гармонік. Це відповідає випадку, коли індуктивність кола постійного струму $L_d = \infty$, а індуктивність контуру комутації $L_k = 0$. Криві лінійних струмів мають прямокутно-ступеневу форму тривалістю 120 електричних градусів. У реальних умовах, залежно від співвідношення L_d і L_k ,

ці криві деформовані внаслідок наявності пульсуючої складової кола постійного струму [30].

У силовій енергоелектроніці широке застосування знаходять перетворювачі частоти без проміжної ланки постійного струму - *безпосередні частоти перетворювачі (БПЧ)*. В даний час можна виділити такі основні сфери застосування різних типів БПЧ [30]:

- регульовані електроприводи змінного струму;
- джерела енергії з постійною частотою на виході при змінній вхідній частоті;
- керовані джерела реактивної потужності для систем FACTS;
- взаємні зв'язки систем змінного струму з можливістю транзиту та реверсу енергії.

Архітектура циклоконвекторів з природною комутацією вентилів (некеровані БПЧ) будуються на основі реверсивних випрямлячів змінного струму, що є зустрічно-паралельним з'єднанням груп керованих вентилів. Почергове (циклічне) включення груп генерує у навантаженні змінний струм необхідної частоти.

Перетворювач зі ланкою постійного струму складається з двох вентиляльних систем - випрямляча та інвертора (як правило, інвертора напруги). Ланка постійного струму включає індуктивність L_d і ємність C . Випрямляч і інвертор можуть бути керованими або некерованими, відповідні системи управління можуть бути незалежними або пов'язаними між собою. Потужні перетворювачі комплектуються реактором для згладжування L_d , який призначено для зменшення пульсацій струму i_d . У перетворювачах малої потужності зв'язок випрямляча і інвертора здійснюється тільки за допомогою конденсатора C . В усіх випадках перетворювачі даного типу приєднуються до мережі безпосередньо, без спеціального трансформатора. Це враховується при побудові схем заміщення на частотах вищих гармонік. При аналізі електромагнітної сумісності перетворювача і мережі живлення використовується метод накладання, тобто робота випрямляча і інвертора

розглядається незалежно. Первинний мережевий струм перетворювача – це сума ВГ струму випрямляча i_{en} та інтергармонік (ІГ) інвертора i_{in} , перерахованих на сторону випрямляча за допомогою комутаційної функції K_I [30]:

$$i_{cn} = i_{en} + K_I \cdot i_{in}. \quad (3.10)$$

У кривій мережевого струму містяться гармоніки з частотами

$$f_{ex} = (kp1 \pm 1) f_1 \cdot p2nf_2, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Перший доданок визначає частоти канонічних ВГ, другий - ІГ, не кратних вхідній частоті f_1 .

Дугова сталеплавильна піч є значним джерелом ЕМЗ, а саме ВГ та ІГ, коливань та несиметрії напруги. Найбільшою мірою генерування ЕМЗ проявляється в період розплавлення металу. З аналізу лінійного спектру випливає, що в діапазоні 0-2,5 Гц з'являються ІГ, рівні яких можуть досягати 10% струму основної частоти. В цілому спектр процесу еволюції струмів ДСП в період розплавлення є змішаним та складається з дискретної та безперервної складових. Енергія ІГ для печей ДСП-100 та ДСП-200 становить близько 20 % усієї енергії змішаного спектру. Несиметрія напруги на шинах ДСП, залежно від напруги живлення, досягає 5-6% для мереж 6-10-35 кВ і 3% - для мереж 110 кВ. Для тих же випадків значення дози флікеру напруги знаходиться у межах 1,5-10.

Результати експериментальних досліджень рівнів ВГ та ІГ в залежності від вихідної частоти перетворювача та моменту на валу приводного двигуна показали обернено пропорційну залежність амплітуд ІГ від частоти f_2 (рис. 3.5) [30].

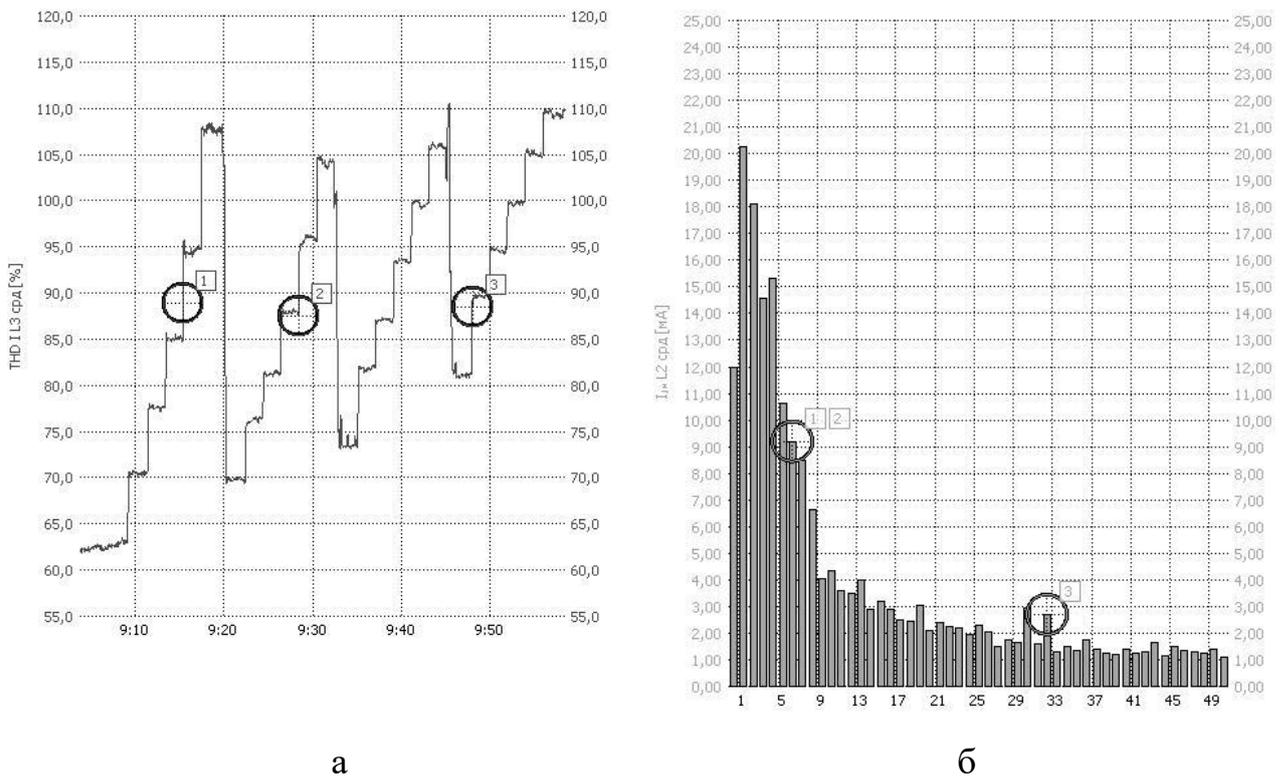


Рис. 3.5. Значення THD_I перетворювача частоти з ланкою постійного струму (а) та інтергармонік (б) при вихідній частоті $f_2=50\dots 20$ Гц

Для достовірних розрахунків втрат потужності та енергії від протікання вищих гармонік запропонована узагальнена схема заміщення підстанції промислового підприємства, яка враховує кількість приєднань, що знаходяться у роботі та їх режимні показники. Дана модель відрізняється від існуючих можливістю врахування опорів перетворювачів енергії (випрямлячі, перетворювачі частоти) потужних електроустановок 6...10 кВ. Еквівалентна модель підстанції представлена на рис. 3.6.

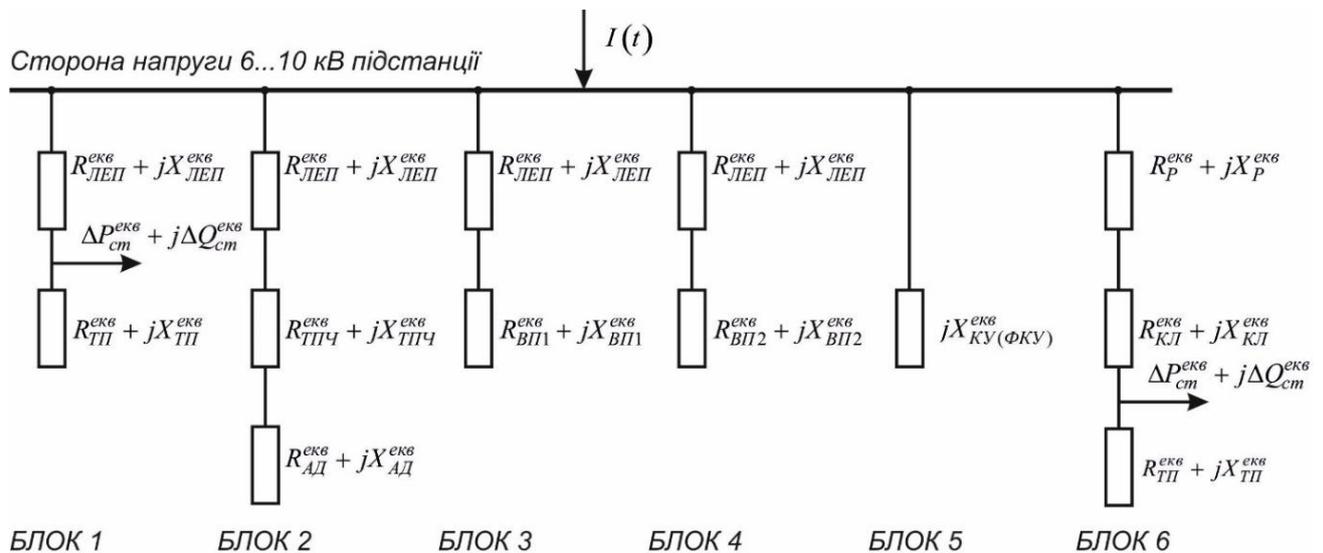


Рис. 3.6. Узагальнена модель головної знижувальної підстанції з потужними нелінійними навантаженнями

В схемі лінії електропередач представлені комплексними опорами. Окремими приєднаннями показано ТП 6...10/0,4 кВ (блок 1), електропривод вентилятора (блок 2), підйомна машина №1 (блок 3), підйомна машина №2 (блок 4), компенсуючі пристрої (БК та/або ФКУ) (блок 5), кабельні лінії живлення споживачів (блок 6).

Запропонована модель характерна для головних знижувальних підстанцій та підстанцій глибокого вводу 35...330/6-10 кВ промислових підприємств, від яких, за статистикою, отримає живлення 95% потужних промислових об'єктів України. Модель характеризується новими можливостями для оцінки втрат потужності та електроенергії в електричних мережах гірничих та металургійних підприємств, які полягають в поелементному врахуванні кількості та потужності споживачів з перетворювачами енергії. Це дозволяє підвищити точність розрахунків, оскільки враховується різка зміна навантаження підприємства та параметрів централізованої енергосистеми.

Дану еквівалентну модель підстанції можливо використовувати в новітніх моделях побудови децентралізованих систем електропостачання з використанням елементів концепції Smart Grid, що відрізняється від відомої

методології визначення електричних режимів. Залежності параметрів схеми заміщення, отримані на даній моделі, мають універсальний характер, що використовується для врахування вищих гармонік у розрахунках втрат електричної енергії.

3.4. Моделювання резонансних явищ при наявності джерел розподіленої генерації

Активний розвиток в Україні сонячної енергетики у 2017-2023 роках призвів до суттєвих змін електричних режимів системоутворюючих підстанцій на шинах напругою 35-330 кВ. При цьому показники якості напруги за відхиленнями та несинусоїдальністю дуже часто не відповідали діючим нормативним документам. Тому з'явилась необхідність модернізації існуючих та впровадження нових засобів корекції показників електромагнітної сумісності. Південні райони Дніпропетровської області характеризуються наявністю найпотужніших промислових підприємств України та одночасно є дуже сприятливими для побудови сонячних електростанцій великої потужності (200-240 МВт). З початком військової агресії росії та запровадженням воєнного стану енергосистема України працює у режимі дефіциту генеруючих потужностей, що призвело до «ослаблення» потужності короткого замикання у електричних мережах постачальників та споживачів. Це призводить до системного погіршення якості напруги у вузлах приєднання потужного промислового навантаження та точках приєднання сонячних інверторів, як джерел електромагнітних завад. Тому наукові дослідження показників якості та резонансних явищ при змінах режиму енергосистеми є актуальними та такими, що відповідають сучасним викликам українським енергетикам [61, 72].

Необхідність дослідження резонансних явищ у електричній схемі СЕС виникло під час аналізу результатів експериментального моніторингу параметрів електричних режимів роботи сонячної електростанції з інтелектуальними пристроями компенсації реактивної потужності та перевірки умов виникнення резонансів напруги на імітаційній моделі системи

електропостачання з урахуванням стану електроенергетичної системи та граничних варіацій зміни опорів кабельних ліній приєднання інверторів.

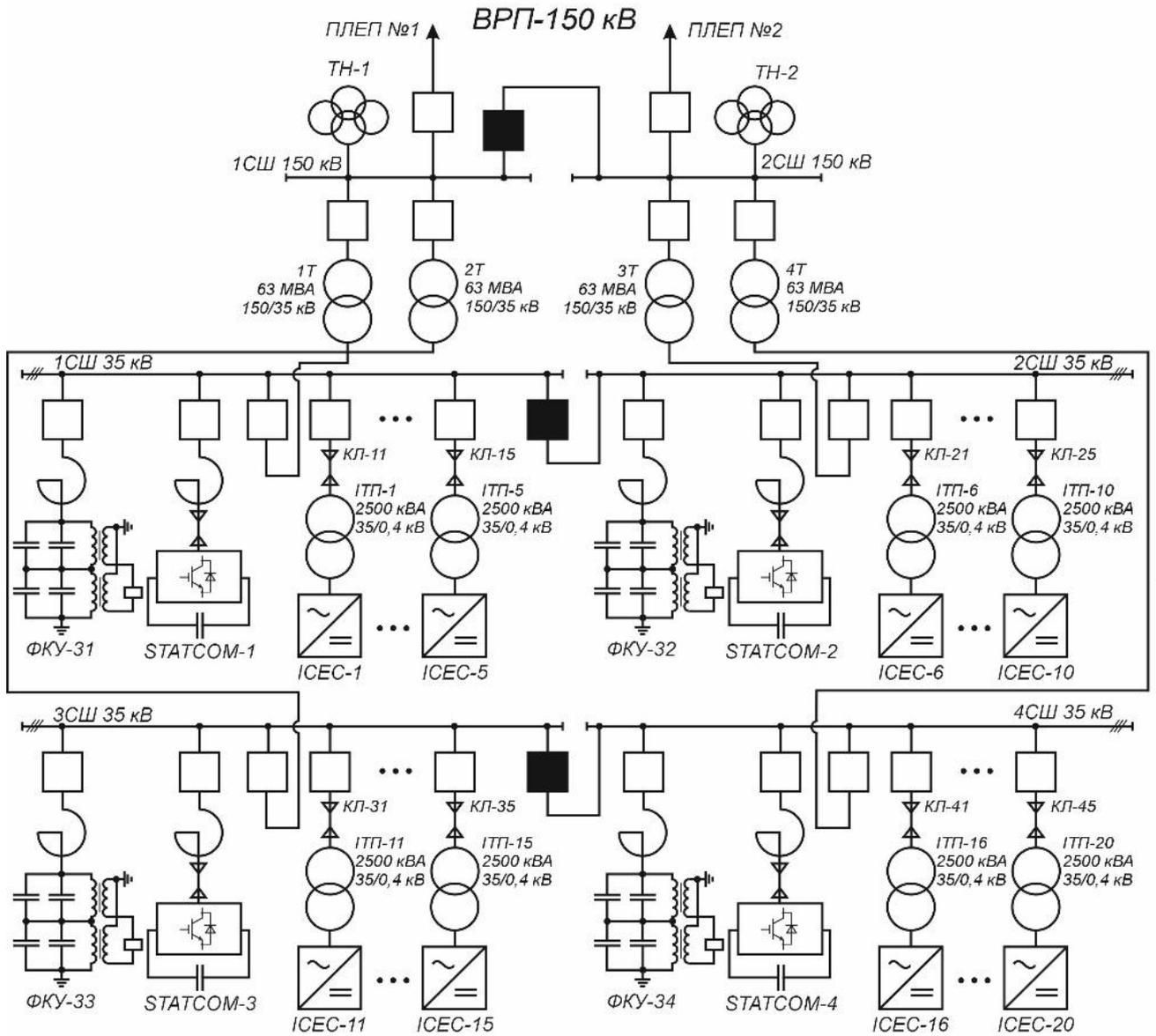
Функціонування електроенергетичної системи пов'язане з цілим рядом вимог, виконання яких є невід'ємною частиною надійного та безаварійного живлення відповідальних електроприймачів критичної інфраструктури. Одним з показників енергетичної ефективності роботи системи є коефіцієнт потужності або «power factor». На вітчизняному та світовому рівні виконано достатньо наукових досліджень та розроблено кілька методик компенсації реактивної потужності в промислових електричних мережах [72-74]. Однак, робота потужних сонячних електростанцій (СЕС) супроводжується порушеннями електромагнітної сумісності з енергосистемою, тому проблема оптимальної компенсації реактивної потужності потребує додаткового дослідження та систематизації шляхів її вирішення. При застосуванні груп потужних сонячних інверторів на СЕС режим реактивної потужності у вузлах комплексного навантаження необхідно аналізувати з урахуванням амплітудно-частотних характеристик для відслідковування, прогнозування та запобігання резонансних явищ в системах електропостачання. Оскільки відомо, що рівні спотворення синусоїдальності напруги в електричних мережах СЕС мають циклічний характер та залежить від пори року та інтенсивності сонячного випромінювання, то в основу математичної моделі аналізу резонансів необхідно покласти типові варіації приєднання силових схем сонячних інверторів та режимні особливості СЕС [73-74]. Застосування для компенсації статичних компенсаторів реактивної потужності вимагає перевірки електричної мережі на резонанс. Перспективним є застосування активних фільтро-компенсуючих пристроїв у поєднанні з класичними конденсаторними батареями (так звані «гібридні фільтри»). Це значно зменшує капітальні та експлуатаційні витрати на компенсацію. Дослідження процесу формування електричних режимів комплексних вузлів навантаження зі статичними компенсаторами реактивної потужності при наявності вищих гармонік має науковий інтерес та практичне значення. Насамперед необхідно прогнозувати

зони частот, на яких можливі резонансні явища та розробити технічні заходи захисту компенсуючих пристроїв та оптимізації перетоків реактивної потужності. Введення припущень при моделюванні резонансів та визначення початкових умов пояснимо на спрощеній схемі приєднання СЕС до енергосистеми (рис. 3.7).

Схема демонструє три електричних кола, що безпосередньо приймають участь у виникненні резонансів: сонячні мережеві інвертори як джерело вищих гармонік, електрична мережа з варіативними змінами параметрів, конденсаторна установка та/або гібридний фільтр. У випадку, коли ємність вимкнена від секції шин, АЧХ має лінійний характер та явище резонансу відсутнє. При приєднанні конденсаторних батарей або STATCOM АЧХ має нелінійний характер з екстремумами [74-75].

Розробка алгоритму моделювання резонансних явищ. Враховуючи особливості електричних схем потужних СЕС, розроблено наступний алгоритм для моделювання резонансних явищ та розрахунку амплітудно-частотних характеристик вузла навантаження:

- аналіз схем системоутворюючої підстанції при нормальному, післяаварійного та децентралізованому режимі роботи;
- визначення параметрів зовнішнього та внутрішнього електропостачання для вказаних режимів;
- складання схем заміщення електричної мережі в $R-L-C$ параметрах, де враховуються опори системи, проводів, кабелів, трансформаторів, реакторів, БК та кіл з перетворювачами електроенергії;
- визначення параметрів схеми заміщення;
- визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення;
- розрахунок АЧХ вузла навантаження;
- оцінка дії резонансної групи вищих гармонік та інтергармонік, основної резонансної частоти;



a

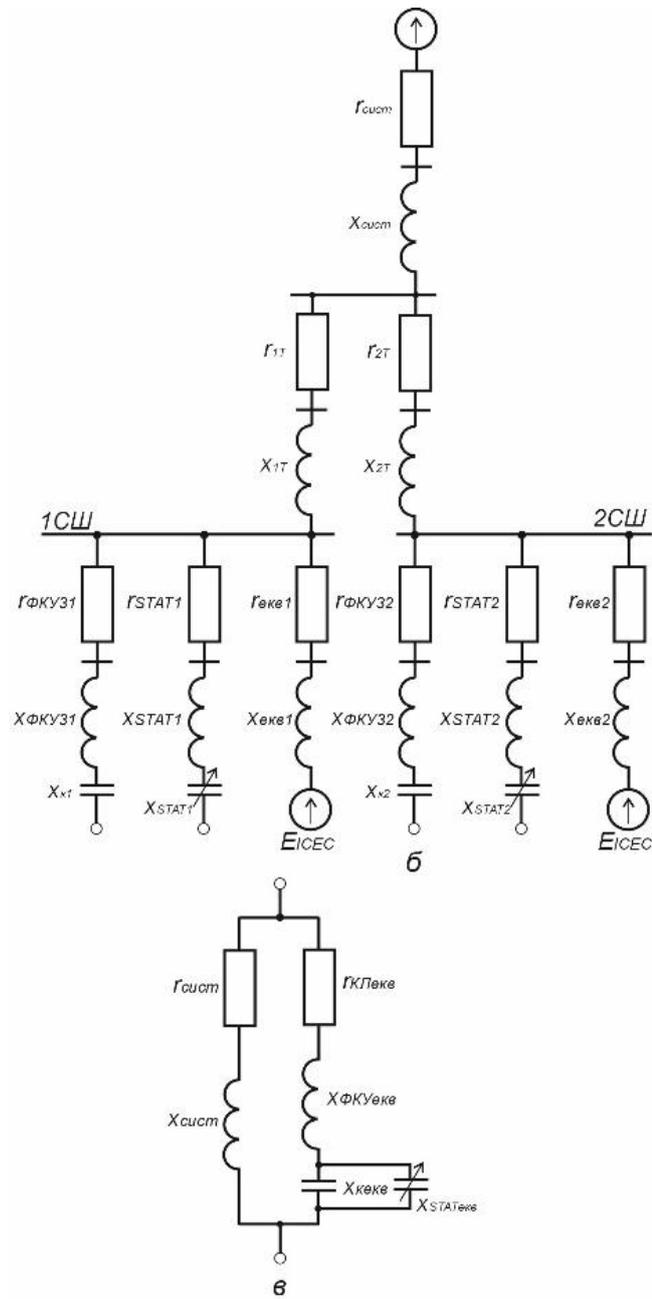


Рис. 3.7. Спрощена однолінійна схема СЕС (а) та схеми заміщення для моделювання резонансів (б-в)

Відповідно до розробленого алгоритму науково обґрунтована методика прогнозування резонансних явищ для забезпечення оптимальної компенсації реактивної потужності з метою покращення енергетичної ефективності роботи підстанцій [18]. Відмінність запропонованих рішень від існуючих методик розкривається можливістю виконання прогнозів резонансів на частотах ВГ та

інтергармонік. Це створює нові можливості реалізації ефективної системи компенсації реактивної потужності [71].

Розробка математичної моделі визначення зони резонансних частот. На схемі заміщення (рис. 3.7, б) показано три основних елементи, що можуть бути в резонансі: мережа живлення, FACTS пристрої компенсації реактивної потужності, перетворювач енергії (сонячні інвертори). Приєднання ємності призводить до нелінійного характеру частотної характеристики. Особливістю запропонованих моделей розрахунку АЧХ є можливість врахування різних варіацій системи електропостачання СЕС та одночасного забезпечення оптимальної компенсації реактивної потужності за допомогою фільтро-компенсуючих пристроїв (ФКП) та STATCOM. Прогнозовані зони виникнення резонансних явищ дають можливість реалізації енергетично ефективних режимів роботи станції у режимі обмеженої потужності енергосистеми.

Рівняння для визначення частотної характеристики LC - контуру мережі живлення, що покладено в основу моделі резонансних явищ, має вигляд [30] та враховує особливості прокладання кабельних ліній електропередач до інверторних груп:

$$\begin{aligned}
 Z_{1\nu} &= \frac{(r_{\text{сист}} + jx_{\text{сист}\nu})(r_{\text{КЛекв}} - jx_{\text{кв}})}{r_{\text{сист}} + r_{\text{КЛекв}} + j(x_{\text{сист}\nu} - x_{\text{кв}})} = \\
 &= \frac{r_{\text{сист}}r_{\text{КЛекв}}(r_{\text{сист}} + r_{\text{КЛекв}}) + x_{\text{сист}\nu}^2 r_{\text{КЛекв}} + x_{\text{кв}}^2 r_{\text{сист}}}{(r_{\text{сист}} + r_{\text{КЛекв}})^2 + (x_{\text{сист}\nu} - x_{\text{кв}})^2} + \\
 &+ j \frac{x_{\text{сист}\nu}x_{\text{кв}}(x_{\text{кв}} - x_{\text{сист}\nu}) + r_{\text{КЛекв}}^2 x_{\text{сист}} - r_{\text{сист}}^2 x_{\text{кв}}}{(r_{\text{сист}} + r_{\text{КЛекв}})^2 + (x_{\text{сист}\nu} - x_{\text{кв}})^2},
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

де $x_{\text{сист}\nu}$, - еквівалентний індуктивний опір мережі живлення на частоті ν -ої гармоніки; $x_{\text{кв}}$ - ємнісний опір БК для ν -ої гармоніки; $r_{\text{КЛекв}}$ - еквівалентний активний опір КЛ інверторів.

Для отримання цільової функції оптимізації компенсації реактивної потужності застосуємо дві складові втрат активної потужності - втрати від перетоку реактивної потужності на частоті основної гармоніки та додаткові

втрати при протіканні ВГ. При цьому мінімізується функція втрат активної потужності за умови виключення виникнення резонансних явищ. Функція при цьому має вигляд [30, 66]:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{ki})^2 \cdot R_i / U^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{v=2}^m ((Q_{vi} - Q_{ki})^2 \cdot R_{vi} / U_v^2) \rightarrow \min, \quad (3.12)$$

де Q_i, Q_{vi} - реактивна потужність ділянки електричної мережі на частоті 50 Гц та на частоті ВГ відповідно; Q_{ki} - сумарна потужність компенсуючих пристроїв на частоті 50 Гц та на частоті вищих гармонік; R_i, R_{vi} - опори елементів системи електропостачання на частоті 50 Гц та на частоті вищих гармонік відповідно; U_v - напруга v -ої гармоніки.

При стохастичному характері зміни несинусоїдальності напруги на шинах 35 кВ за інверторами у більшості випадків на практиці здійснити точну настройку ФКП на резонансну частоту складно. Внаслідок малої добротності ланцюгів ФКП, обумовленої значним активним опором кабельних ліній та реакторів, їх ефективність зменшується. Практика свідчить про доцільність використання одного ФКП, налаштованого на частоту гармоніки найменшого порядку амплітудного спектра напруги мережі.

Розрахунок параметрів ФКП з урахуванням активних опорів мережі приєднання інверторів:

$$Q_{\text{ov}} = \frac{3U_{\text{H6}}I_{\text{v6}}}{\sqrt{1,6 - a_p^2 k U}}. \quad (3.13)$$

Коефіцієнт a_p з урахуванням активних опорів ФКП:

$$a_p = \frac{v^2 \text{tg} \varphi_{\phi}}{\sqrt{1 + (v^2 - 1)^2 \text{tg}^2 \varphi_{\phi}}},$$

де $tg\varphi_{\phi} = X_{екв}/R_{КЛекв}$, $R_{КЛекв}$, $X_{екв}$ – сумарний активний та реактивний опори ланцюга ФКП.

Коефіцієнт струморозподілу між ФКП та мережею:

$$k_{vp} = k_{iv} = \frac{1 + v_p tg^2 \varphi_{ек}}{\sqrt{\left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_{ек}}\right)^2 + v_p tg^2 \varphi_{ек}}}, \quad (3.14)$$

де $X_{ек}$ та $R_{ек}$ – еквівалентні активний та реактивний опори живлячої мережі та навантаження на промисловій частоті з припущенням, що БК у цих мережах відсутні; v_p – частота налаштування ФКП.

Дані залежності вибору параметрів ФКП та компенсуючих пристроїв дозволяють виявити резонансні явища у електричних мережах СЕС з урахуванням активних опорів мереж постійного струму та 0,8-6-10-35 кВ та визначати зони виникнення резонансів на частотах канонічних гармонік та інтергармонік при зниженні потужності енергосистеми.

Визначення вірогідних резонансних частот. У вузлах промислового навантаження 35 кВ при підключенні нелінійного навантаження на шини 6-10-35 кВ частотна характеристика має явно виражений екстремум, обмежений добротністю мережі живлення (рис. 3.8). Практична цінність отриманої характеристики полягає в можливості визначити групу резонансних частот для конкретного варіанту схеми СЕС та потужності енергосистеми. Моделювання показало зони частот 300-3500 Гц. Основна резонансна гармоніка – 5, 7 та 11. Експериментальні дослідження підтверджують розрахункові значення, тому можна стверджувати, що отримані результати достовірні (рис.3.9-3.10).

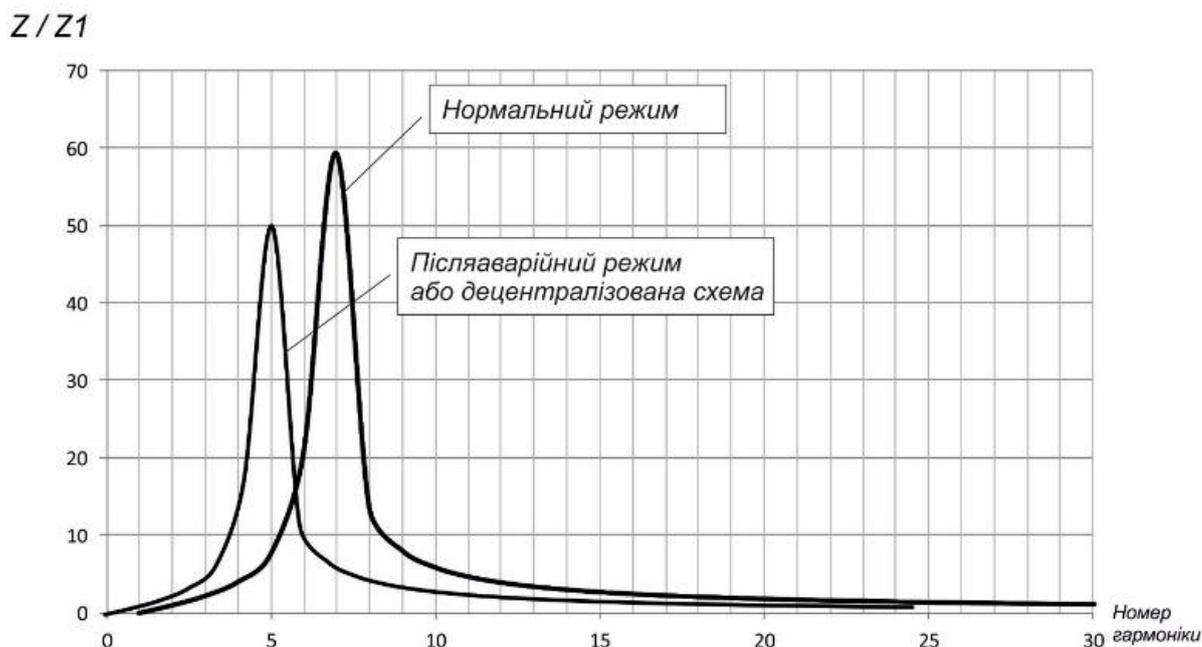


Рис. 3.8. АЧХ вузла навантаження 35 кВ при обмеженні потужності енергосистеми

Резонансні явища у вузлах навантаження 35 кВ підстанцій енергосистем з джерелами розподіленої генерації помітні на частотах гармонік та інтергармонік, особливо в періоди незначної сонячної активності або при зменшенні потужності КЗ системи. Робота підстанції енергосистеми у режимі обмеження потужності КЗ має найгірші показники несинусоїдальності та вимагає особливих підходів забезпечення оптимальної компенсації реактивної потужності. Такий значний рівень ВГ струму при приєднаній ємності STATCOM негативно позначається на характеристиках елементів системи електропостачання.

Результати експериментального моніторингу резонансних явищ. Комплексне дослідження показників якості наруги та резонансних явищ проводилось енергетиками Нікопольського заводу феросплавів та фахівцями компанії EKNIS ENGINEERING. Реєстрація параметрів електричної енергії проводилась на шинах 35 кВ підстанції, яка знаходиться у зоні впливу електромагнітних завад сонячних інверторів Покровської СЕС потужністю 240 МВт та Нікопольської СЕС потужністю 246 МВт. При приєднанні

максимальної кількості груп інверторів та вимкненій STATCOM (рис. 3.9, а) резонансних явищ не спостерігалось. Загальний коефіцієнт гармонійних спотворень при цьому не перевищував 1,8%.

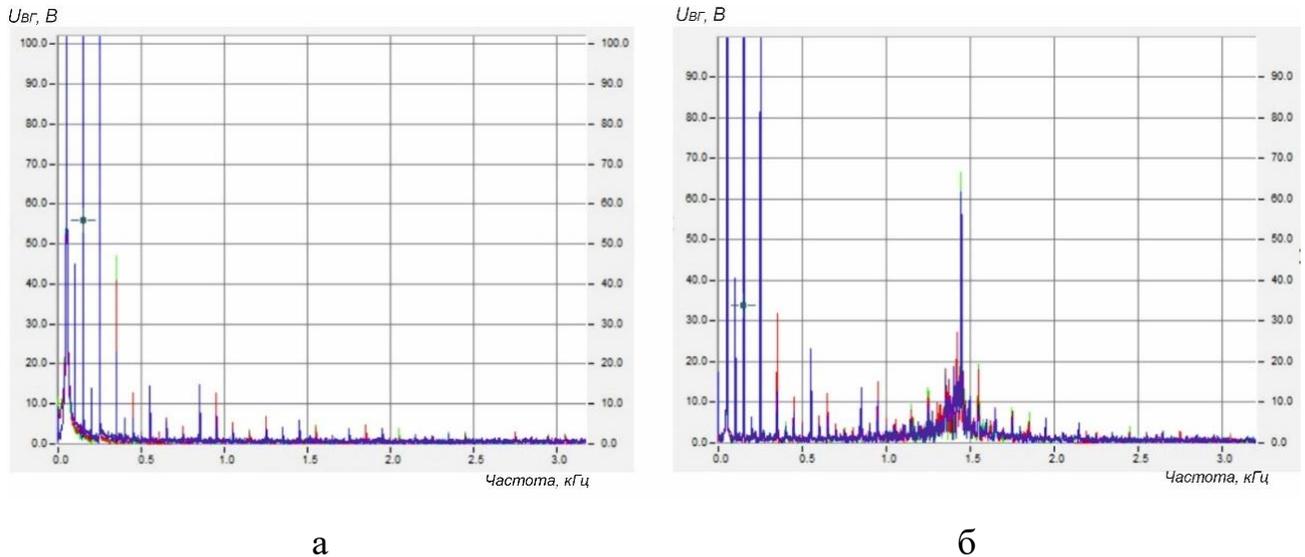


Рис. 3.9. Спектр частот при приєднанні максимальної кількості інверторів та вимкнених STATCOM (а) та при приєднаних STATCOM (б)

При приєднанні STATCOM та максимальній кількості кабельних ліній (КЛ) до інверторів у спектрі вищих гармонік напруги зафіксовані гармонічні складові частотою 1,447 кГц та амплітудою 70 В. При послідовному вимиканні ліній область резонансних частот зміщувалась у бік збільшення частоти і зменшення за амплітудою.

При виконанні реєстрації параметрів електричної енергії спостерігались резонанси при приєднанні 4-5 кабельних ліній приєднання сонячних інверторів. На рисунку 3 наведено миттєві залежності напруги 35 кВ до і після приєднання STATCOM при приєднанні усіх КЛ на секції. Резонанс виникає на частоті 1,45 кГц з амплітудою 11 кВ і збільшенням амплітудного значення напруги до 70 кВ. Після зміни налаштувань системи управління STATCOM було забезпечено режим роботи, при якому послідовне приєднання та від'єднання усіх КЛ виконувалося без виникнення резонансних явищ, які значно впливали на величину напруги 35 кВ (рис. 3.10).

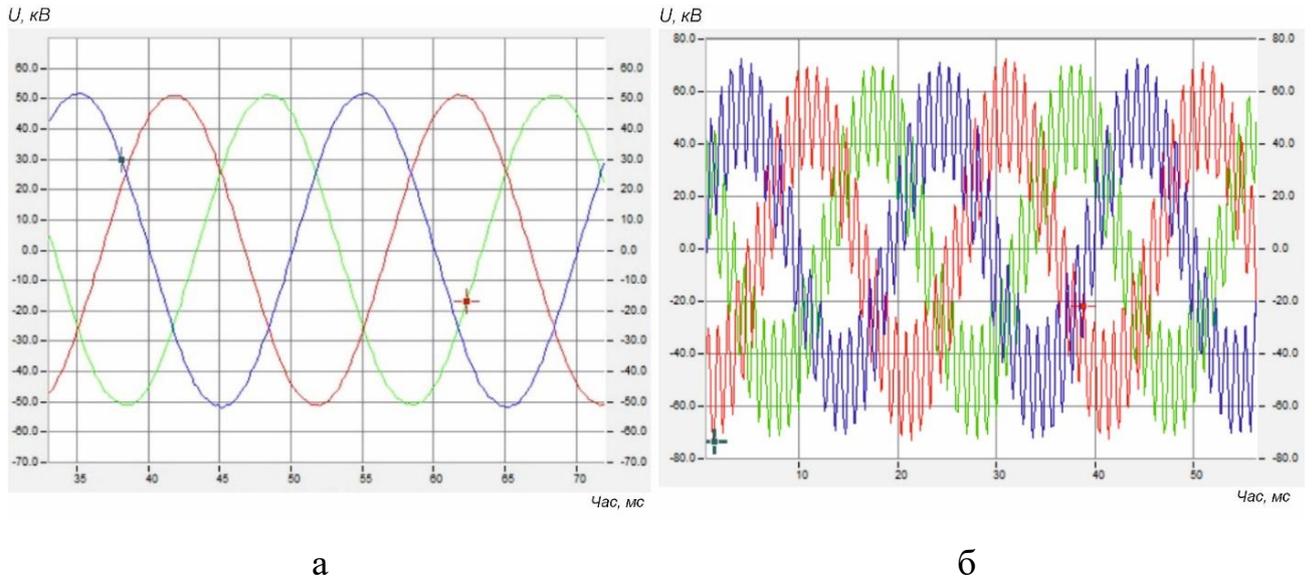


Рис. 3.10. Резонансні явища на стороні напруги 35 кВ при приєднанні КЛ та вимкненій STATCOM (а) та приєднаній STATCOM (б)

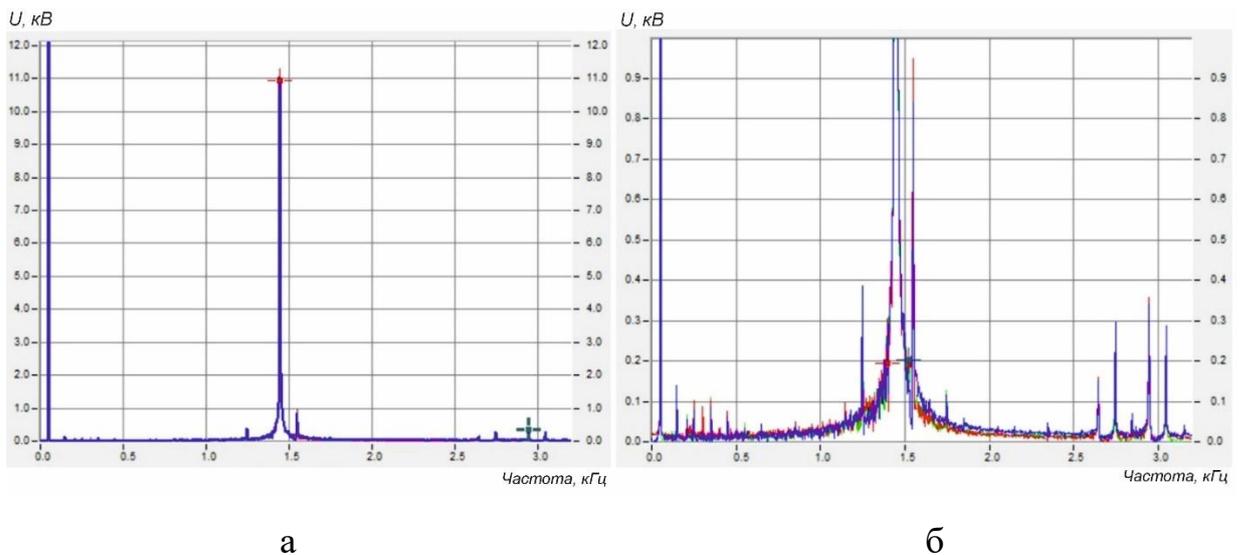
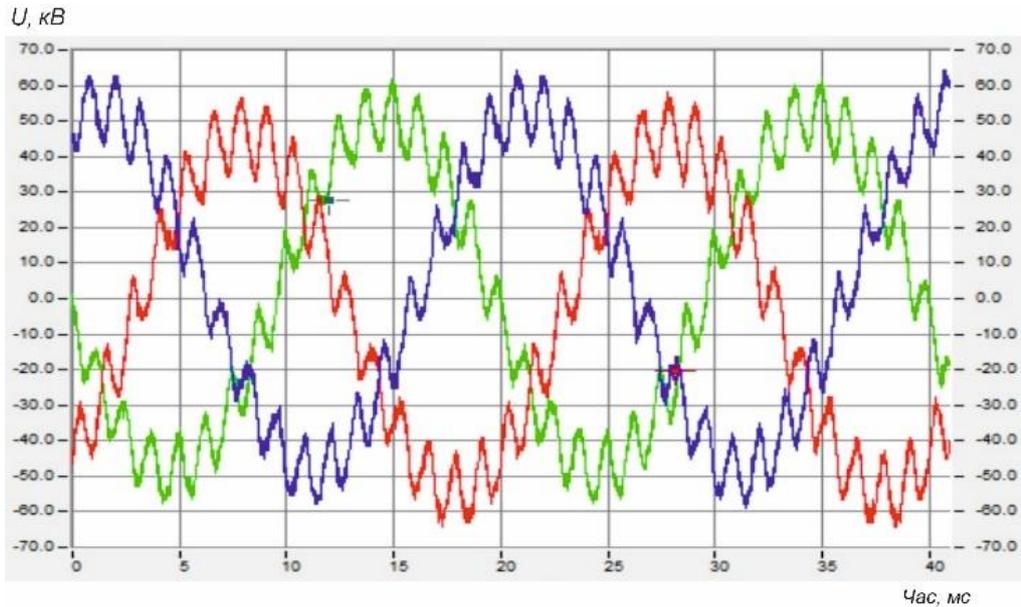


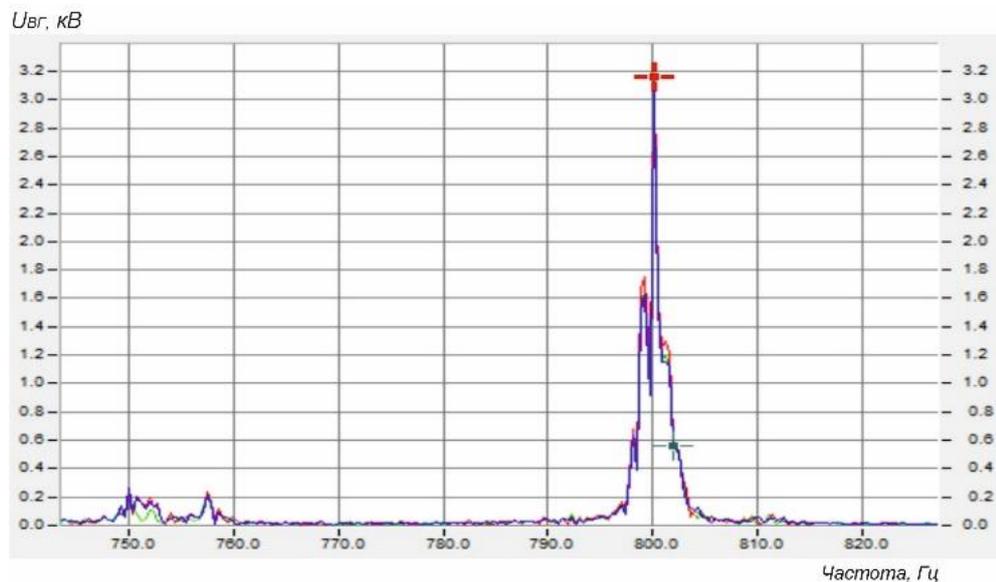
Рис. 3.11. АЧХ вузла навантаження 35 кВ до застосування захисту від резонансів (а) та після застосування (б)

Окремо досліджувався вплив потужності компенсуючих пристроїв на явище резонансу вузла навантаження 35 кВ. Значення реактивної потужності STATCOM-3 у ручному режимі регулювалось ступенево з кроком 0;-2000;-4000 квар. При цьому фіксувалася нормальна робота пристроїв. При встановленні потужності STATCOM-3 на рівні -6000 квар (номінальна потужність

STATCOM від 0 до $\pm 11\ 000$ квар) був зафіксований значний резонанс (рис. 3.12). STATCOM було відключено системою аварійного вимикання і було зафіксовано осцилограми початку резонансу. Резонанс виник на частоті 800 Гц, амплітуда спотворень на цій частоті становила 3,16 кВ.



а



б

Рис. 3.12. Осцилограма лінійних напруг (а) та АЧХ вузла навантаження при приєднанні STATCOM (б)

3.5. Висновки по розділу 3

1. Представлене розкладання складових повної потужності дозволяє аналізувати енергетичні процеси за будь-яких поєднань несиметричних і несинусоїдальних режимів мережі. Крім того, дане трактування енергетичних параметрів режиму дозволяє оцінити енергетичну ефективність особливих режимів за умови обмеження потужності енергосистеми. Особливо відчутно підвищення енергетичних характеристик спостерігається за умови виключення джерела вищих гармонік з однієї або двох фаз, оскільки зникають складові потужностей викривлення з відповідних фаз.

2. Для якісної оцінки симетруючого ефекту особливих режимів СРН розроблено математичну модель визначення показників несиметрії напруги. Визначною особливістю даної моделі є облік відношення регульованого навантаження до симетричного трифазного при розрахунку несиметрії. При аналізі можливих несиметричних режимів на запропонованій моделі визначені відповідні співвідношення потужності СРН та електричними навантаженнями трансформатора, за умови неперевищення коефіцієнтів несиметрії напруги допустимих ДСТУ рівнів, а також співвідношення навантажень, при яких симетрування необхідне у випадку обмеження потужності енергосистеми. Моделювання несиметрії при режимних обмеженнях потужності КЗ енергосистеми обґрунтовано, що регульовальні залежності несиметричних режимів отримані для екстремальних (максимальних) значень коефіцієнтів несиметрії, що пояснюється використанням максимальних потужностей при переведенні СРН у неповнофазні режими. При оптимальному керуванні режимами роботи СРН у реальному часі досягаються мінімальні значення K_{U2} .

3. Результати моделювання резонансних явищ в електричних мережах з розподіленою генерацією від сонячних електростанцій дозволили зробити висновки про особливості виникнення резонансів напруги в острівних режимах роботи та в режимах обмеженої потужності. З урахуванням спеціальних співвідношень параметрів вузла комплексного навантаження феросплавного виробництва та електричної мережі, основних і резервних кіл

електропостачання споживачів критичної інфраструктури отримано залежності, які дають змогу визначити зони резонансних частот при різних початкових умовах. При цьому виявлено нові закономірності впливу параметрів системи на умови виникнення резонансів.

4. Результати експериментального моніторингу показників якості та резонансних явищ на шинах 35 кВ приєднання СЕС дозволили виявити закономірності зміни резонансних частот при змінних конфігураціях електричних мереж (кількість трансформаторних підстанцій та довжини кабельних і повітряних ліній) від значення потужності енергосистеми. Це обґрунтовує необхідність врахування можливості виникнення резонансів при певних комбінаціях режимів і уточнення методів вибору фільтрокомпенсуючих пристроїв і захисту компенсаційних пристроїв к конденсаторами.

5. Моделювання зон з резонансними частотами є важливою складовою забезпечення стійкості вузлів промислового навантаження при обмеженій потужності електроенергетичної системи. Тому в математичній моделі враховано низку технічних показників електричних мереж, параметрів сонячних інверторів та статичних компенсаторів реактивної потужності. Основними відмінностями даної моделі від існуючих є врахування кількості інверторів у схемі підключення та можливість обмеження потужності електроенергетичної системи при переході на острівний режим частини електроенергетичної системи України.

6. Досягнення мети перевірки результатів експериментального моніторингу умов виникнення резонансних явищ у схемі сонячної електростанції з інтелектуальними пристроями компенсації реактивної потужності забезпечується даними математичного моделювання зон резонансних частот з різними схемами підключення інверторних груп.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Особливості компенсації реактивної потужності в промислових системах електропостачання

Аналіз схем електричних мереж шахт напругою 6 (10) кВ показує, що кабельні лінії, що відходять від ЦПП, можна розділити на три типи:

- радіальні;
- магістральні;
- магістрально-радіальні.

Реалізувати принцип ступінчастого регулювання РП поверхневих систем електропостачання (ПСЕС) напругою 6 (10) кВ можливо завдяки використанню нерегульованих конденсаторних автоматично керованих установок які мають два ступені потужності:

- номінальну (при підключенні до мережі);
- нульову (при відключенні від мережі).

Використання регульованих двох або триступінчастих рудничних конденсаторних установок в підземних мережах 6 (10) кВ недоцільно через їх не універсальність, тому що їх загальна потужність та співвідношення потужностей ступенів регулювання вибираються при проектуванні та прив'язані до конкретного об'єкта та його технологічного режиму [12-13]. Це ускладнює подальше використання установок при їх підключенні в інші точки підземної мережі у разі зміни її конфігурації через зміну плану гірничих виробок по мірі відпрацювання шахтного поля. Крім того, такі установки мають великі габаритні розміри та масу, що ускладнює їхнє переміщення по гірничих виробках та розміщення на новому місці.

Раціональні схеми приєднання конденсаторної батареї компенсуючих установок до шахтної електричної мережі наведено на рис. 4.1.

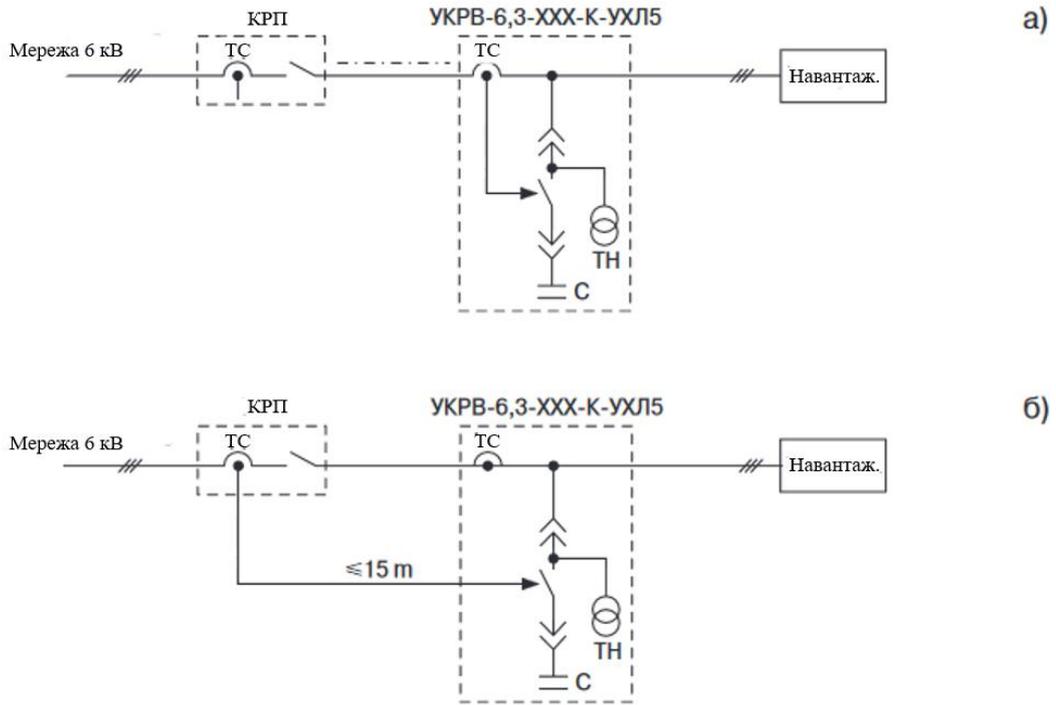


Рис. 4.1. Схема приєднання УКРВ-6,3-XXX-К-УХЛ5:

а) у розріз кабельної лінії що живить навантаження; б) до шаф КРП (вхідного та вихідного приєднань)

Змодельований графік електричних навантажень на 30-ти хвилинному інтервалі осереднення (рис. 4.2.) дозволяє обрати раціональну потужність компенсуючої установки (або кількість ступеней регулювання).

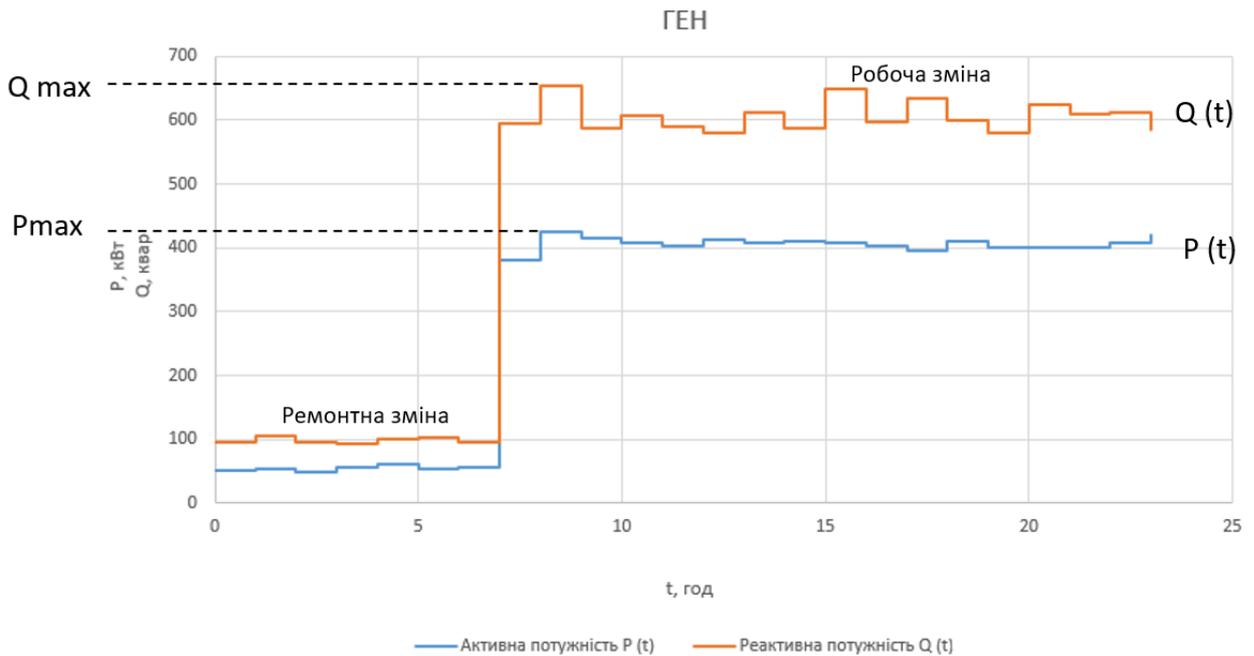


Рис. 4.2. Графік електричних навантажень підземної ділянки шахти

Для визначення спроможності засобів компенсації реактивної потужності забезпечити високі значення коефіцієнта потужності був виконаний моніторинг показників електричних режимів та показників якості напруги з почерговим приєднанням БСК та ФКУ до відповідних секцій шин 6 кВ з використанням трифазного реєстратора якості електричної енергії Fluke 1738 (рис. 4.3-4.5).

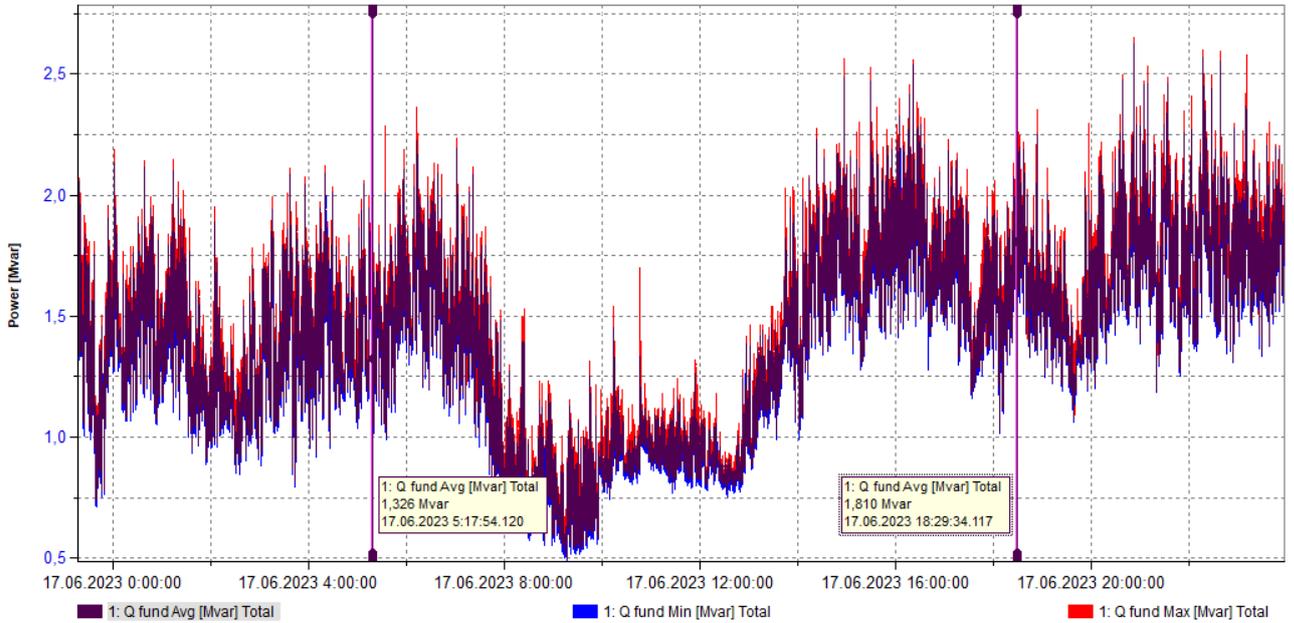


Рис. 4.3. Добовий графік реактивних навантажень шахти

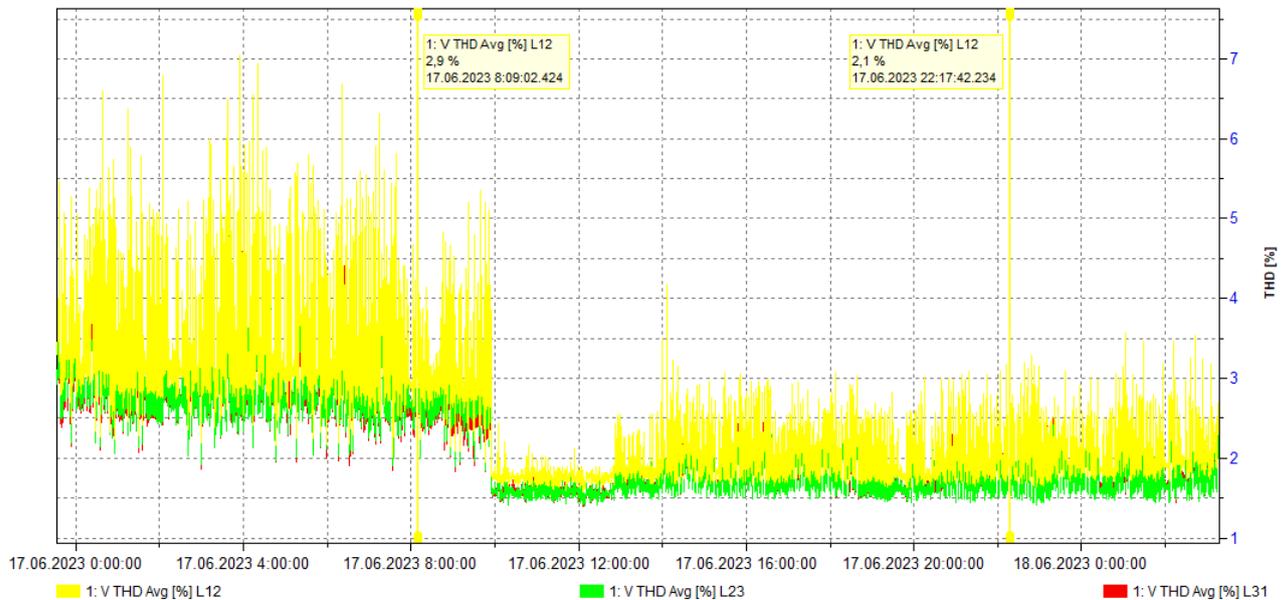


Рис. 4.4. Добовий графік $THD_{(U)}$ шахти

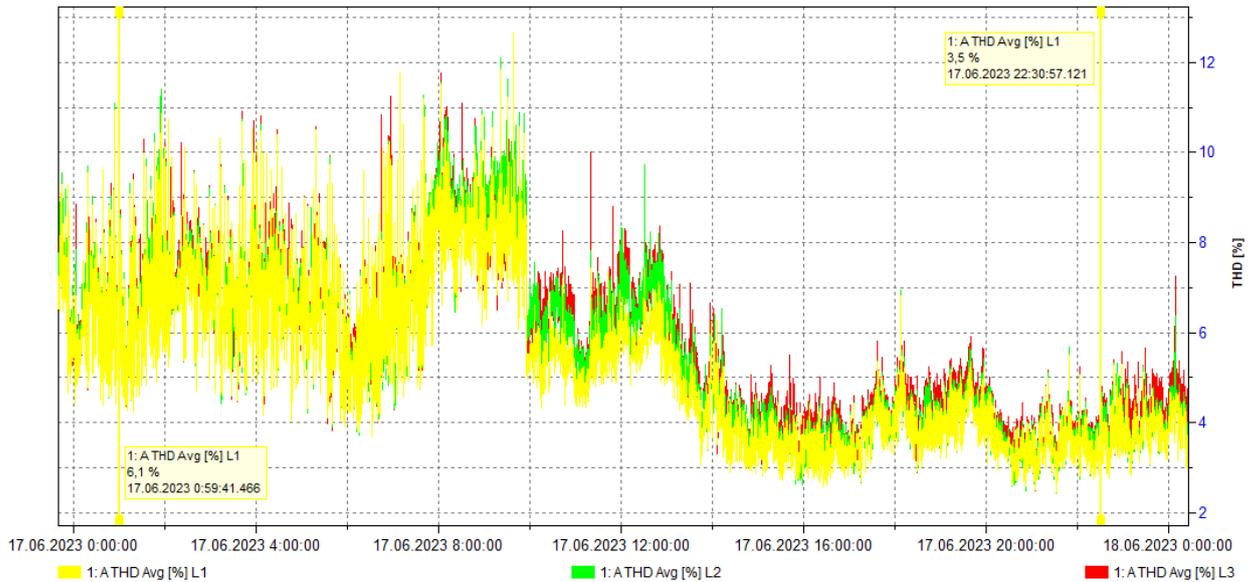


Рис. 4.5. Добовий графік $THD_{(I)}$ шахти

Система електропостачання промислового підприємства може бути представлена у радіальній формі (рис. 4.6). При цьому коло 1 характеризує приєднання конденсаторної батареї 6...10 кВ; коло 2 – електричні навантаження та компенсуючі пристрої 0,4 кВ.

При протіканні струмів ВГ у електричних мережах варіюється значення активного опору. Для силових трансформаторів та реакторів це враховується коефіцієнтом $k_{RV} = 1 + 0,1v^{1,2}$, значення якого залежить від частоти вищих гармонік (рис. 4.7).

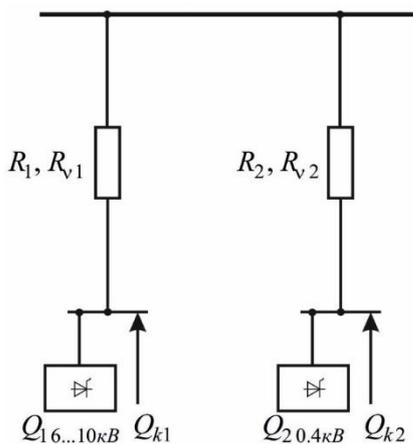


Рис. 4.6.

Розподільчий пристрій з
ВП

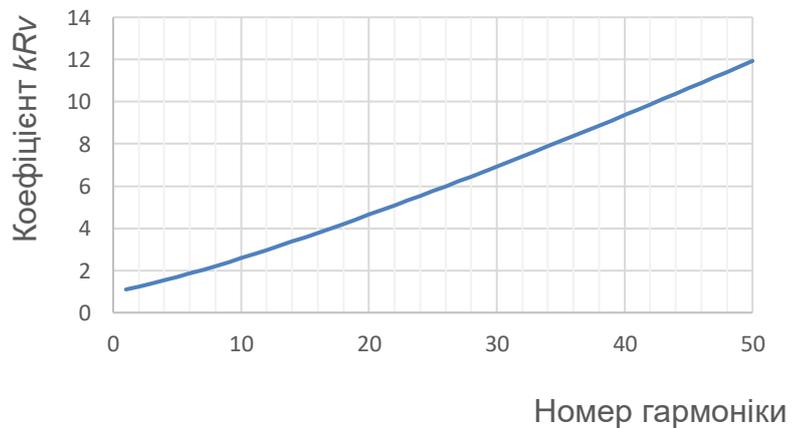


Рис. 4.7. Залежність коефіцієнта k_{RV} від
порядкового номера ВГ для силових
трансформаторів та реакторів

Моделювання режиму компенсації реактивної потужності в умовах діючих промислових підприємств виконано у середовищі MATLAB/Simulink з урахуванням реальних графіків реактивних навантажень електротехнологічних установок та параметрів енергосистеми.

Початкові умови для моделювання режимів STATCOM:

Номинальна напруга: 150 кВ;

Потужність КЗ 800-2000 МВА;

Ємність КУ 200 Мвар;

Модель STATCOM використовується для розрахунку трифазних енергетичних систем, що містять синхронні генератори, двигуни та динамічні навантаження, для визначення динамічної стійкості та впливу STATCOM на електромеханічні коливання в системі, а також на ємність лінії передачі. Такий блок містить спрощені моделі його складових систем, які представлені доволі простими передаточними функціями та елементами затримки, які дають коректний результат на основній частоті мережі. STATCOM реактивної потужності може працювати у режимах регулювання напруги та режимах управління реактивною потужністю [41].

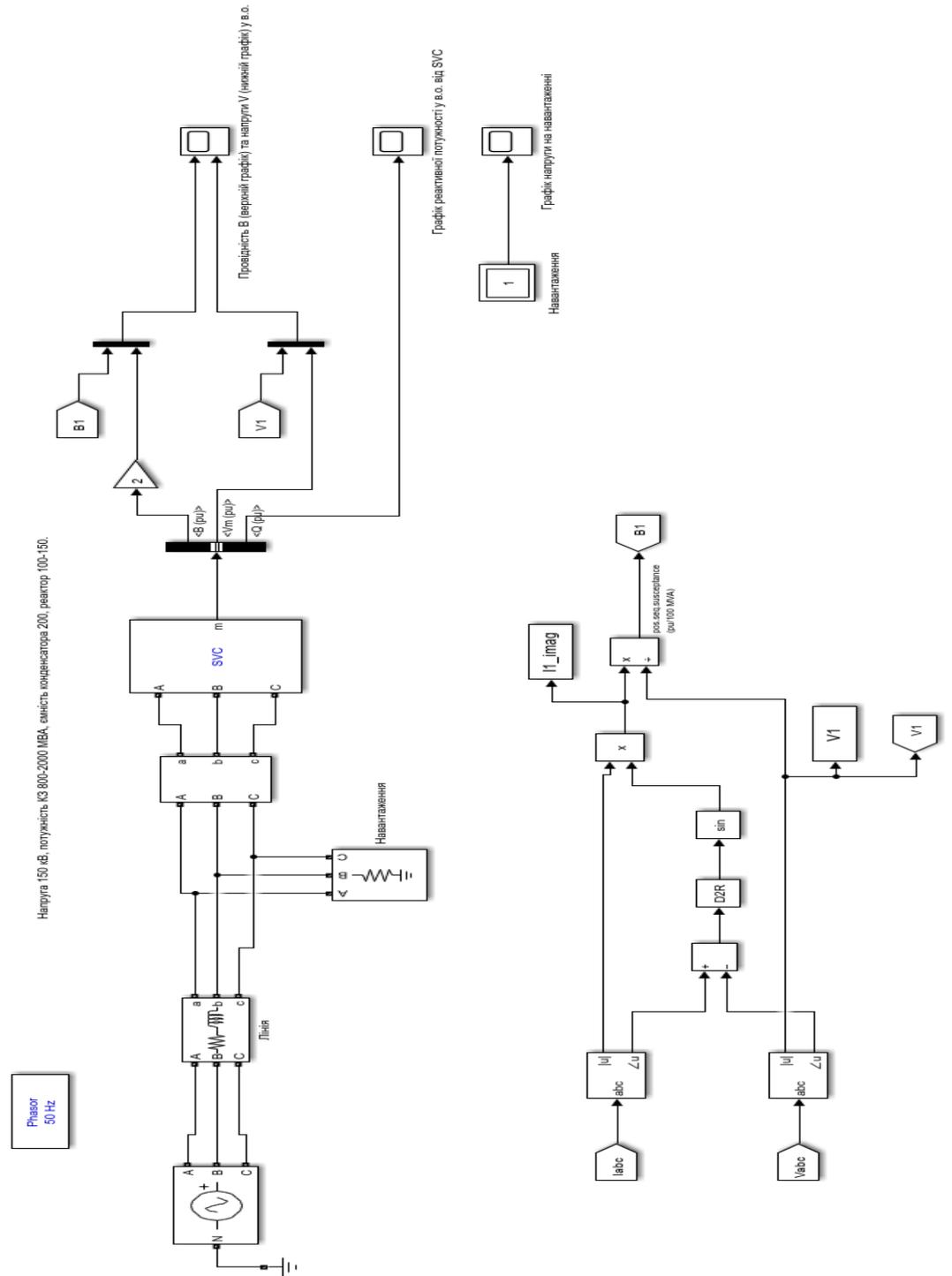


Рис. 4.8. Модель STATCOM для промислового навантаження та умов обмеженої потужності енергосистеми

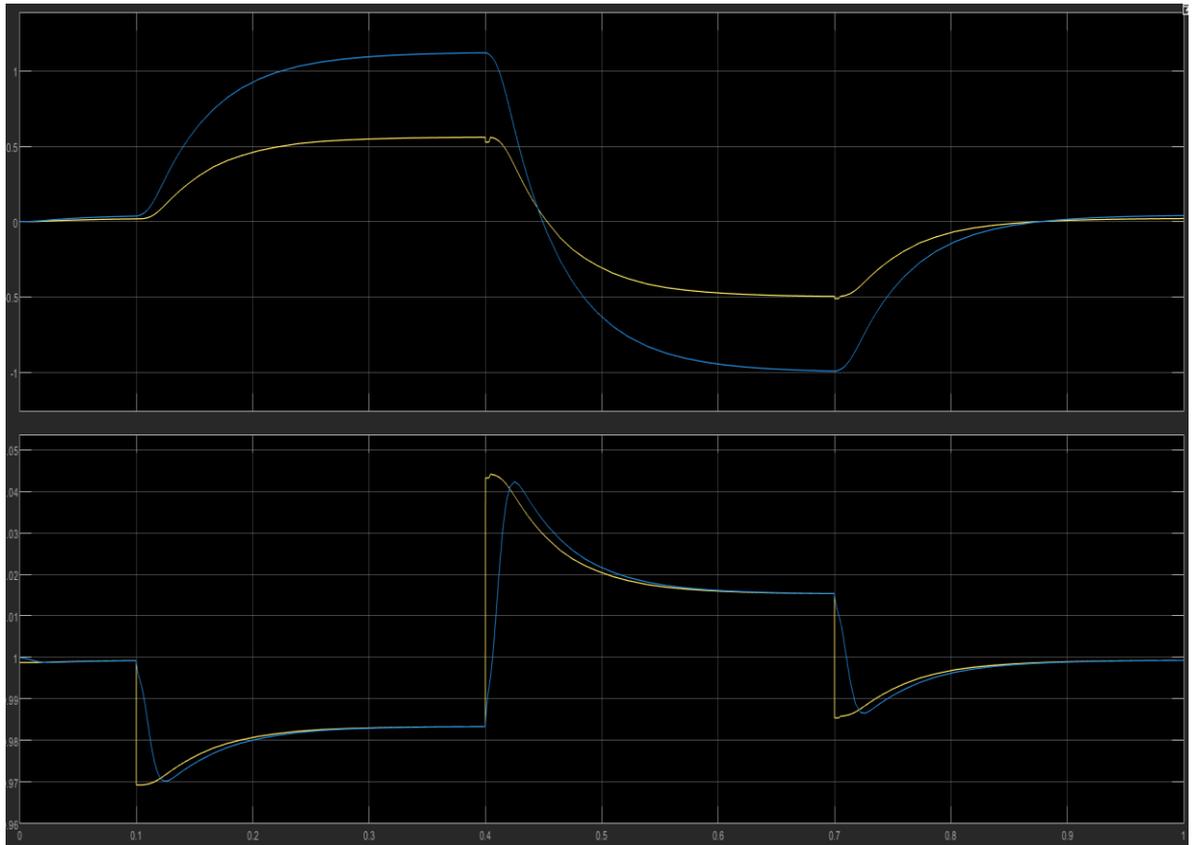


Рис. 4.9. Режими компенсації реактивної потужності STATCOM

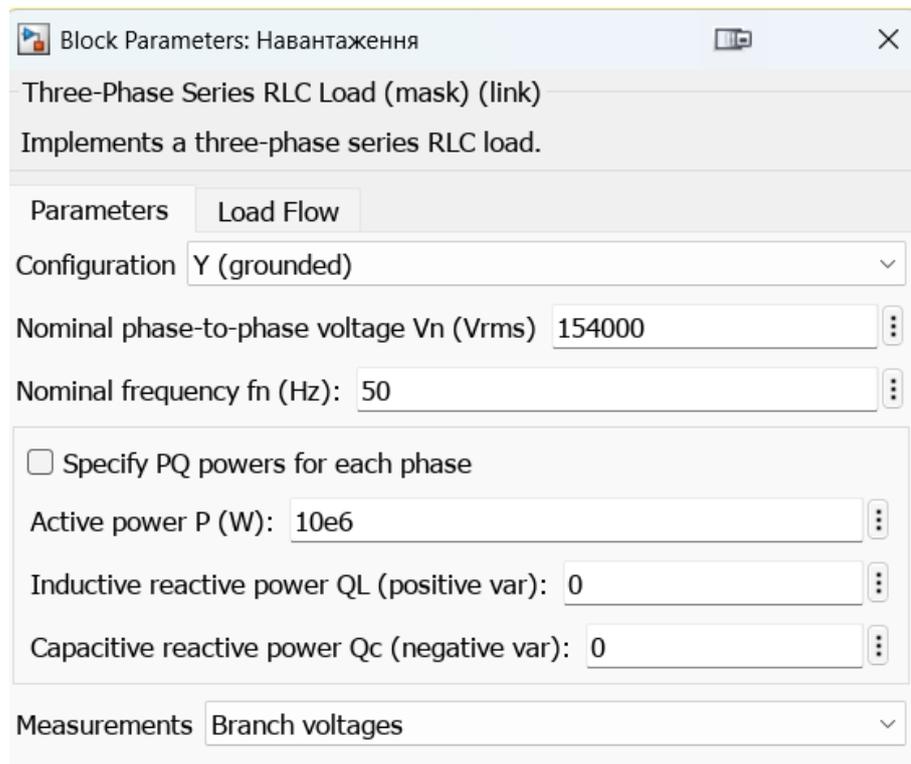


Рис. 4.10. Параметри трифазного навантаження

Можливості даної моделі дозволяють оцінювати різноманітні комбінації промислового навантаження та параметрів централізованої енергосистеми, при цьому можливо відслідковувати режими порушення динамічної стійкості вузла навантаження.

4.2. Розробка інженерних методів визначення показників якості напруги при обмеженій потужності енергосистеми

Енергетика України сьогодні працює в умовах надскладних викликів, пов'язаних з військовою агресією росії та руйнації значної частки енергогенеруючих потужностей та системоутворюючих підстанцій. Важкі виклики сьогодення до української енергосистеми Урядом – це технічні та експлуатаційні обмеження генерації, надійність та якість електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, максимальне впровадження ВДЕ, розвиток децентралізованих систем генерації електричної та теплової енергії для промисловості та міст. Ринок електроенергії України зараз працює у важких реаліях з необхідністю прогнозування електроспоживання, системою почергових вимикань електроенергії та визначення пріоритетів підтримки воєнно-промислового комплексу для забезпечення обороноздатності та економічної безпеки [72, 74]. Зв'язок з європейською системою ENTSO-E дозволяє Об'єднаній енергетичній системі забезпечити стійкість режиму та надійності електропостачання [30].

Реальні електричні режими СЕП підприємств визначаються високим рівнем втрат електроенергії при трансфері (до 20 %), пов'язаних з переходом до схем післяаварійного транзиту та процесами перетворення електроенергії. У світовій історії це перший унікальний випадок, коли потужна індустріально-розвинена країна проходить воєнний період своєї історії з щоденними атаками на енергетичні об'єкти та успішно протистоїть технічним, економічним та екологічним загрозам. Високий рівень втрат в електричних мережах України пов'язаний з руйнуванням генеруючих потужностей та магістральних ліній електропередачі, недостатнім використанням інтелектуальних пристроїв

FACTS і регулювання напруги, невирішеністю проблем якості електричної енергії, особливо в умовах обмеженої потужності енергосистеми [30]. Зниження значень показників якості напруги призводить до погіршення енергетичної ефективності роботи електричних мереж за комплексом показників (відхилення, несиметрія, несинусоїдальність напруги). Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності СЕП. При роботі пошкодженої енергосистеми або переходу до децентралізованого принципу побудови електричних мереж, проблема якості електроенергії набуває свого важливого значення, особливо для віддалених від джерел централізованого електропостачання районів [79].

Стратегічне значення для енергетичної безпеки й обороноздатності України промислових підприємств різних форм власності доводить необхідність нових наукових досліджень з енергетичної ефективності та якості електропостачання підприємств, зважаючи на нестаціонарні умови споживання електроенергії, обмеженого значення потужності короткого замикання та режимних особливостей потужних промислових електроустановок [80].

Нормалізація показників якості напруги (ПЯН) до значень стандарту ДСТУ EN 50160:2023 – одна з головних проблем електромагнітної сумісності. Система ПЯН формує кількісні характеристики повільних (відхилень) та швидких (коливань) змін діючого значення напруги, симетрії, частотного складу. Діючий в Україні розроблений Європейський комітет нормалізації в області електротехніки (CENELEC) [8]. Критичний аналіз основним підходам розрахунку та оцінки ПКЯ дозволяє визначити додаткові можливості покращення якості напруги.

Відхилення напруги. Головною причиною виникнення відхилень (змін) напруги в СЕП є зміна навантажень, що виникає при:

- змінах режиму роботи споживачів;
- додатковою потужністю споживачів, що приєднуються;
- оперативними перемикаваннями;

- аварійними перехідними процесами.

Значення відхилення напруги у будь-якій точці мережі є функцією багатьох змінних:

$$\delta U_t = f(U_s^1, P, Q, Z, Y, \sum \delta U^d), \quad (4.1)$$

де P з Q – активна і реактивна потужність кола електричної мережі; U_s^1 – напруга мережі живлення (наприклад, на шинах підстанції); Z і Y - опір і провідність елементів електричної мережі; $\sum \delta U^d$ – сума «добавок», тобто додаткових значень напруги (РПН, ПБВ, локальні регулятори тощо).

Несиметричні режими напруги мережі живлення можуть бути викликані несиметрією як джерела, так і споживачів електроенергії. У даному дослідженні розглядається складова несиметрії, викликана нерівномірним розподілом навантаження по фазах, та вводимо припущення, що напруга джерела живлення симетрична по фазам.

Несиметрія напруг у розподільчій мережі промислового підприємства пов'язана зі зростанням числа і потужності несиметричних навантажень - це такі приймачі симетричне виконання яких або неможливо або невиправдано з техніко-економічних міркувань. До таких установок відносяться зварювальні агрегати, дугові та індукційні печі, деякі типи печей опору, освітлення. Підключення таких навантажень до трифазної мережі обмеженої потужності обумовлює появу як тривалих так і короткочасних несиметричних режимів струмів і напруг.

Несиметрія напруг негативно впливає на роботу всіх елементів системи електропостачання, знижує термін служби ізоляції, призводить до збільшення втрат потужності, перегріву обмоток машин, що обертаються, знижує надійність основного і допоміжного електрообладнання [30].

Для зниження несиметрії було розроблено велику кількість спеціальних симетруючих пристроїв. Необхідно відзначити, що в загальному випадку

симетрування несиметричних режимів можна здійснювати як за допомогою реактивних, так і активних елементів, проте всі існуючі симетруючі пристрої виконані на реактивних елементах, оскільки в них відсутні додаткові втрати активної потужності. З економічних міркувань застосування симетруючих пристроїв на активних елементах доцільно лише тоді, коли корекція несиметричних режимів здійснюється за допомогою самих навантажувальних елементів.

Процес коливання струмів в окремих фазах мережі 380 В промислового підприємства обумовлений особливостями режимів цехових електроприймачів і має випадковий характер. Зміна коефіцієнтів несиметрії у часі також відбувається випадковим чином, тому прогнозувати значення показників несиметрії при зниженні потужності енергосистеми можна лише наближено з похибкою, прийнятною для інженерних розрахунків.

Несиметрія напруги має максимальні значення в точці приєднання несиметричного навантаження. Отже, віддаляючи «чутливі» приймачі від точки підключення несиметричного навантаження, можна знизити їх затискачі рівень несиметрії напруг. Цього можна досягти зміною схеми електропостачання. Наприклад, в електричній мережі можна використовувати роздільне підключення несиметричного та симетричного навантажень за допомогою трансформатора або реактора з розщепленими обмотками. Можна також використовувати індивідуальне живлення несиметричного навантаження від енергосистеми. Дані методи іноді використовуються при проектуванні систем електропостачання та подібний підхід добре себе зарекомендував при розробці децентралізованих електричних систем з автономними джерелами живлення (дизель-генераторні установки, сонячні електростанції, установки когенерації).

Можливість симетрування напруги шляхом збільшення потужності КЗ підтверджується відомою формулою наближеної оцінки несиметрії напруги у трифазній системі у вигляді відношення потужності несиметричного навантаження до потужності короткого замикання в місці її підключення, % [30]:

$$K_U \approx \frac{S_{ном1\phi}}{S_{КЗ}}, \quad (4.2)$$

де $S_{ном1\phi}$ – потужність еквівалентного однофазного навантаження; $S_{КЗ}$ – потужність КЗ в точці приєднання однофазного навантаження.

$$S_{КЗ} = \frac{U_{ном}^2}{z_c},$$

де $U_{ном}$ – номінальна лінійна напруга; z_c – опір системи живлення.

Зміна конфігурації схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання промислових об'єктів внаслідок ліквідації аварійних режимів призводить до значних змін рівнів потужності КЗ. У випадку переходу до схем аварійного живлення від автономних джерел енергії потужність КЗ зменшується на декілька порядків. Моделювання показників несиметрії напруги при цьому здійснюється при врахування варіативного набору випадкових факторів, що впливають на еквівалентний опір електричної мережі (рис. 4.11).

Еквівалентна схема заміщення для точки 1 представлена на рис 4.12. Тут коло $(x_c^* - r_c^*)$ є еквівалентним контуром мережі до точки 1, а коло $(x_{екв}^* - r_{екв}^*)$ – активні та індуктивні опори еквівалентного навантаження та з'єднувальних проводів до точки підключення до розподільного шинопроводу. Подібні схеми складаються для усіх характерних точок приєднання несиметричного навантаження по промислового підприємству.

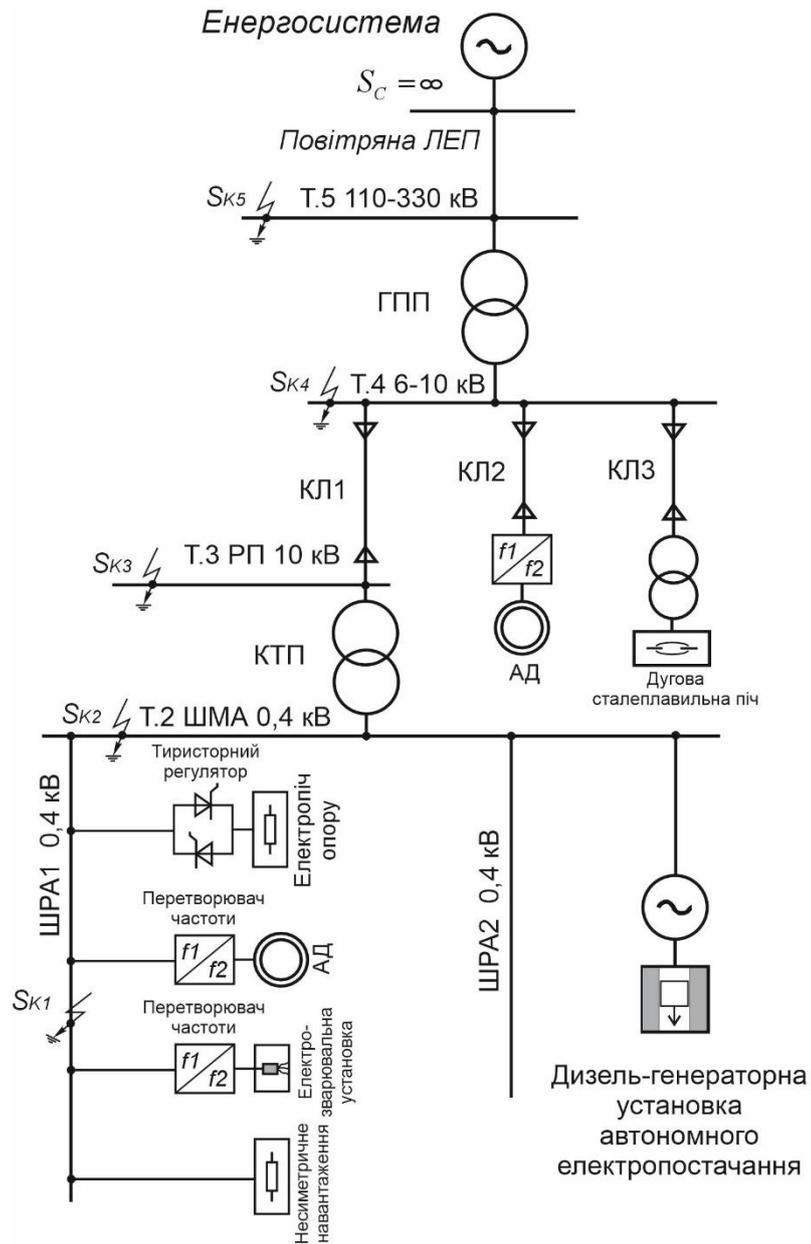


Рис. 4.11. Однолінійна схема електропостачання промислового підприємства з нелінійними та несиметричними навантаженнями

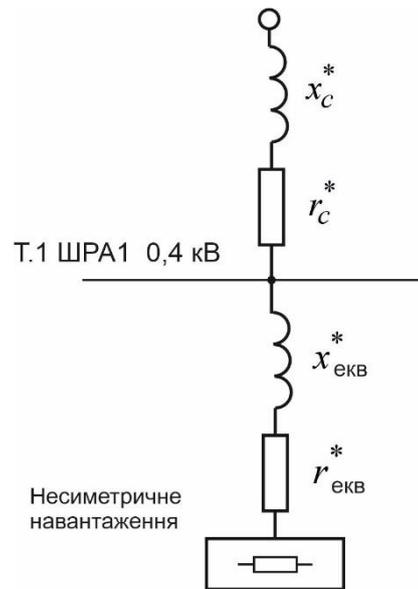


Рис. 4.12. Еквівалентна схема заміщення для вузла приєднання несиметричного навантаження

Застосувавши описаний підхід були отримані залежності коефіцієнта несиметрії по зворотній послідовності від параметра режиму енергосистеми (відносного значення потужності короткого замикання) для різних класів напруги (рис. 4.13). Цінність даних залежностей полягає у можливості їх застосування у інженерній практиці без громіздких розрахунків.

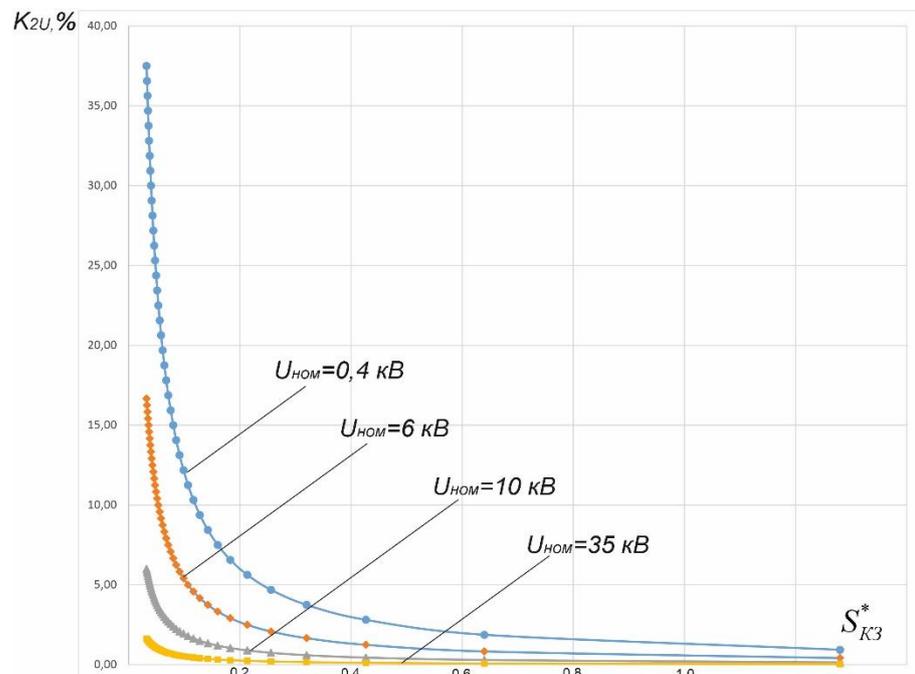


Рис. 4.13. Залежності коефіцієнта несиметрії K_{2U} від потужності КЗ при значенні несиметричного навантаження 1% від потужності системи

Аналізуючи отримані графічні залежності можна зробити висновок, що у системах обмеженої потужності значно погіршується несиметрія для електрично віддалених від джерела живлення мережах 0,4 та 6 кВ.

Коливання напруги негативно позначаються на зоровому сприйнятті предметів, деталей, графічних зображень і, зрештою, на продуктивності праці та зір працівників [75].

Фізіологічну основу сприйняття зорового образу становить, як відомо, робота зорового аналізатора, однією з основних частин якого є рецептор. Його основна функція полягає у перетворенні енергії діючого подразника на нервовий процес. Подразником зорового аналізатора служить світлова енергія. А оскільки процеси, що відбуваються в зоровому аналізаторі, як і всі процеси в природі біологічної системи, наприклад процес зорового сприйняття, мають енергетичний зміст, то зоровий аналізатор має певні енергетичні характеристики.

За наявності *вищих гармонік (ВГ)* у СЕП з'являються додаткові втрати в електричних обертових машинах, трансформаторах, повітряних та кабельних ЛЕП, утруднюється або стає неможливою компенсація реактивної потужності за допомогою конденсаторних установок, скорочується термін служби ізоляції електричних машин та апаратів, погіршується робота пристроїв захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку, виникають похибки у роботі лічильників [30].

Оцінка коливань та несинусоїдальності напруги спрощеними інженерними методами широко використовується в умовах діючих підприємств та сьогодні має надзвичайно актуальне значення для забезпечення енергоефективного та надійного електропостачання. СЕП промислового підприємства є складною й динамічною, постійні часу основних елементів якої досить високі, тому вони можуть розглядатися як елементи, параметри яких в частотному спектрі огинаючої напруги (0,1-15 Гц) практично незмінні й їх можна вважати лінійними [30]. При розробці схем заміщення силових елементів (трансформаторів, реакторів, більшості навантажень) модульне

значення передаточної функції запропоновано виразити коефіцієнтом передачі у загальному вигляді [30]:

$$K = \frac{x_c}{x_c + x_e}, \quad (4.3)$$

де x_c – індуктивний опір СЕП до точки розрахунку; x_e – індуктивний опір силового елемента. Ці значення розраховуються за заступною схемою СЕП, складеною для розрахунку струмів КЗ. Залежно від розрахункових значень може бути визначене значення сумарного коефіцієнта гармонійних викривлень K_{THDU} при розрахунках несинусоїдальних режимів, δU_t при розрахунку коливання або дози флікера P_{st} або P_{lt} . Похибка розрахунку δU_t і K_{THDU} у вузлах СЕП не перевищує 3 %; для P_{st} і P_{lt} виявляється дещо більшою (до 4-5 %).

На рис. 4.14 і рис. 4.15 представлені схеми електропостачання промислового підприємства різних варіантів і їх схеми заміщення.

У табл. 4.1 і табл. 4.2 представлені значення коефіцієнтів передачі K для типових двообмоткових трансформаторів типу ТРДН з $U_{ном}=150$ кВ та зі здвоєними реакторами. Для усіх варіантів розрахунку вихідними даними є значення нелінійного навантаження на шинах джерела несинусоїдальності або коливань напруги.

Сумарний коефіцієнт гармонійних викривлень за напругою на шинах приєднання перетворювачів частоти визначається за залежністю:

$$K_{THDU}^{(ВП)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{ном}}, \quad (4.4)$$

де $U_{(n)i}$ – напруга i -ої вищої гармоніки. Згідно ДСТУ EN50160:2023, враховується спектр до сорокової вищої гармоніки.

У таблицях наведені значення коефіцієнтів передачі (в.о.) $K_{ВП-СП}$ і $K_{ВП-ВН}$ для двообмоткових трансформаторів (ТРДН) $U_{ВН} = 150$ кВ і $K_{ВП-СТ}$, $K_{ВП-ВН}$, і $K_{ВП-НН2}$ при використанні здвоєних реакторів з $U_{НОМ} = 6 - 10$ кВ .

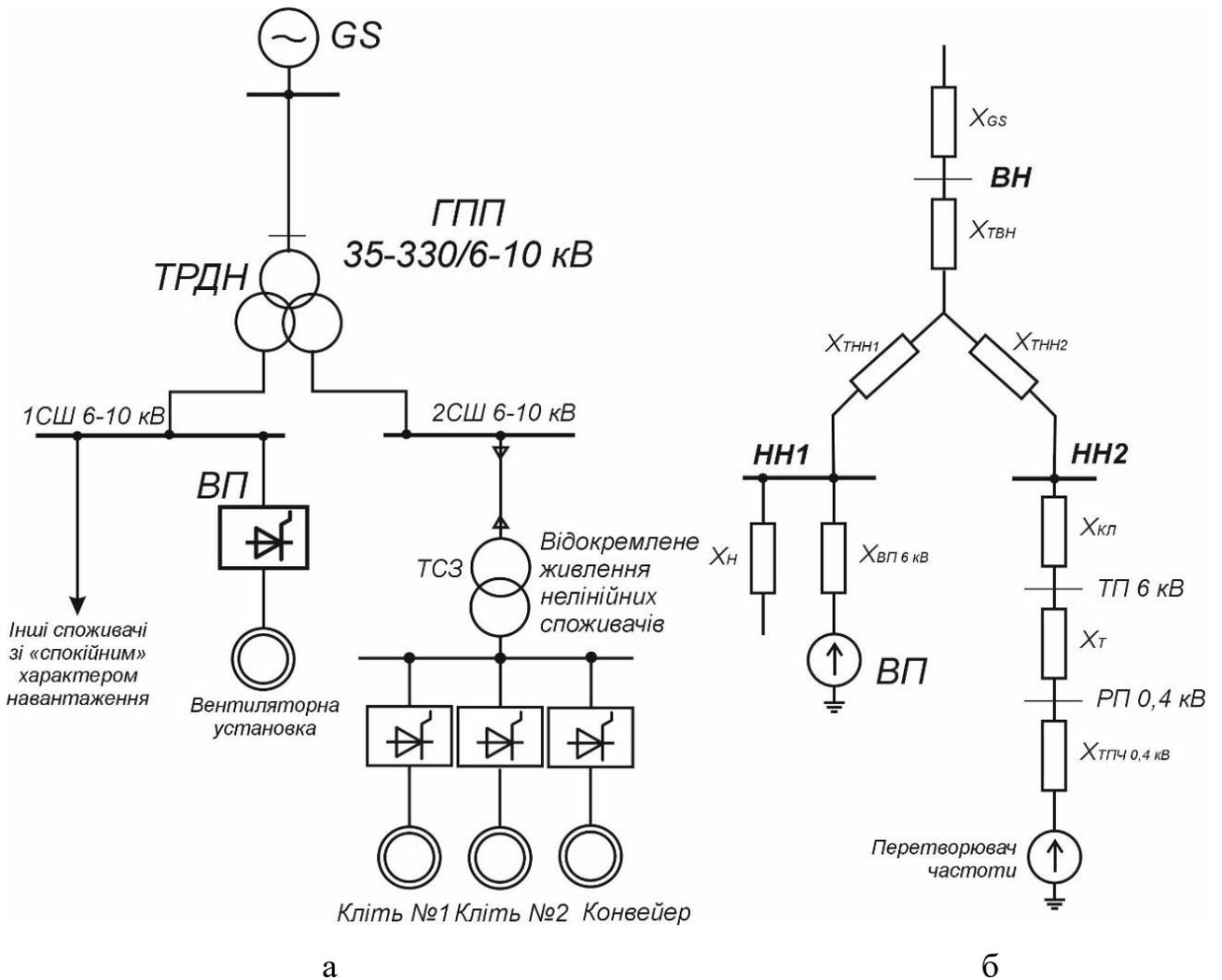


Рис. 4.14. Схема електропостачання підприємства з двообмотковим трансформатором (а) та розрахункова схема заміщення (б)

Таблиця 4.1. Значення коефіцієнтів передачі для типових трансформаторів з розщепленими обмотками з $U_{BH} = 150$ кВ

$S_{ном},$ МВА	$S_{КЗ},$ МВА	Коефіцієнти передачі	
		$K_{ВП-СП}$	$K_{ВП-ВН}$
25	1000	0,145	0,564
	2000	0,122	0,488
	3000	0,104	0,386
	4000	0,095	0,323
40	1000	0,178	0,712
	2000	0,153	0,604
	3000	0,125	0,502
	4000	0,112	0,433
63	1000	0,228	0,815
	2000	0,195	0,706
	3000	0,156	0,613
	4000	0,136	0,546

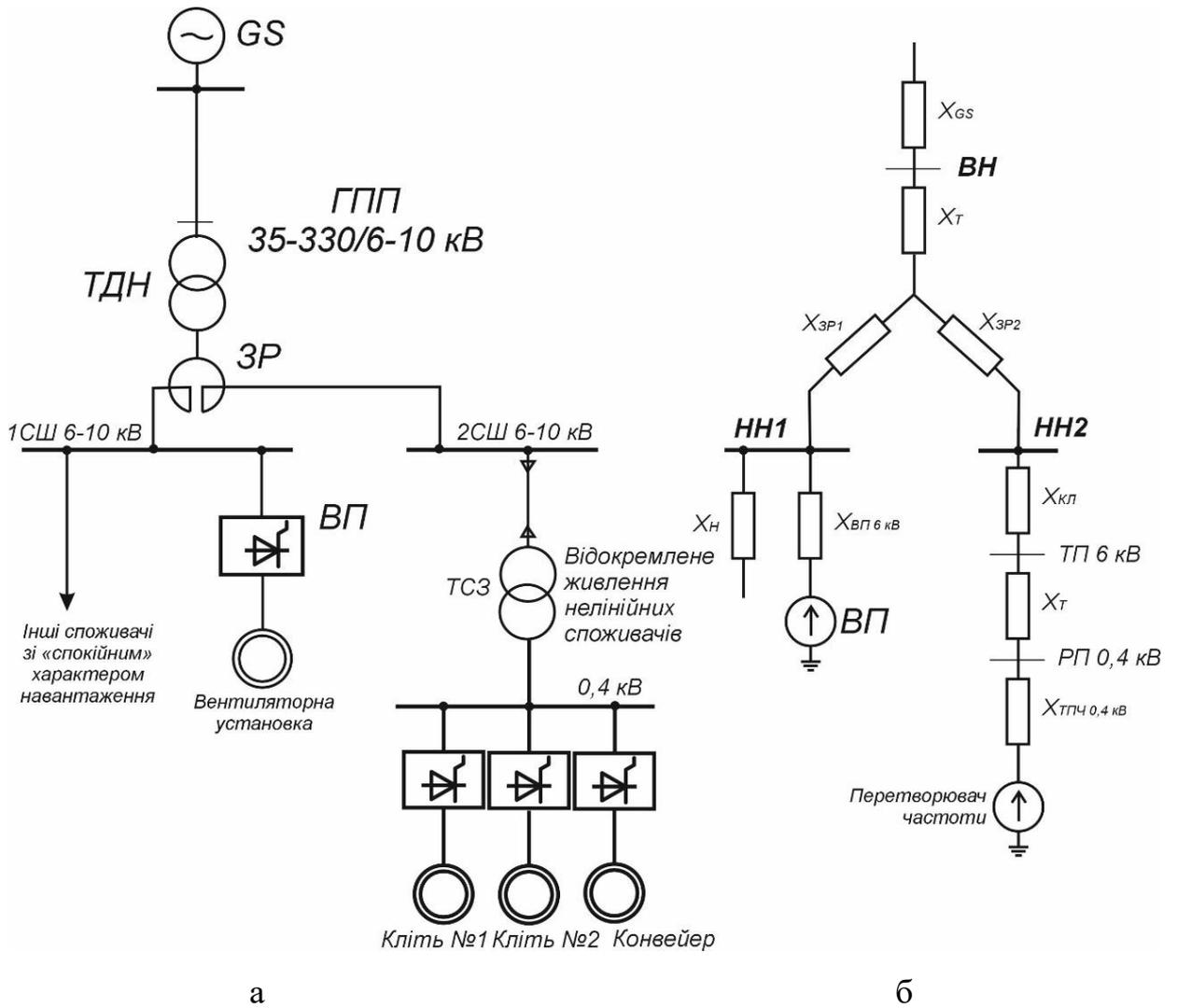


Рис. 4.15. Схема електропостачання підприємства з двообмотковим трансформатором та здвоєним реактором (а) та розрахункова схема заміщення (б)

Таблиця 4.2. Значення коефіцієнтів передачі при використанні здвоєних реакторів

$S_{ном}$, МВА	X_p , %	$S_{КЗ}$, МВА	Коефіцієнти передачі		
			$K_{ВП-СТ}$	$K_{ВП-НН2}$	$K_{ВП-ВН}$
25	4	2000	0,372	1,546	0,164
		3000	0,359	1,578	0,115
		4000	0,352	1,595	0,090
	6	2000	0,207	2,293	0,244
		3000	0,193	2,410	0,176
		4000	0,186	2,472	0,139
40	6	2000	0,349	1,713	0,276
		3000	0,327	1,787	0,201
		4000	0,316	1,827	0,160
	8	2000	0,230	2,296	0,370
		3000	0,207	2,483	0,280
		4000	0,196	2,591	0,227
	10	2000	0,256	1,845	0,298
		3000	0,236	1,940	0,219
		4000	0,227	1,993	0,175
63	8	2000	0,242	2,107	0,485
		3000	0,211	2,326	0,384
		4000	0,195	2,462	0,321
	10	2000	0,138	3,288	0,758
		3000	0,107	4,082	0,673
		4000	0,091	4,683	0,610
	12	2000	0,074	5,564	1,282
		3000	0,043	9,091	1,500
		4000	0,028	13,714	1,786

Несинусоїдальність напруги в точці розподілу з енергосистемою на стороні ВН:

$$K_{THD}^{(BH)} = K_{THD}^{(BP)} K_{BP-BH}, \quad (4.5)$$

де $K_{BP-BH} = K_{BP-CT} \cdot K_{CT-BH}$ - перерахунок коефіцієнтів через середню точку.

Значна частка промислового навантаження має перетворювачі енергії, тому виконаємо розрахунки коефіцієнтів передачі для розподільчої мережі 0,4 кВ. Вважаємо, що основне джерело несинусоїдальності – вентильний перетворювач напругою 6 кВ.

Значення сумарного коефіцієнту гармонійних спотворень на різних ступенях розподілу електроенергії:

$$K_{THD}^{(HH2)} = K_{THD}^{(BP)} K_{BP-HH2}, \quad K_{THD}^{(PP)} = K_{THD}^{(BP)} K_{BP-PP},$$

$$\text{де } K_{BP-HH2} = K_{BP-CT} \cdot K_{CT-HH2}.$$

Несинусоїдальність напруги на стороні 0,4 кВ:

$$K_{THD}^{(PPP)} = K_{THD}^{(BP)} K_{BP-PP0,4кВ}, \quad (4.6)$$

$$\text{де } K_{BP-PP} = K_{BP-CT} \cdot K_{CT-HH2} \times$$

$$\times K_{HH2-TP} \cdot K_{TP-PP};$$

$$K_{TP-PP} = \frac{X_{H0,4}}{X_{H0,4} + X_m}; \quad X_{H0,4} = \frac{S_{\sigma}}{S_{ном} \sin \varphi}.$$

Отримані залежності можуть широко застосовуватися у проектній та інженерній практиці для оперативних розрахунків параметрів електромагнітної сумісності для гнучких та швидкозмінних систем електропостачання для оцінки аварійних, ремонтних схем живлення, а також при децентралізованих обмеженнях потужності енергосистеми.

4.3. Визначення додаткових втрат потужності в умовах діючих промислових підприємств

Електричні мережі промислових підприємств будуються трьох і чотирипровідними, проте більшого поширення набули чотирипровідні мережі через можливість одночасного електропостачання силового та освітлювального обладнання. Трипровідній мережі застосовуються порівняно рідко у вибухо- та пожежо-небезпечних приміщеннях, де застосування пічного обладнання виключено, тому у роботі більшу увагу приділено несиметричним режимам у чотирипровідних мережах із глухим заземленням нейтралі.

Несиметричним режимом багатозазначеної електричної системи вважається такий режим, при якому умови роботи фаз варіюються. Ступінь несиметрії трифазної системи характеризується коефіцієнтами несиметрії зворотної та нульової послідовності K_{2U} та K_{0U} .

Коефіцієнти несиметрії зворотної та нульової послідовності в загальному випадку можуть набувати довільних числових значень від нуля до нескінченності. Чим вони більші, тим сильніші симетрії мережі на роботу електроустановок. Так, у синхронних генераторах несиметрія струмів статора створює в повітряному зазорі генератора поле, яке може бути представлене у вигляді суми двох складових, що обертаються в протилежних напрямках із синхронною швидкістю. Одна з них, що обертається в той же бік, що і ротор, і нерухома щодо нього викликається струмами прямої послідовності. Ця складова поля та струми, що його утворили, не відрізняються від поля та струмів нормального навантажувального режиму. Друга складова поля, що обертається з подвійною синхронною швидкістю щодо статора, викликається струмами зворотної послідовності. Цією складовою поля визначаються всі явища, що відрізняють несиметричний режим від симетричного. У турбогенераторах вплив поля зворотної послідовності проявляється в основному додатковому нагріванні ротора. У гідрогенераторах поряд з тепловим враховується і механічна дія поля [30].

Відповідно до існуючих норм на електричні машини при несиметричному навантаженні трифазних генераторів і синхронних компенсаторів допускається їх тривала робота, якщо струми у фазах не перевищують номінального значення і їх різниці становлять: для турбогенераторів і гідрогенераторів не більше 10% номінального струму фази; для решти генераторів і синхронних компенсаторів з явно вираженими полюсами не більше 20%. На практиці в турбогенераторах при різниці фазових струмів, яка дорівнює 10% номінального струму, допускається струм зворотної послідовності не вище 6–7% номінального [30].

Несиметрія напруг несприятливо позначається на роботі асинхронних двигунів (АТ), призводячи до підвищеного нагрівання їх струмами зворотної послідовності, чому потужність машин, що розташовується, значно знижується [30]. Так, при струмі зворотної послідовності, що дорівнює 10% номінального струму, втрати в статорі двигуна збільшуються на 1%. Однак якщо струм зворотної послідовності збігається по фазі зі струмом прямої послідовності в одній з обмоток, то втрати в ній збільшуються на 21% [30]. Це пояснюється тим, що опір зворотної послідовності АТ менший за опір прямої послідовності в п'ять - сім разів. Тому навіть невеликі величини напруг зворотної послідовності викликають значні струми зворотної послідовності. Допустиме для АТ значення постійної неперемежної по фазах несиметрії обмежується $K_{2U}=2\%$. Для збереження терміну служби машини потрібно або зниження потужності на валу двигуна, або збільшення його номінальної потужності. З збільшенням кратності пускового струму і несиметрії напруг допустимі навантаження на валу АТ різко знижуються. При цьому відбувається значне зниження ККД та коефіцієнта потужності двигуна [30]. Відомо, що з наявна потужність АТ зменшується на 20-50%, а при термін служби електродвигунів знижується в два рази [30].

Дослідження, проведені раніше, показали, що зменшення крутного і пускового моментів АТ при несиметрії напруг дорівнює квадрату коефіцієнта

несиметрії напруг [30]. Зазначимо, що більше 20% АТ виходять з ладу в результаті їх роботи в несиметричних електричних системах [30].

Несиметрія струмів у лініях електропередач, розподільчих мережах та трансформаторах зменшує пропускну здатність трифазної системи [30]. Якщо при цьому найбільш навантажена фаза працює на межі, то інші фази виявляються недовантаженими. У низьковольтних мережах процеси передачі електроенергії супроводжуються підвищеними у 2-3 рази значеннями втрат при несиметрії напруги [30]. Дослідження, проведені в електричних мережах напругою 6-10/0,4 кВ, показали, що додаткові втрати електроенергії в лініях і трансформаторах внаслідок несиметрії майже на 39% більше втрат при рівномірному навантаженні фаз.

Явища несиметрії у трансформаторах викликаються як несиметрією підведених напруг так і несиметрією навантаження. При несиметрії під «корисною» потужністю трансформатора розуміється потужність, що відповідає струму прямої послідовності.

4.4. Експериментальні дослідження показників якості електричної енергії у промислових системах електропостачання

Виконаємо розрахунок додаткових втрат електроенергії для умов потужного сталеплавильного виробництва.

Найбільш точним методом розрахунку втрат електроенергії в елементах електричної мережі вважається метод графічного інтегрування. Метод досить трудомісткий, оскільки вимагає частоті реєстрації показань приладів обліку електроенергії. Результати розрахунку втрат за цим методом вважаються еталонними і по ним повинні розглянути коректність інших методів [30]. В якості вихідної інформації для розрахунків втрат в електричних мережах металургійного комбінату є графіки навантажень, представлені у вигляді півгодинного споживання електроенергії за такими вводів. Номери вводів відповідають номерам на спрощеній схемі (рис.4.16).

- 1 - лінія 330 кВ Ввід №1;
- 2 - лінія 330 кВ Ввід №2;
- 3 - ЗРУ 35 кВ Ввід №1;
- 4 - ЗРУ 35 кВ Ввід №2;
- 5 - ЗРУ 10 кВ Ввід №1;
- 6 - ЗРУ 10 кВ Ввід №2;
- 7 - ЗРУ 10 кВ Ввід №3;
- 8 - ЗРУ 10 кВ Ввід №4.

Значення втрат електроенергії в будь-якому елементі електричної мережі за методом графічного інтегрування представляється наступною залежністю:

$$\Delta A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i + \sum_{i=1}^n Q_i^2 t_i}{U_{ном}^2} R \quad (4.7)$$

де P_i, Q_i - значення активної і реактивної потужності на i -го ступеня графіка навантаження, t_i - тривалість i -го ступеня графіка, $U_{ном}$ - номінальна напруга мережі, R - активний опір елемента електричної мережі.

Оскільки графік представлений у вигляді півгодинного споживання активної та реактивної енергії, зробимо перетворення формули до зручного для розрахунку виду.

З теоретичних основ електротехніки відомо, що активна енергія дорівнює $A = P \cdot t$, реактивна енергія $W = Q \cdot t$. У добовому графіку 48 ступенів. Тривалість ступені графіка активної і реактивної навантаження дорівнює 0,5 години.

Звідси добові втрати електроенергії:

$$\Delta A_{\text{сум}} = \frac{\sum_{i=1}^{48} \left(\frac{A_i}{t_i} \right)^2 t_i + \sum_{i=1}^{48} \left(\frac{W_i}{t_i} \right)^2 t_i}{U_{\text{ном}}^2} R = \frac{2 \left(\sum_{i=1}^{48} A_i + \sum_{i=1}^{48} W_i \right)}{U_{\text{ном}}^2} R \quad (4.8)$$

Таким чином, отримана залежність адаптована до розрахунків за наявними півгодинним значенням витрати електроенергії. Наступний етап розрахунку - отримання активних опорів елементів електричної мережі. Елементи електричної мережі, в яких проводиться розрахунок втрат енергії представлені на спрощеній схемі електропостачання підприємства (рис.4.16).

Активний опір повітряної або кабельної лінії електропередачі визначається по залежності:

$$R_{\text{ЛЕП}} = r_0 \cdot L_{\text{ЛЕП}}, \quad (4.9)$$

де - r_0 питомий активний опір ЛЕП, Ом / км, $L_{\text{ЛЕП}}$ - довжина ЛЕП, км.

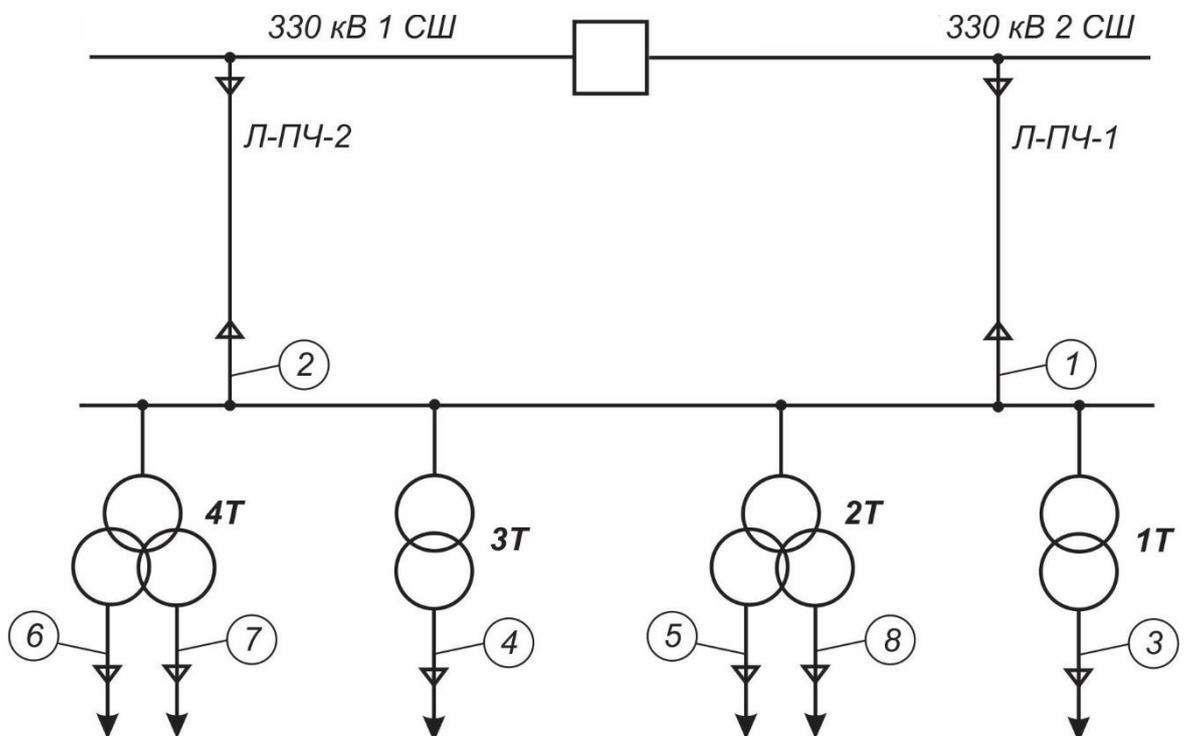


Рис. 4.16. Спрощена схема ПС 330/35/10 кВ

Аналіз добових і місячних графіків споживання електроенергії.
Визначення параметрів схем заміщення кабельних ліній і силових трансформаторів

Добові графіки електричних навантажень отримані за допомогою АСКОЕ і являють собою півгодинні значення активної і реактивної енергії. Для прикладу наведемо графік за зимовий місяць по вводу №1 330 кВ (рис. 4.17-4.19).

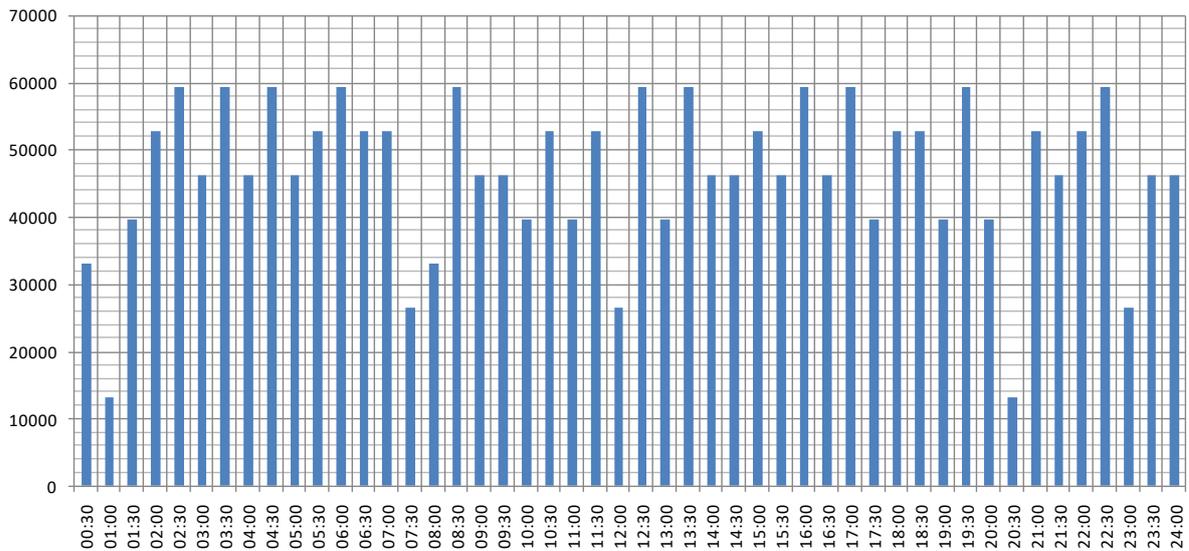


Рис. 4.17. Добовий графік активної потужності по вводу №1 330 кВ

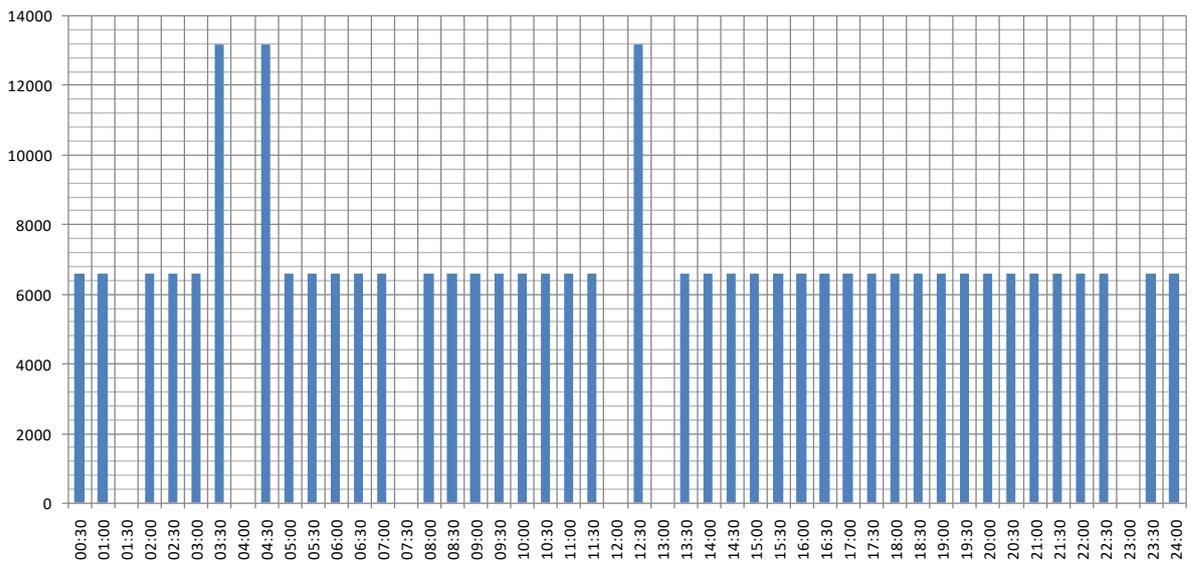


Рис. 4.18. Добовий графік реактивної потужності по вводу №1 330 кВ

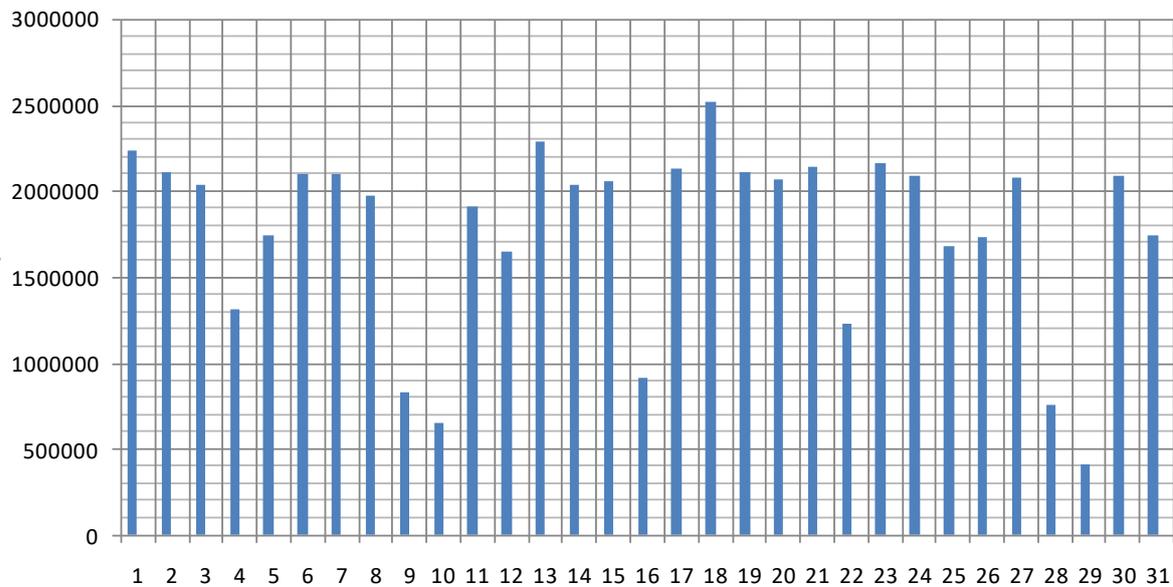


Рис. 4.19. Місячний графік активної електроенергії по вводу №1 330 кВ

Для розрахунку втрат електроенергії необхідно отримати значення активних опорів кабельних ліній (КЛ) і силових трансформаторів. Необхідно відзначити, що опору трансформаторів повинні бути приведені до тієї сторони напруги, де отримані графіки електричних навантажень для методу графічного інтегрування.

При відсутності довідкових даних для питомих опорів КЛ використовують точну формулу [64]:

$$r_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot F}, \quad (4.10)$$

де $\gamma = 31,7 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$ - питома провідність кабелю з алюмінію, F - перетин жили кабелю, мм^2 .

Розрахунок питомих і активних опорів для КЛ 330, 35 і 10 кВ металургійного комбінату представимо у вигляді таблиці.

Табл.4.3. Розрахунок активних опорів КЛ

Точка на схемі	Ввід	Марка кабелю	Довжина кабелю, км	r_0 , Ом/км	R , Ом
1	лінія 330 кВ Ввод №1		12,7	0,039	0,5
2	лінія 330 кВ Ввод №2		12,7	0,039	0,5
3	ЗРП 35 кВ Ввод №1	АПВЭВНГ-35 6х1х630 АПВЭВНГ-35 6х1х630	0,055 0,07	0,05	0,002
4	ЗРП 35 кВ Ввод №2	АПВЭВНГ-35 6х1х630 АПВЭВНГ-35 6х1х630	100 100	0,05	0,002
5	ЗРП 10 кВ Ввод №1	АПВЭВНГ-10 9х1х500	0,065	0,063	0,004
6	ЗРП 10 кВ Ввод №2	АПВЭВНГ-10 9х1х500	0,07	0,063	0,0044
7	ЗРП 10 кВ Ввод №3	АПВЭВНГ-10 9х1х500	0,08	0,063	0,005
8	ЗРП 10 кВ Ввод №4	АПВЭВНГ-10 9х1х500	0,075	0,063	0,0047

Опори силових трансформаторів залежать від їх типу і з'єднання обмоток вторинної напруги. В даній схемі присутні трансформатори двох типів: двохобмоткові напругою 330/35 кВ і двохобмоткові з розщепленням обмотки НН напругою 330/10 кВ.

Опір двохобмоткового трансформатора без розщеплення:

$$R_T = \frac{\Delta P_{КЗ} \cdot U_{ном.ср}^2}{S_{ном}^2}, \quad (4.11)$$

де $\Delta P_{КЗ}$ - втрати досвіду КЗ, Вт; $U_{ном.ср}$ - середнє номінальне напруга боку до якої наводяться опору, кВ; $S_{ном}$ - номінальна потужність трансформатора, кВА.

Визначимо опір трансформаторів ТДНМ-160000/330, наведене до сторони ВН:

$$R_{T1,3} = \frac{428000 \cdot 347,5^2}{160000^2} = 2,02 \text{ Ом}$$

Визначимо еквівалентну опір трансформаторів ТРДН-63000/330:

$$R_{T2,4} = \frac{223000 \cdot 347,5^2}{63000^2} = 6,78 \text{ Ом}$$

Розрахунок втрат виконаємо для чотирьох силових трансформаторів 1Т, 2Т, 3Т, 4Т за середньодобовим і місячним графіком електричних навантажень, а також для кабельних ліній зовнішнього електропостачання 330 кВ, а також для КЛ 35 і 10 кВ вводів в ЗРП. Розрахунки представимо у вигляді таблиці за зимового місяця (табл. 4.4).

Для оцінки сезонних змін втрат електроенергії виконано розрахунок втрат за літній місяць (табл. 4.5).

Табл.4.4. Розрахунок місячних втрат електроенергії (зимовий місяць)

Тип електрообладнання	Втрати активної електроенергії ΔA , кВт·год	
	по середньодобовому графіку	по місячному графіку
КЛ 330 кВ ввід №1	608	20652,8
КЛ 35 кВ ввід №1	142	4835,7
КЛ 35 кВ ввід №2	0	0
КЛ 10 кВ ввід №1	13	352
КЛ 10 кВ ввід №2	90,5	2716
КЛ 10 кВ ввід №3	7	200
КЛ 10 кВ ввід №4	37	976
1Т	2455 2642,4 (холостий хід)	83438 (холостий хід)
2Т	2642,4 (холостий хід)	81914,4 (холостий хід)
3Т	125 1471,2 (холостий хід)	3940 45607,2 (холостий хід)
4Т	210 1471,2 (холостий хід)	6100 45607,2 (холостий хід)

Табл.4.5. Розрахунок місячних втрат електроенергії (літній місяць)

Тип електрообладнання	Втрати активної електроенергії ΔA , кВт·год	
	по середньодобовому графіку	по місячному графіку
КЛ 330 кВ ввід №2	610	19671,3
КЛ 35 кВ ввід №1	0	0
КЛ 35 кВ ввід №2	164	5342
КЛ 10 кВ ввід №1	15	380
КЛ 10 кВ ввід №2	93	3100
КЛ 10 кВ ввід №3	10	230
КЛ 10 кВ ввід №4	42	1050
1Т	2708 2642,4 (холостий хід)	92455 81914,4 (холостий хід)
2Т	2642,4 (холостий хід)	81914,4 (холостий хід)
3Т	127 2472 (холостий хід)	4126 76632 (холостий хід)
4Т	219 2472 (холостий хід)	6870 76632 (холостий хід)

Несиметрія напруг в СЕП підприємства обумовлена наявністю потужної трифазної навантажень довго працює в несиметричному режимі - дугова сталеплавильна піч.

При несиметричних лінійних та фазних напругах у трифазних мережах з'являються додаткові втрати в елементах електромереж, скорочується термін служби ламп і електроустаткування і знижуються економічні показники його роботи.

В електричних машинах змінного струму виникають магнітні поля, що обертаються з синхронної швидкістю в напрямку обертання ротора і з подвійною синхронною швидкістю в протилежному. В результаті виникає гальмівний електромагнітний момент, а також додатковий нагрів активних частин машини, головним чином ротора, за рахунок струмів подвійної частоти [30].

В асинхронних двигунах (АД) при коефіцієнтах зворотній послідовності напруг, що зустрічаються на практиці зниження крутного моменту АД виявляється дуже незначним. Вплив несиметрії на втрати в електродвигуні і, отже, нагрівання і скорочення терміну служби ізоляції його проявляються в більшій мірі.

При несиметрії напруг мережі в синхронних двигунах (СД) поряд з виникненням додаткових втрат і нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних моментів, що обертають і тангенціальних сил, пульсуючих з подвійною частотою мережі [30].

При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, особливо при недостатній міцності або наявності дефектів зварних з'єднань. При несиметрії струмів, що не перевищує 30%, небезпечні перенапруження в елементах конструкцій, як правило, не виникають.

Електромагнітні втрати при несиметрії напруги в мережі [30]:

$$\Delta P_{nc} = \Delta P_{ном} \rho_{nc} K_{2u}^2, \quad (4.12)$$

де K_{2u} - коефіцієнт несиметрії, в.о.

Для Тр: $\rho_{\text{Тр}}^{(\text{нс})} = \frac{1}{u_{\text{к}}^2}$, де $U_{\text{к}}$ - напруга короткого замикання.

Аналізуючи дані про технологічні перекоси фазних первинних струмів трансформатора ДСП можна стверджувати, що несиметрія напруг при розплавленні металу становить до 4%, а при відключенні дуги на одному з електродів може досягати 10%. Причому встановлено, що неповнофазного режими горіння дуги можуть становити 10% часу плавки [30].

Зробимо розрахунок додаткових втрат потужності в трансформаторах заводу від несиметрії в нормальних режимах (плавка на трьох фазах) і режимах плавки на двох фазах (анормальний режим).

При цьому оцінимо, на скільки зміняться втрати потужності в електрообладнанні.

Значення втрат при несиметрії в трансформаторі 1Т:

$$\Delta P_{\text{нс1}} = \Delta P_{\text{ном}} \rho_{\text{нс}} K_{2U}^2 = 280,8 \cdot \frac{1}{0,095^2} \cdot 0,04^2 = 44,9 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{нс2}} = \Delta P_{\text{ном}} \rho_{\text{нс}} K_{2U}^2 = 280,8 \cdot \frac{1}{0,095^2} \cdot 0,1^2 = 280 \text{ кВт}$$

де $\Delta P_{\text{ном}} = k_3^2 \Delta P_{\text{кз}} = 0,81^2 \cdot 428 = 280,8 \text{ кВт}$ - втрати потужності при симетричному напрузі;

Значення втрат при несиметрії в трансформаторі 2Т:

$$\Delta P_{\text{нс1}} = \Delta P_{\text{ном}} \rho_{\text{нс}} K_{2U}^2 = 10,8 \cdot \frac{1}{0,105^2} \cdot 0,04^2 = 1,6 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{нс2}} = \Delta P_{\text{ном}} \rho_{\text{нс}} K_{2U}^2 = 10,8 \cdot \frac{1}{0,105^2} \cdot 0,1^2 = 9,8 \text{ кВт}$$

де $\Delta P_{\text{ном}} = k_3^2 \Delta P_{\text{кз}} = 0,22^2 \cdot 223 = 10,8 \text{ кВт}$ - втрати потужності при симетричній напрузі.

Додаткові втрати активної потужності від вищих гармонік у кабельних лініях.

Значення додаткових втрат активної потужності повітряних і кабельних ЛЕП визначається так:

$$\Delta P_{\text{дон}v} = 3 \sum_{v=3}^n I_v^2 R_v, \quad (4.13)$$

де струм v -ї гармоніки; R_v - опір активний опір КЛ на частоті v -ї гармоніки.

Загалом активний опір кабельних ЛЕП рекомендується визначати за залежністю [30]:

$$R_v = R_2 K_r K_{rv},$$

де $R_2 = r_0 l$ - активний опір зворотної послідовності ЛЕП; $K_r = \sqrt{v}$ - коефіцієнт, який враховує зміну активного опору від частоти; K_{rv} - поправочний коефіцієнт, який враховує розподіл параметрів у схемі заміщення (оскільки довжини кабелів менше 1 км, то розподіл параметрів можна не враховувати, тому $K_{rv} = 1$).

Додаткові втрати активної потужності від вищих гармонік у силових трансформаторах.

Втрати у трансформаторах на частотах ВГ пропорційні значенню [30]:

$$\sum_{n=2}^n \frac{U_{nx}}{n\sqrt{n}} = \sum_{n=2}^n \Lambda_n U_{nx}, \quad (4.14)$$

де $\Lambda_n = \frac{1}{n\sqrt{n}}$ - коефіцієнт гармонійних втрат.

Значення коефіцієнта в залежності від номера гармоніки отримані при експериментальних дослідженнях промислових об'єктів [30].

Вираз для оцінки втрат на частотах ВГ [30]:

$$\Delta P_n = \Delta P_{\text{ном}} \rho \sum_{n=2}^n \Lambda_n U_{nx} \quad (4.15)$$

Індекс ВГ для трансформаторів: $\rho_{\text{Тр}}^{(\text{ВГ})} = \frac{0,6}{u_k^2}$ де u_k – напруга короткого замикання.

В рамках виконання наукових досліджень даної дисертаційної роботи були проведені комплексні експериментальні дослідження показників якості напруги в умовах діючих вугільних шахт «Героїв Космосу», «Павлоградська», «Тернівська», «Благодатна», а також на АТ «Нікопольський завод феросплавів». Програма розрахунків була розроблена з урахуванням різних варіантів схем зовнішнього електропостачання, зміни режиму споживання електроенергії у робочі та ремонтні зміни та різних параметрів джерел порушення електромагнітної сумісності. Як результат, були отримані показники якості напруги:

- стале відхилення напруги δU_y ;
- показники несиметрії напруги K_{2U}, K_{0U} ;
- показники несинусоїдальності напруги $K_U, K_{U(n)}$;
- показники коливання напруги P_{st} .

Статистичний аналіз коефіцієнтів K_{2U}, K_{0U} , що значна несиметрія в підземних та поверхневих мережах шахт відсутня. Максимальне значення коефіцієнту несиметрії зворотної послідовності складало 2,1% протягом нетривалих (до 30 хвилин протягом доби) проміжків часу, що вважається допустимим за ДСТУ EN 50160.

Коливання напруги були зафіксовані в усіх досліджуваних системах електропостачання. Значення дози флікера не перевищувало 0,98, що вважається допустимим за ДСТУ EN 50160.

Виконання моніторингу спрямовано на отримання результатів у вигляді значень основних показників якості електроенергії для його оцінки на відповідних секціях шин і ЛЕП. Крім того, ідея "спрямованих" вимірів полягає у встановленні рівня викривлення напруги живлення при роботі електроприймачів з перетворювачами енергії: вугільного підйому (ВП) з системою АТК і породного підйому (ПП) з двигуном постійного струму і системою тиристорного електропривода. Важливим моментом є також їх вплив на якість напруги на відповідних секціях шин іншого блоку через елементи системи електропостачання: силовий трансформатор 35/6 кВ, повітряну ЛЕП 35 кВ, силовий трансформатор 150/35/6 кВ і шинопровод 6 кВ. При проведенні вимірювань були отримані наступні результати (табл.4.6-4.7), де - № - номер виміру 1С - 1-я секція 6 кВ блок №1; 2С - 2-я секція 6 кВ блок №1; 3С, 4С, 5С - 1-я секція 10 кВ блок №2; 6С, 7С, 8С - 2-я секція 10 кВ блок №2; 9С - 2-я секція 6 кВ блок №2; T - тривалість виміру; K_{2U} - коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю: m , a , M - відповідно мінімальне, середнє і максимальне значення для всієї тривалості виміру (такі ж позначення використані і для коефіцієнтів несинусоїдальності); K_U , $K_{U(n)}$ - відповідно коефіцієнти несинусоїдальності напруги та n -ої гармонійної складової, взяті для фази з найбільшим проявом несинусоїдальності (різні рівні гармонік в різних фазах пояснюються в основному несиметрією напруги).

Табл.4.6. Результати експериментального моніторингу ПКЯ

№	П, ч	$K_{2U}, \%$			$K_U, \%$			$K_{U(5)}, \%$			$K_{U(7)}, \%$			$K_{U(11)}, \%$			C*
		min	avg	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg	max	
1C	2,2	0,4	0,7	1,1	1,4	2,8	9,2	0,5	1,8	6,5	0,5	1,5	6,1	0,2	0,7	2,7	1
2C	2,05	0,4	0,6	0,7	1,8	2,3	5,2	1,2	2	3,6	0,3	0,8	2,5	0,1	0,3	0,5	0
3C	15,7	0,4	0,5	0,8	0,9	2,1	5,7	0,3	1,8	5,4	0,1	0,3	2,3	0,1	0,3	0,4	0
4C	2,9	0,5	0,6	1,1	0,8	1,4	3,8	0,4	1,0	2,1	0,2	0,8	2,8	0,1	0,2	1,0	0
5C	0,85	0,4	0,5	0,8	0,8	1,8	6,0	0,3	2	4,2	0,2	0,9	5,0	0,1	0,2	0,4	0
6C	16,4	1,5	1,6	1,8	0,8	2,6	8,5	0,3	2,5	7,4	0,2	0,3	3,2	0,2	0,4	1,5	1
7C	2,8	1,6	1,7	1,8	1,2	1,8	6,1	0,8	1,2	4,4	0,3	0,8	3,2	0,2	0,5	4,4	1
8C	2,2	1,9	2,0	2,1	1,2	2,4	6,4	0,7	2,2	4,5	0,3	0,7	2,6	0,1	0,2	1,0	0
9C	15,7	1,9	2,1	2,3	0,8	3,5	12,8	0,3	3,5	11,2	0,2	0,6	4,1	0,1	0,2	1,2	1**

Табл.4.7. Результати експериментального моніторингу ПКЯ (приєднання БК)

До включення БК на стороні 10 кВ											Після включення БК на стороні 10 кВ												
U_c р, к В	$\cos\varphi$ ср	$K_U, \%$		$K_{U(5)}, \%$		$K_{U(7)}, \%$		$K_{U(11)}, \%$		$K_{U(13)}, \%$		U_c р, кВ	$\cos\varphi$	$K_U, \%$		$K_{U(5)}, \%$		$K_{U(7)}, \%$		$K_{U(11)}, \%$		$K_{U(13)}, \%$	
		av g	ma x	av g	ma x	av g	ma x	av g	ma x	av g	ma x			av g	ma x	av g	ma x	av g	ma x	av g	ma x	av g	ma x
10	0,86	1, 3	3, 2	1	2,6	0, 6	1,6	0,1 5	0,2 2	0,0 7	0,1 7	10, 15	0,97	1, 8	5	1, 7	4,7	0,2 6	0,6	0,1 6	0,3 4	0,0 4	0,2 1

4.5. Висновки по розділу 4

1. Оціночні методи розрахунків електричних режимів незамінні при експертних оцінках електромагнітної обстановки у автономних та «проблемних» районах електричних мереж, а також у віддалених сільських або гірських місцевостях з обмеженою вихідною інформацією стану та режиму електрообладнання. Особливості коефіцієнтів передачі полягають у здатності швидкої оцінки показників якості напруги у системі електропостачання підприємства при централізованому або автономному живленні споживачів. Ці коефіцієнти дають можливість розрахувати показники електромагнітної сумісності незалежно від місця підключення перетворювача в мережі, потужність яких знаходиться в межах 0.01...4.5 МВт, залежно від потужності КЗ енергосистеми.

2. Результати моделювання рівнів вищих гармонік в системах електропостачання потужних промислових підприємств різних напруг дозволили виявити закономірність зростання впливу потужності нелінійних споживачів електроенергії на якість напруги при критичному зменшенні потужності КЗ енергосистеми більше ніж на 30% від номінального значення. Тобто зниження потужності короткого замикання може бути використано як показник відповідності вимогам електромагнітної сумісності при воєнних діях, тривалих відключеннях та впровадженні децентралізованого принципу побудови електричних мереж.

3. Визначними ознаками запропонованих інженерних методів розрахунку показників електромагнітної сумісності в системах електропостачання промислових підприємств є врахування особливих схемних рішень з багаторівневого резервування та застосування уточнених значень коефіцієнтів несиметрії та несинусоїдальності при «ослабленій енергосистемі». Похибка розрахункових значень від результатів експериментів складає 3,6...5,1% для різних ступенів ієрархії електропостачання.

4. Оціночні методи розрахунку показників електромагнітної сумісності систем електропостачання розкривають нові можливості оцінки енергетичної ефективності електричних мереж постачальника або споживача послуги електропостачання. Відмінності у розрахунках стосовно металургійних та гірничих підприємств полягають у врахуванні імовірності виникнення резонансних явищ при роботі сонячних інверторів та/або перетворювачів частоти. При цьому потрібен мінімум вихідної інформації, похибка розрахунків не перевищує 5%.

5. Доведено, що застосування післяаварійних схем електропостачання критичних промислових об'єктів та використання ВДЕ для власної генерації призводить до зміни динамічних характеристик електроенергетичної системи та збільшення інтенсивності прояву вищих гармонік та інтергармонік, що обумовлює корекцію методів розрахунку та прогнозу показників електромагнітної сумісності, а також оцінки втрат електроенергії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу розвитку теорії електромагнітної сумісності з метою створення методики вибору раціональних енергоефективних режимів роботи системи електропостачання промислових підприємств. Розвиток теорії полягає у встановленні закономірностей показників якості напруги залежно від режимних особливостей виробництва та технологічних обмежень централізованої електроенергетичної системи. Впровадження розроблених методів і моделей у карти оперативних перемикачів та керуванню режимами електроспоживання при відновленні схем електропостачання зменшить рівень втрат електроенергії в мережах, дозволить зберегти технологічне обладнання та покращить стійкість промислових вузлів навантаження з відновлюваними джерелами енергії.

Виконані у даній дисертаційній роботі дослідження дали змогу зробити наступні висновки щодо результатів роботи.

1. Аналіз електричних режимів типових приймачів електроенергії промислових підприємств з несиметричним та нелінійним характером навантаження дозволив виявити їх унікальні особливості у частотному та часовому діапазонах. Поєднання особливих режимів електротехнологічних установок та схемних комбінаціях систем електропостачання дозволило запропонувати комплексні рішення для забезпечення електромагнітної сумісності у післяаварійних режимах живлення промислових об'єктів.

2. Використання уточнених моделей прогнозування резонансних явищ у вузлах навантаження з пристроями FACTS та сонячними інверторами, запропонованих в дисертації, дозволяє суттєво покращити якість розрахунків показників електромагнітної сумісності та надійності, що відрізняє отримані наукові результати оцінки енергоефективних режимів систем електропостачання від існуючих.

3. Доведено, що механізм забезпечення необхідних рівнів електромагнітної сумісності елементів системи електропостачання

промислового підприємства у післяаварійних режимах живлення за «ослабленої» енергосистеми враховує зниження потужності короткого замикання на значення не більше 30 % номінального значення.

4. Амплітудно-частотні характеристики, отримані для унікальних співвідношень параметрів енергосистеми та системи електропостачання потужного промислового підприємства визначили діапазон зміни вхідного резонансного опору на рівні $Z/Z_I=40-160$, що доводить необхідність урахування потужності енергосистеми для виконання оптимальної компенсації реактивної потужності при наявності інтелектуальних пристроїв STATCOM.

5. Запропоновані нові рішення проблеми електромагнітної сумісності систем електропостачання промислових підприємств з мережею живлення, зокрема, шляхом розробки методів і моделей, що забезпечують нормативні показники якості електроенергії в системах електропостачання за рахунок усунення резонансних явищ на частотах вищих гармонік та інтергармонік при нетипових схемних рішеннях конфігурації електричних мереж.

6. Отримали подальший розвиток методи математичного моделювання фізичних процесів передачі та розподілу електроенергії в системах електропостачання потужних промислових підприємств з нелінійними та несиметричними навантаженнями, на основі яких прогноуються рівні електромагнітної сумісності при обмеженнях генерації енергосистеми.

7. Розроблена методика компенсації реактивної потужності в електричних мережах на основі інтелектуальних регуляторів параметрів фільтро-компенсуючих пристроїв з обґрунтуванням заходів попередження та знешкодження аномальних режимів в системах електропостачання, що дозволяє оптимізувати перетоки реактивної потужності у нормальних та післяаварійних режимах.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стратегія низьковуглецевого розвитку. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf.
2. Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article;jsessionid=12D73B364595AE9BC3059133CE27EA7A.app1?art_id=245434883&cat_id=35109.
3. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг №308 від 14.03.2018 «Про затвердження правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку».
4. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг №307 від 14.03.2018 «Про затвердження Правил ринку».
5. Закон України “Про ринок електричної енергії,” 2017. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.
6. IEEE 1547:2003-Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System.
7. Standard IEC61000-2-4–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-4: environment-compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.
8. CENELEC EN 50160–2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
9. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності, Київ, Мінекономрозвитку України, 27.
10. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник. Г.Г. Півняк, О.В. Кириленко, О.О. Азюковський, Ю.А. Папаїка, І.М. Луценко ; за ред. Г.Г. Півняка. 6-те вид. Дніпро. НТУ «ДП». 2024. 710 с.

11. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії: монографія / А.К. Шидловський, А.А. Долінський, І.М. Карп, О.В. Кириленко, Г.Г. Півняк та ін. Київ. *Українські енциклопедичні знання*. 2007. 560 с.
12. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє топологічне забезпечення. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 6. С. 44-50.
13. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії. Шидловський А.К. та ін. Київ. *Українські енциклопедичні знання*. 2007. 560 с.
14. Жаркін А.Ф., Попов В.А., Ткаченко В.В. Оптимальне секціонування повітряних розподільчих мереж в умовах застосування розподіленої генерації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 61-69.
15. Нормативно-правове регулювання якості напруги в електричних мережах з джерелами розосередженої генерації. Жаркін А.Ф., Палачов С.О., Новський В.О. Київ. Інститут електродинаміки НАН України. 2018. 161 с.
16. Волков І.В., В.П. Стяжкін, П.П. Подейко. Пригнічення гармонік струму живлення потужних однофазних навантажень. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 36-42.
17. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Київ. Інститут електродинаміки. 2013. 378 с.
18. Системи електропостачання із джерелами розподіленої генерації. Жаркін А.Ф., Денисюк С.П., Попов В.А. Київ. НПП «Видавництво «Наукова думка» НАН України». 2017. 232 с.
19. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 69-77.
20. Блінов І., Олефір Д., Парус Є. Модель оптимального використання ресурсів гідроелектростанцій на ринку електричної енергії. *Технічна Електродинаміка*. 2022. № 4. С. 42-47.

<https://doi.org/10.15407/techned2022.04.042>.

21. Блінов І.В., Трач І.В., Парус Є.В., Дерев'янка Д.Г., Хоменко В.М. Регулювання напруги та реактивної потужності в розподільних електричних мережах шляхом використання розосереджених відновлюваних джерел енергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 58-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>.

22. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 44-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>.

23. Кириленко О.В., Блінов І.В., Денисюк С.П., Зайцев Є.О., Васильченко В.І. Впровадження базових міжнародних стандартів Smart Grid в Україні: Сучасний стан справ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 4. С. 44–53.

24. Танкевич С.Є., Блінов І.В., Кириленко В.В. Україна та світ: нормативне забезпечення інтелектуальних електроенергетичних систем за концепцією Smart Grid. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2014. № 4 (89). С. 38-44.

25. Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for institutions of higher education. Zhezhelenko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Saenko Yu.L, 2 nd edition. Dnipro. National Mining University. 2013. 239 p.

26. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник. І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саенко. Д. Нац. гірнич. ун-т. 2009. 319 с.

27. Pivnyak G., Zhezhelenko I., Papaika Y. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems. *CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems*. Leiden, The Netherlands. 2013 annual publication. P. 11-18

28. Стійкість режиму енергосистеми з розподіленою генерацією: навчальний посібник. За ред. Г.Г. Півняка. Дніпро. Грані. 2024. 243 с.

29. Трансформація енергетики України в «інтелектуальну» ресурсно незалежну систему: навч. посіб. За ред. Г.Г. Півняка. Дніпро. НТУ «ДП». 2023. 56 с.
30. Папаїка Ю.А., Півняк Г.Г., Жежеленко І.В. Енергетична ефективність систем електропостачання. Дніпро. НТУ «ДП». 2018. 149 с.
31. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G. Pivnyak / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. 382 p.
32. Математичне моделювання електромагнітних процесів передачі енергії: навч. посібник. Півняк Г.Г. та ін. Дніпропетровськ. НГУ. 2003. 145 с.
33. Основи вітроенергетики: підручник. Півняк Г.Г. та ін. М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Дніпро. НГУ. 2015. 335 с.
34. Сенсори і сенсорні системи: підручник у 2-х т. Н. Нойбергер, Г.Г. Півняк, В.В. Ткачов; М-во освіти і науки України. НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро. НТУ «ДП». 2021. Т.1. 199 с.
35. Сенсори і сенсорні системи: підручник у 2-х т. Н. Нойбергер, Г.Г. Півняк, В.В. Ткачов; М-во освіти і науки України. НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро. НТУ «ДП». 2021. Т.2. 208 с.
36. Sustainable Development of Industrial Regions. *Advanced Engineering Forum. Monograph.* G. Pivnyak, R. Dychkovskiy, O. Vagonova. Trans Tech Publication Ltd. Zurich. Switzerland. 2017. № 22. 194 p.
37. Реактивна потужність в електричних мережах: монографія. І.В. Жежеленко, Г.Г. Півняк, Г.Г. Трофімов, Ю.А. Папаїка. М-во освіти і науки України. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП». 2020. 72 с.
38. “Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії,” *Офіційний вебпортал парламенту України.*

[Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0392-18#Text> (дата звернення: 23.06.2024).

39. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних енергетичних мереж та їхні перспективи в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 52-50.

40. Кириленко О.В., Якименко Ю.І., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Перетворювачі параметрів електроенергії в Smart-системах енергетики. *Пр. Інституту електродинаміки НАН України. Спецвипуск (Мат. I Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні енергетичні системи - ІЕС'10»)*. 2010. С. 17-23.

41. Промислова електроніка: Моделювання пристроїв силової електроніки в MATLAB Simulink. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «системи електропостачання» / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янку КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019. 95 с.

42. Lubna Mariam, Malabika Basu and Michael F. Conlon A Review of Existing Microgrid Architectures. *Journal of Engineering*. vol. 2013. Article ID 937614.

43. Кириченко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Тран І.В. Проблеми інтеграції відновлювальних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі. *Технічна електродинаміка*. 2012. №3. С. 25-26.

44. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці Про поняття моніторингу. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 62-68.

45. Standard IEC61000-2-4–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-4: environment-compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.

46. Standard IEC61000-2-12–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-12: environment-compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems.

47. Ромашко В.Я., Вербицький Є.В., Киричик Є.І. Аналіз втрат енергії в системі відбору максимальної потужності сонячної батареї. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 55-57.
48. Волков І.В., Каршенов Д.П. Універсальні математичні моделі імпульсних випрямлячів із змішаним RLC-навантаженням у ланцюги постійного струму. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 4. С. 30-36.
49. Волков І.В., Подольний С.В. Імпульсний резонансний перетворювач постійної напруги з дозованим відбором та передачею енергії. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 1. С. 10-16.
50. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. Проєкт. AF-Mercados EMI; Національна комісія з регулювання електроенергетики України; European Bank; EXERGIA; RAMBOLL. 2011.
51. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник. С.О. Кудря. Київ. НТУУ "КПІ". 2012. 489 с.
52. Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring / S. Babak та ін. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Т. 454. С. 181–193. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10.
53. Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation / Y. Sokol та ін. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Т. 509. С. 137–153. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7.
54. Hajji E., Mahmoudi H., Labbadi M. The electromagnetic interference caused by high voltage power lines along the electrical rail-way equipment. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020. Т. 5. С. 4581–4891. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5>.
55. Папаїка Ю.А., О.В. Берковський. Аналіз несинусоїдальності напруги в системі електропостачання ТОВ МЗ «Дніпросталь» при роботі потужної дугової сталеплавильної печі. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2015. № 94. С. 17-20.

56. Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності. *Гірничая електромеханіка та автоматика*. 2018. № 100. С. 25-30.

57. Power engineering and information technologies in technical objects control: 2016 annual proceedings / Edited By Genadiy Pivnyak, Olexandr Beshta, Mykhaylo Alekseyev. *CRC Press Taylor & Francis Group*, 2020. 294 P. ISBN 978-0-367-73640-8.

58. Папаїка Ю.А. Жежеленко І.В., Лисенко О.Г. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності. *Гірничая електромеханіка та автоматика*. 2018. № 100. С. 25-30.

59. Гриб О. Г. , Сиротин Ю. О., Гапон Д. А., Дяченко А. В., Иерусалимова Т. С., Бортніков О. В. Аналіз споживання електроенергії з контролем якості в розподільних мережах. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки*. Харків. ХНТУГС. 2015. С. 9–10.

60. Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А. Лисенко О.Г., Родна К.С. Застосування індивідуальних графіків вищих гармонік в задачах електромагнітної сумісності та енергоефективності гірничих підприємств. *Гірничая електромеханіка та автоматика*. 2019. № 101. С. 3-7.

61. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. Інститут електродинаміки НАН України. Київ. Ін-т електродинаміки НАН України. 2016. 400 с.

62. Janik P. Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw. 2014.

63. Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system. *Higher Education Press and Springer-Verlag* .Berlin Heidelberg. 2017. DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.

64. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник. Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. Д. Національний гірничий університет. 2009. 376 с.
65. Kowalski Z. *Jakosc energii elektrycznej*. Lodz. 2007. 620 p.
66. Papaika Y., Lysenko O., Kosobudzki G. Power Quality and Resonances in Power Supply Systems with non-sinusoidal Loads. *Advanced engineering forum*. Trans Tech Publication. Switzerland. 2017. P. 143-150.
67. Quality of electric power supply systems in Polish Transmission Systems. Overview of domestic and international contracts and requirements for system connectivity and transmission services. University of Mining and Metallurgy (AGH) Krakow. 2002.
68. Gryb O.G., Gapon D. A., Borodin D.V., Diachenko A.V., Ierusalimova T.S. Monitoring of electrical energy on the traction substation input. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків. НТУ «ХПІ». 2015. № 5. С. 61–65.
69. Kim T., Wang A., Powers E.J., Grady W.M., Arapostathis A. Detection of Flicker Caused by High-frequency Interharmonics. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.* Warsaw. Poland, 5 p. May 1-3. 2007.
70. Santoso S. & Hansen D. Practical solution for broadband and timevarying interharmonic problems. *IEEE Trans. Power*. vol. 22. no. 2. pp. 1228–1234.
71. Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids. London. Springer. 2017, 198 p.
72. Papaika Yu., Pivnyak G., Zhezhelenko I. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise power supply. *Науковий вісник НГУ*. 2016. № 5. С. 62-66.
73. Carbone R., Rosa F. D., Langella R. and Testa A. A new approach to model AC/DC/AC conversion systems. *IEEE Trans. Power Del.* vol. 20, no. 3. pp. 2227–2234, Jul. 2005.

74. Папаїка Ю.А. Рогоза М.В., Лисенко О.Г. Проблеми електромагнітної сумісності в задачах надійності та ефективності електропостачання з урахуванням тенденцій концепції Smart Grid. *Вісник Кременчуцького Національного Університету імені Михайла Остроградського*. 2018. 111. С. 16-22.

75. Energy losses withing the electric equipment in terms of poor voltage quality. Параїка Yu. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Випуск 1/2019 (114). – Кременчук: КрНУ. – 2019. – С. 9-13.

76. MATLAB Documentation — mathworks.com.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>

77. D.R. Kiran. Total Quality Management. 2017.

78. Advantages of application AC current thyristor converters in control circuits of electric traction drive of the no-contact electric mining locomotives. Pivnyak G. та ін. *Scientific Reports on Resource Issues (Volume 1)*. International University of Resources. Freiberg, Germany. 2014. P. 184-192.

79. В. Степаненко, А. Замулько, Ю. Веремійчук, і В. Находов, “Оцінювання ризику інтеграції відновлюваних джерел енергії в систему електропостачання,” *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 2, лип. 2022, doi: 10.20535/1813-5420.2.2022.261372.

80. Erdiwansyah, Mahidin, H. Husin, Nasaruddin, M. Zaki, and Muhibbuddin, “A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies,” *Prot Control Mod Power Syst*, vol. 6, no. 1, p. 3, Dec. 2021, doi: 10.1186/s41601-021-00181-3.

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації
та відомості про апробацію результатів

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Публікації у фахових виданнях:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М. (2024). Визначення показників якості напруги у промислових системах електропостачання при обмеженій потужності енергосистеми. *Науковий журнал «Електротехніка та Електроенергетика»*. Вип. №3. Запоріжжя. - с. 36-44. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-4>.
2. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Буртний Д.І., Малишко М.М., Леонов О.С. (2024). ВИКОРИСТАННЯ ОСНОВНИХ ТЕОРІЙ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРАХУНКАХ МЕРЕЖ ЗМІННОГО СТРУМУ ГІРНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА. Науково-технічний збірник «Електротехнічні та інформаційні системи». НТУ «ДП», - 2024. №106. - с. 36-44. <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-12>.
3. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., Буртний Д.І. (2025). Дослідження характеру аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств. *Науковий журнал «Електротехніка та Електроенергетика»*. Вип. №1. Запоріжжя. - с. 53-60. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-1-6>.
4. Удовик О.В., Папаїка Ю.А. (2025). Оцінка показників електромагнітної сумісності промислових систем електропостачання при обмеженні потужності енергосистеми. *Науково-технічний збірник «Збірник наукових праць Національного гірничого університету»*. НТУ «ДП». -№80. - с. 213-222. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.213>.

5. Удовик О.В., Рева В.С., Лисенко О.Г. Особливості створення систем контролю якості електроенергії у системах електропостачання космічних ракетних комплексів. *Науковий журнал «Електротехніка та Електроенергетика»*. Вип. №1. – 2025р. Запоріжжя - с. 32-41. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-1-4>.

6. Удовик О.В., Папаїка Ю.А. (2025). Аналіз неактивних складників повної потужності нелінійних та несиметричних навантажень промислових підприємств. Науково-технічний збірник «Електротехнічні та інформаційні системи». НТУ «ДП», – 2025. №107. - с. 24-28. <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-107-4>.

7. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., (2025). Аналіз особливих режимів промислових електричних мереж з ізольованою нейтраллю. *Науковий журнал «Електротехніка та Електроенергетика»*. Вип. №3. Запоріжжя. - с. 44-50. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-3-5>.

Праці апробаційного характеру

8. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., ОЦІНКА ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ. Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції "проблеми раціонального використання соціально-економічного, еколого-енергетичного, фінансово-інвестиційного потенціалу України та її регіонів в умовах воєнного стану", (м. Луцьк, 29 квітня, 2024 р.). – С. 67-71.

9. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., ОСОБЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ. INTERNATIONAL SCIENTIFIC- PRACTICAL CONFERENCE PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SCIENCE, EDUCATION AND TECHNOLOGY, (Aarhus, Denmark, 3 August, 2024). – p. 46-50.

10. Удовик О.В., Папаїка Ю.А., Буртний Д.І. Вплив несинусоїдальності напруги на ефективність роботи пристроїв корекції коефіцієнта потужності у потужних енерговузлах промислового навантаження. Семінар Наукової Ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики». Інститут Електродинаміки НАН України (11 вересня 2024).

11. Удовик О.В., Папаїка Ю.А. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ПІДСТАНЦІЙ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ ПРИ НЕЛІНІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ. III Науково-практична конференція Міжнародний форум: безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада (15 – 17 жовтня 2025 року), Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

ДОДАТОК Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Проректор Національного технічного
 університету
 «Дніпровська політехніка»
 д.т.н., професор Павличенко А.В.
 « 2 » лютого 2026 р.



ДОВІДКА

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи

Удовика Олександра Васильовича на тему:

«Електромагнітна сумісність промислових систем електропостачання в умовах обмеженої потужності енергосистеми»

Цим документом підтверджується впровадження результатів дисертаційної роботи *«Електромагнітна сумісність промислових систем електропостачання в умовах обмеженої потужності енергосистеми»* здобувача Удовика Олександра Васильовича в навчальний процес на кафедрі електроенергетики за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» двох освітніх рівнів – магістр та доктор філософії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» у наступних освітніх компонентах:

- у лекційному курсі «Електромагнітна сумісність систем електропостачання» використано методику розрахунку показників якості напруги при обмеженій потужності КЗ енергосистеми, запропонована Удовиком О.В.;

- у лекційному курсі «Інтелектуальне електропостачання Smart Grid у системах розподіленої генерації» під час розгляду та аналізу електричних режимів FACTS пристроїв використовуються запропоновані Удовиком О.В. підходи до аналізу резонансних явищ;

- у лекційному курсі «Наукові та інноваційні задачі електромагнітної сумісності» використано удосконалену Удовиком О.В. математичну модель визначення рівнів інтергармонік при роботі інверторів.

Завідувач кафедри
 електроенергетики, д.т.н., професор

 Юрій ПАПАЙКА



АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОД ФЕРОСПЛАВІВ»

вул. Електрометалургів, 310, м. Нікополь, Дніпропетровська область, Україна, 53200
тел.: (0566) 654-236, (0566) 696-123, (0566) 630-802(803)
e-mail: 01@nzf.com.ua, www.nzf.com.ua, код згідно з ЄДРПОУ 00186520

Від 05.02.26 № 47-4005

На № _____ від _____

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. головного енергетика

АТ «Нікопольський завод феросплавів

Малишко М.М.

« _____ » 2026 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Удовика Олександра Васильовича на тему:

«Електромагнітна сумісність промислових систем електропостачання в умовах обмеженої потужності енергосистеми»

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи Удовика О.В. були впроваджені у виробничу діяльність АТ «Нікопольський завод феросплавів», зокрема при аналізі показників електромагнітної сумісності у системі електропостачання підприємства при роботі феросплавних печей:

- у роботі розроблено цікавий підхід оціночного виявлення рівнів електромагнітних завад на різних рівнях розподілу електроенергії. Це дозволило швидко оцінювати показники електромагнітної сумісності при переході до післяаварійних схем живлення підприємства;
- розроблені у дисертаційній роботі аналітичні моделі визначення показників якості напруги при обмеженій потужності енергосистеми, дозволяють оцінити рівні вищих гармонік та струмів зворотної послідовності при трансформації системи електропостачання АТ «Нікопольський завод феросплавів» за децентралізованим принципом.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Удовика О.В. дозволило підвищити якість напруги та енергетичну ефективність роботи усєї системи електропостачання.

Від НТУ «ДП»:

Професор, д.т.н., завідувач кафедри електроенергетики

_____ Юрій ПАПАЙКА

Аспірант кафедри електроенергетики

_____ Олександр УДОВИК

026487

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
сонячної електростанції ТОВ
«АЛЬФА ЕНЕРДЖІ ГРУП»

Савченко Е.М.

«11» березня 2026 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Удовика Олександра Васильовича на тему:

«Електромагнітна сумісність промислових систем електропостачання в умовах обмеженої потужності енергосистеми»

Результати наукових досліджень у дисертації Удовика О.В. розкривають напрямки підвищення енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності промислових систем електропостачання при наявності джерел розподіленої генерації (сонячних електростанцій). Забезпечення відповідних рівнів електромагнітної сумісності при технологічних обмеженнях потужності енергосистеми є важливим питанням забезпечення стійкості та надійності вузлів навантаження.

За результатами досліджень встановлено, що для умов системи електропостачання промислового підприємства отримано закономірності, які пов'язують параметри резонансних процесів у вузлі навантаження 6–10-35 кВ з кількістю, потужністю та режимами інтелектуальних пристроїв FACTS і відрізняються від існуючих можливістю прогнозувати ділянки амплітудно-частотних характеристик з резонансними явищами при приєднанні до вузлів навантаження сонячних електростанцій. Такий підхід здобувача до вирішення вказаної проблеми є новим та обґрунтованим.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Удовика О.В. у електричну схему діючої сонячної електростанції дозволило підвищити якість напруги та виключити можливість виникнення небезпечних резонансів напруги.

Директор сонячної електростанції
ТОВ «АЛЬФА ЕНЕРДЖІ ГРУП»



Еліна Савченко

ДОДАТОК В

Результати моніторингу показників якості напруги

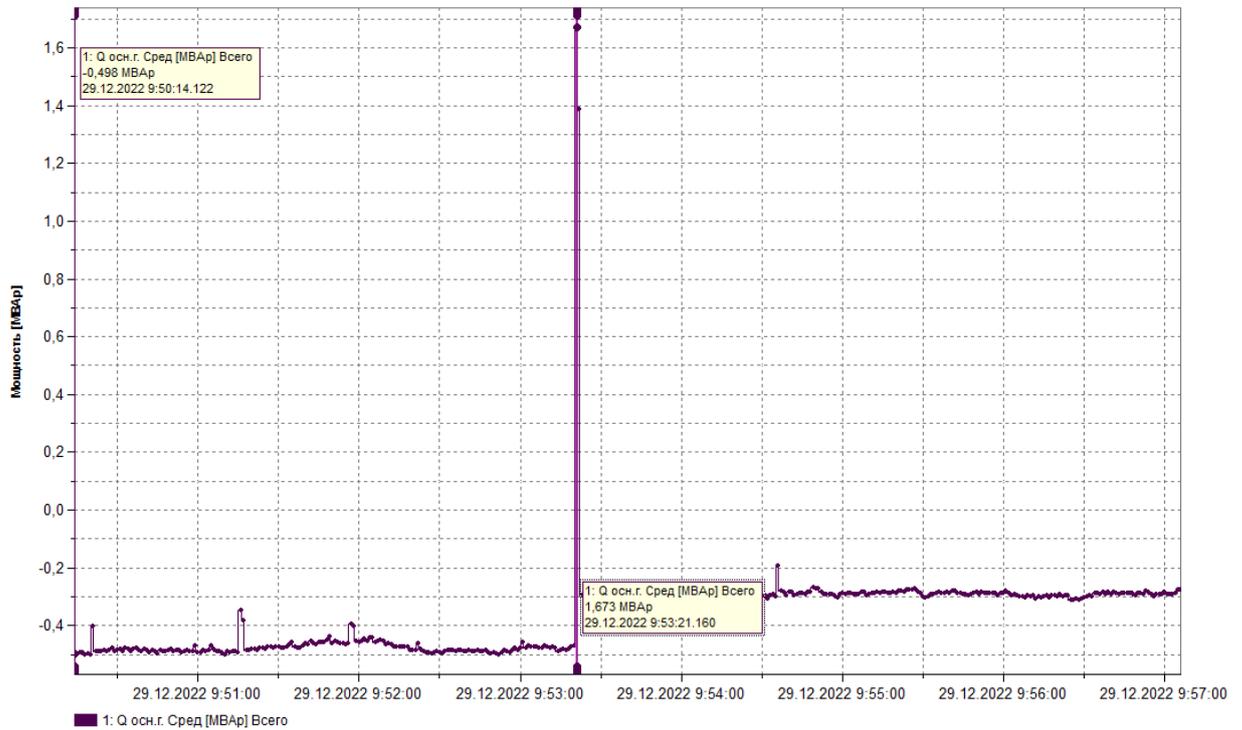


Рис. Д.В.1. Характеристика зміни реактивної потужності споживання при пуску двигуна насоса головного водовідливу вугільної шахти

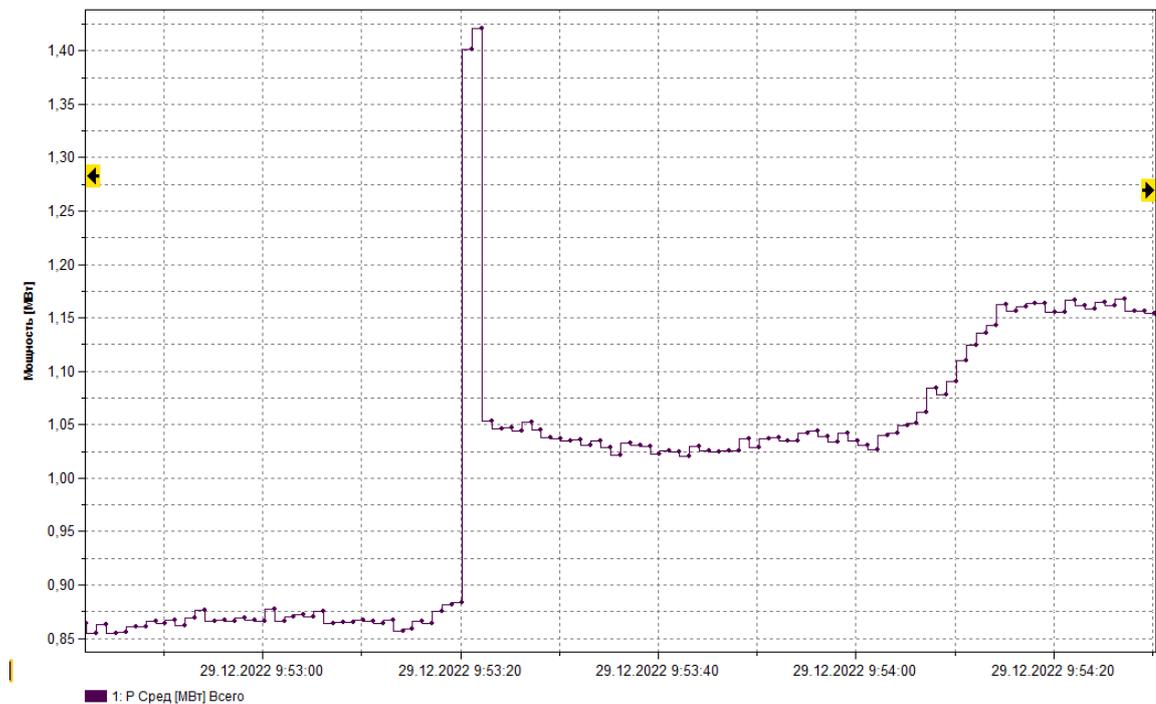


Рис. Д.В.2. Характеристика зміни активної потужності споживання при пуску двигуна насоса головного водовідливу вугільної шахти

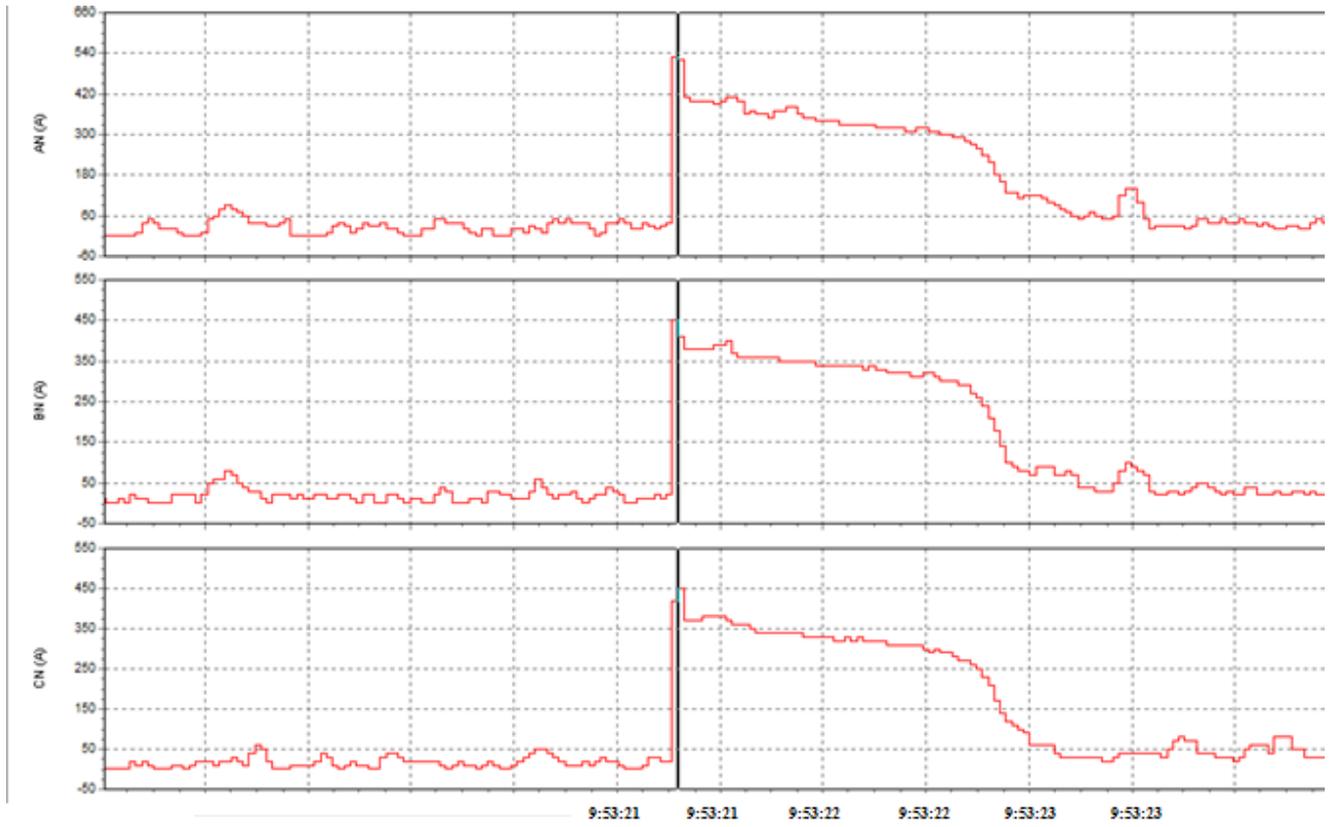


Рис. Д.В.3. Деталізована характеристика зміни пускового струму насоса за напівперіод промислової частоти

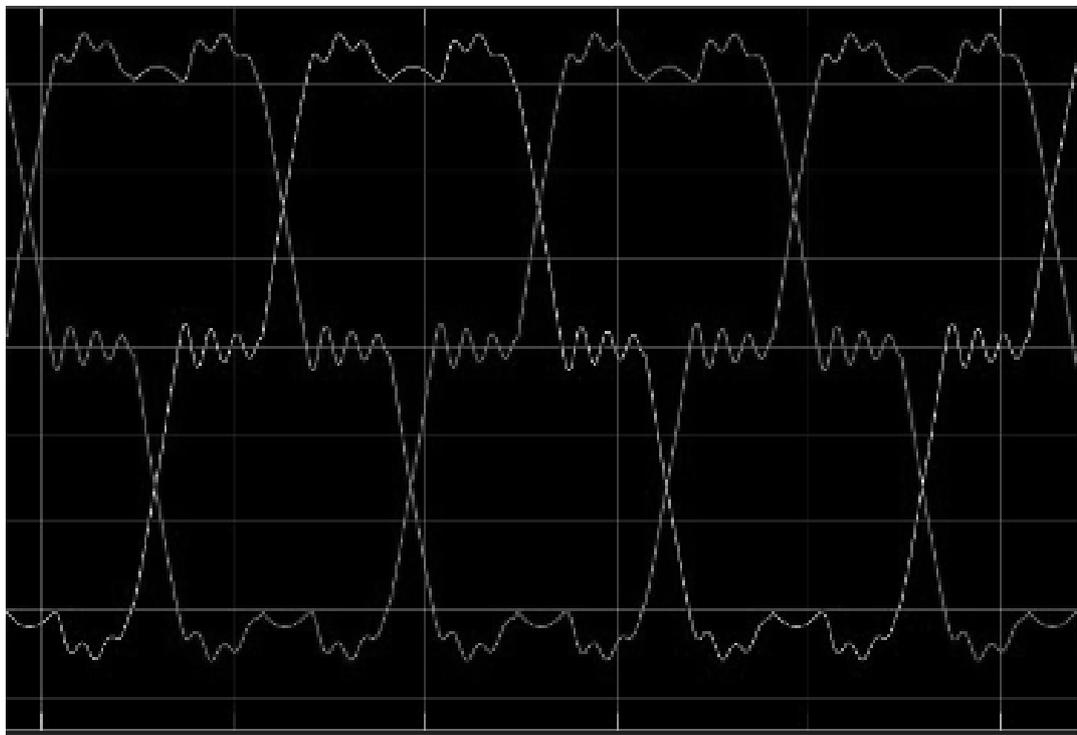


Рис. Д.В.4. Осцилограми струмів при роботі шахтної підйомної машини

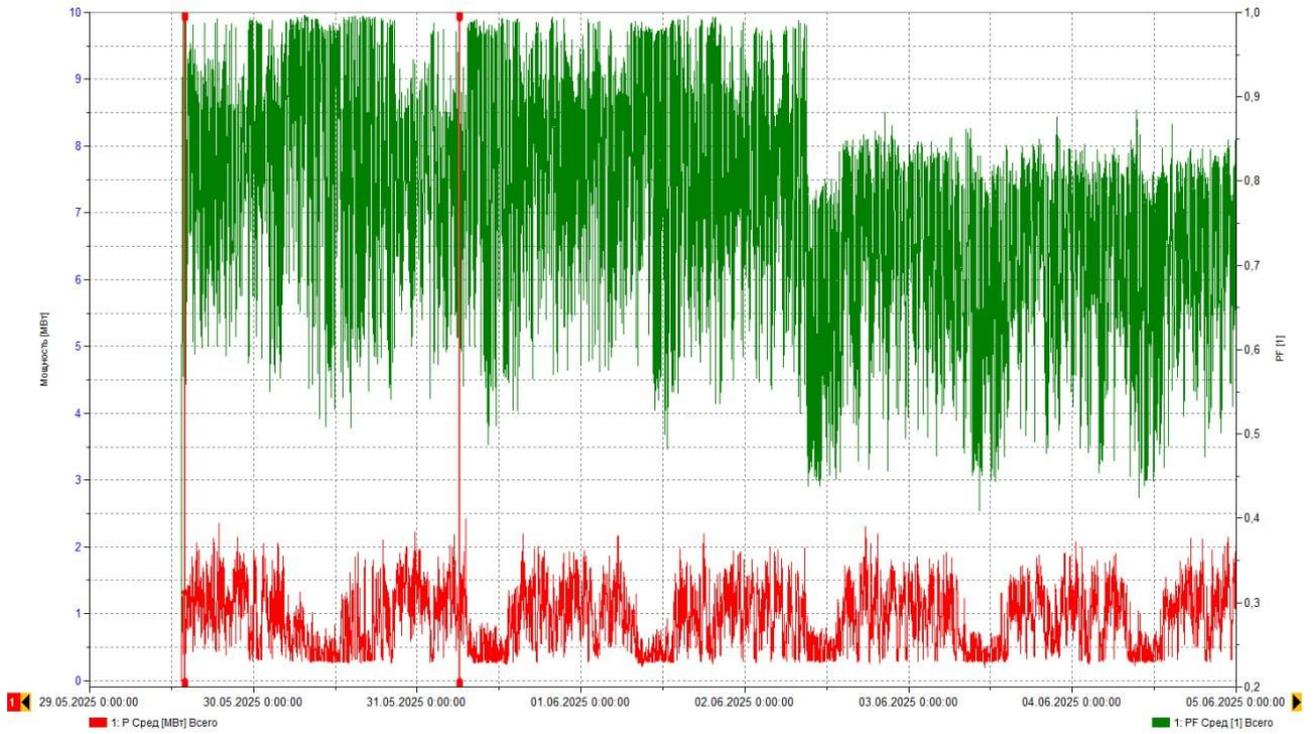


Рис. Д.В.5. Результаты экспериментального мониторингу Pcp та PF

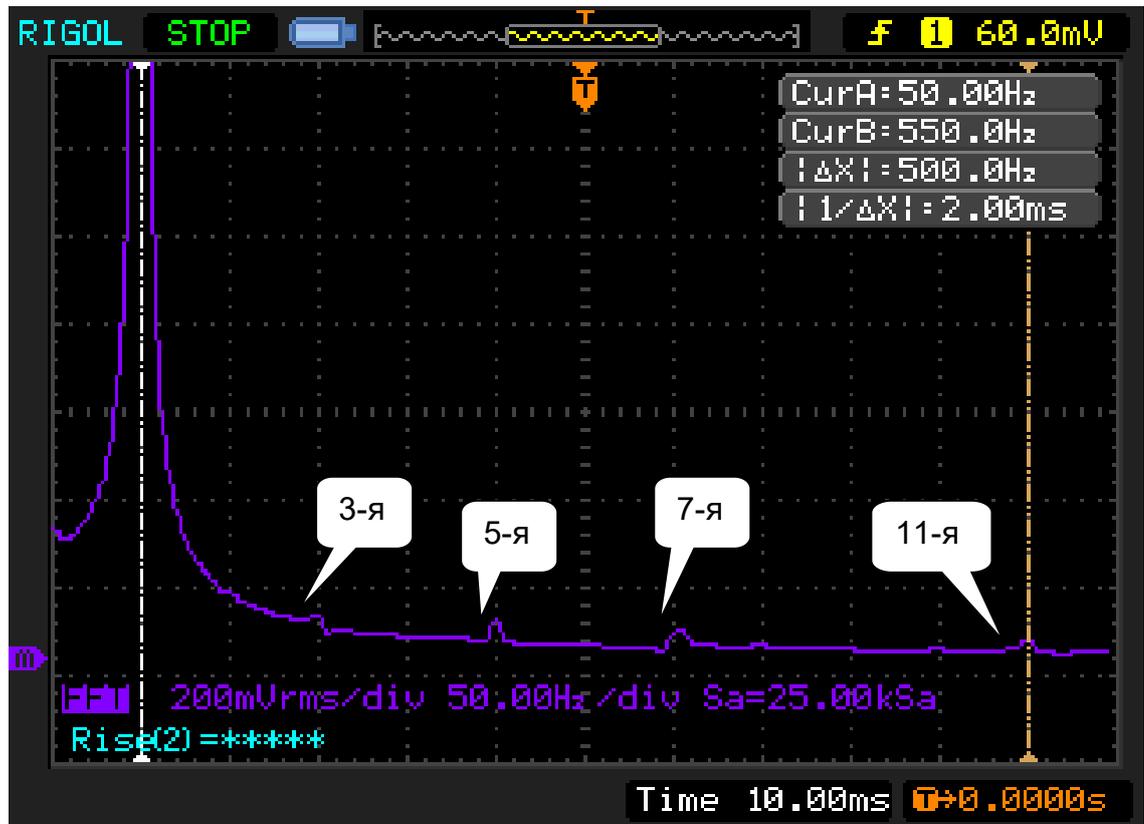


Рис. Д.В.6. Рівні вищих гармонік при роботі ДСП

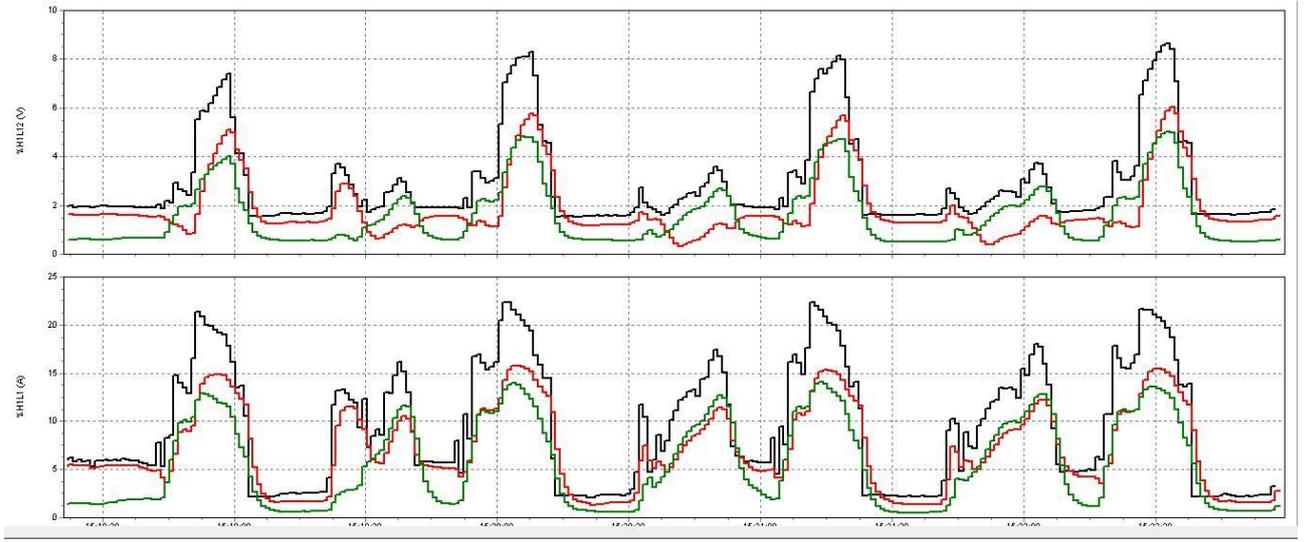


Рис. Д.В.7. Значення ВГ струмів та напруги при роботі вугільного підйому

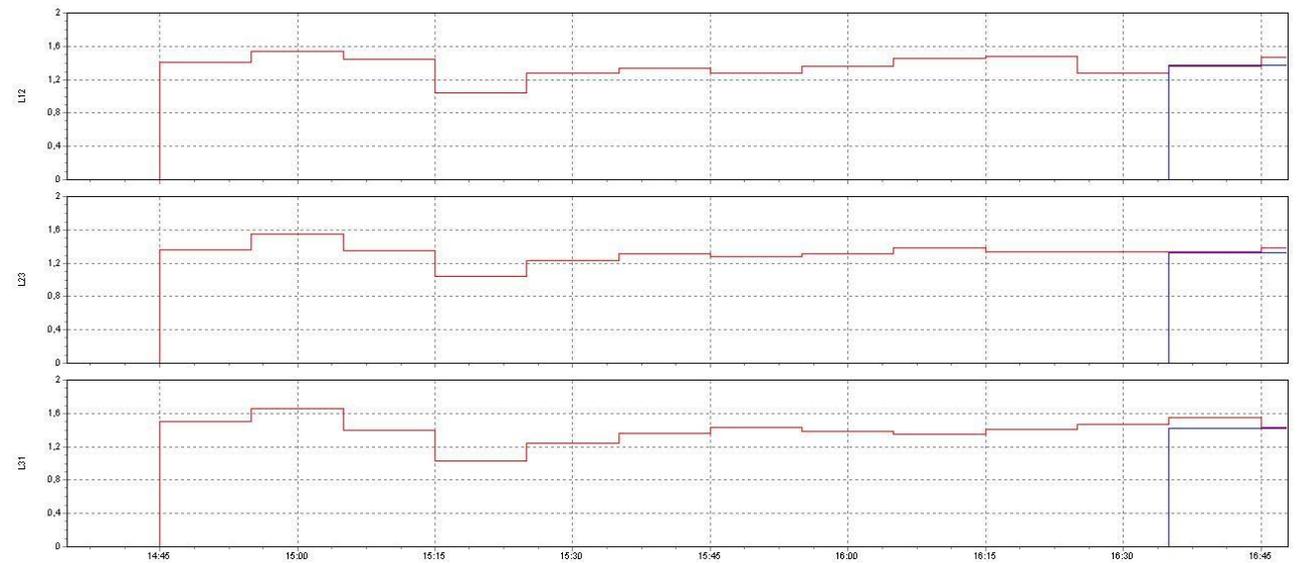


Рис. Д.В.8. Значення флікерів напруги при роботі вугільного підйому

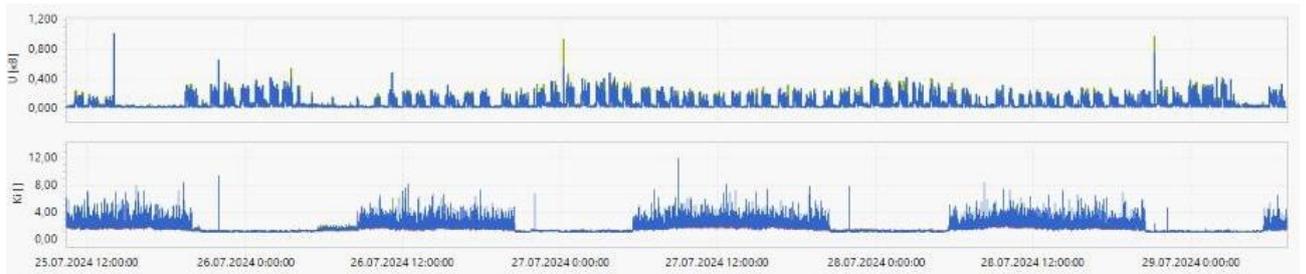


Рис. Д.В.9. Зміна K -фактора при електропостачанні феросплавних печей від вузла навантаження з ВДЕ

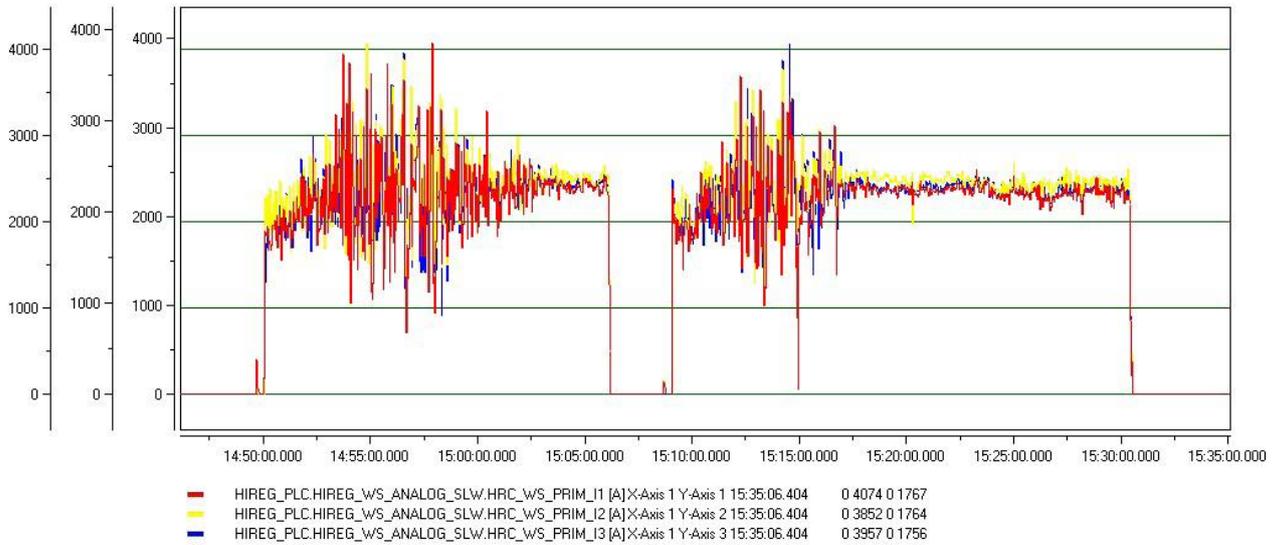


Рис. Д.В.10. Стохастичний характер зміни електричних режимів та несинусоїдальності струмів при роботі ДСП

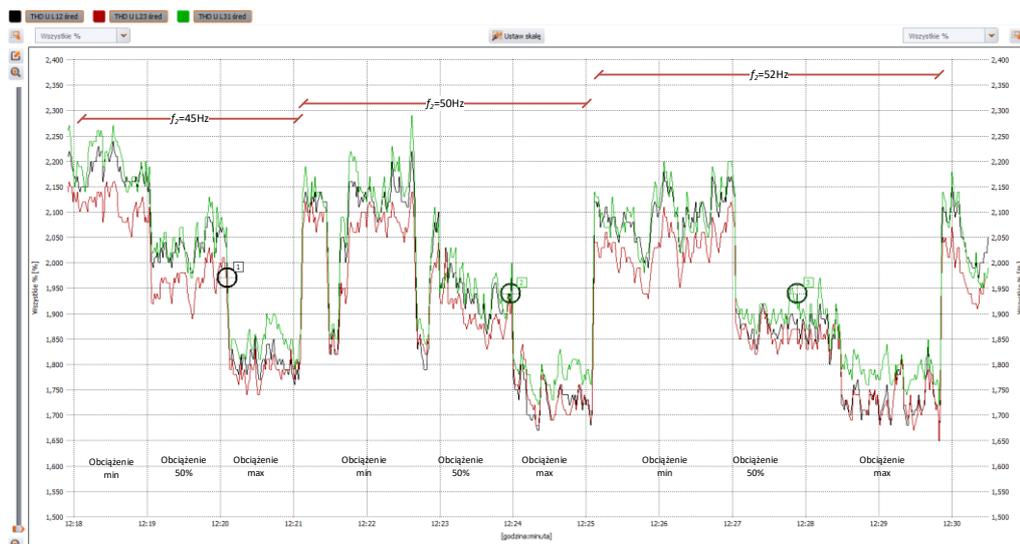


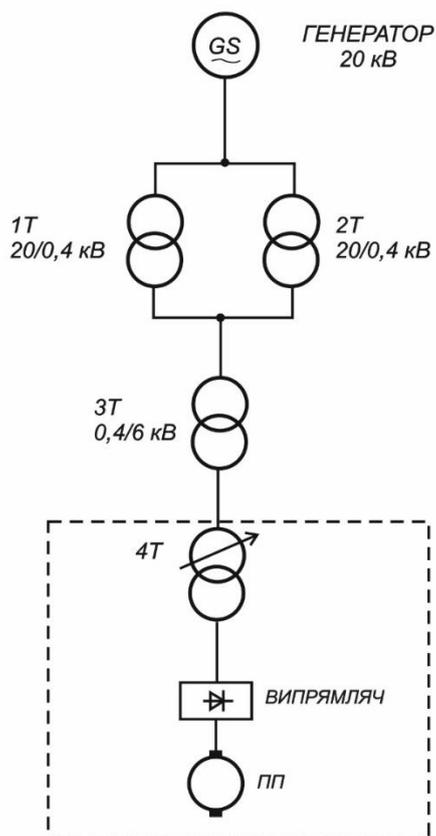
Рис. Д.В.11. Циклічні зміни коефіцієнта вищих гармонік при роботі перетворювачів частоти (режим S2 та S3)

ДОДАТОК Г

ПЕРЕЛІК

необхідних технічних рішень та досліджень електричних режимів
для впровадження у схему вугільної шахти ДГУ напругою 20 кВ

**СХЕМА ПРИЄДНАННЯ ДГУ
20 кВ для живлення підйомної машини**

**Технічні рішення:**

1.1. Перевірка технічних параметрів 1Т та 2Т, вибір та встановлення **ОДНАКОВИХ** коефіцієнтів трансформації. Ігнорування даного технічного параметра призведе до виникнення вирівнювальних струмів та додаткових втрат потужності та енергії у силових трансформаторах.

1.2. Вибір перетину кабелів для з'єднання генератора з паралельною групою трансформаторів 1Т-2Т по стороні 20 кВ.

1.3. Вибір перетину шинопроводів для з'єднання паралельної групи трансформаторів 1Т-2Т з трансформатором 3Т по стороні 0,4 кВ.

1.4. Перевірка шинопроводу 0,4 кВ на термічну та електродинамічну стійкість.

1.5. Розробка схемних рішень для приєднання 3Т до 4Т, вибір комутаційних апаратів та перетину кабельної лінії.

1.6. Визначення необхідних засобів релейного захисту, розрахунок струмів КЗ, вибір уставок спрацьовування терміналів захисту.

1.7. Розробка програми оперативних перемикачів для вводу ДГУ в роботу та повернення до нормальної схеми електропостачання.

СХЕМА аварійного електропостачання вугільної шахти з дизель-генераторною установкою

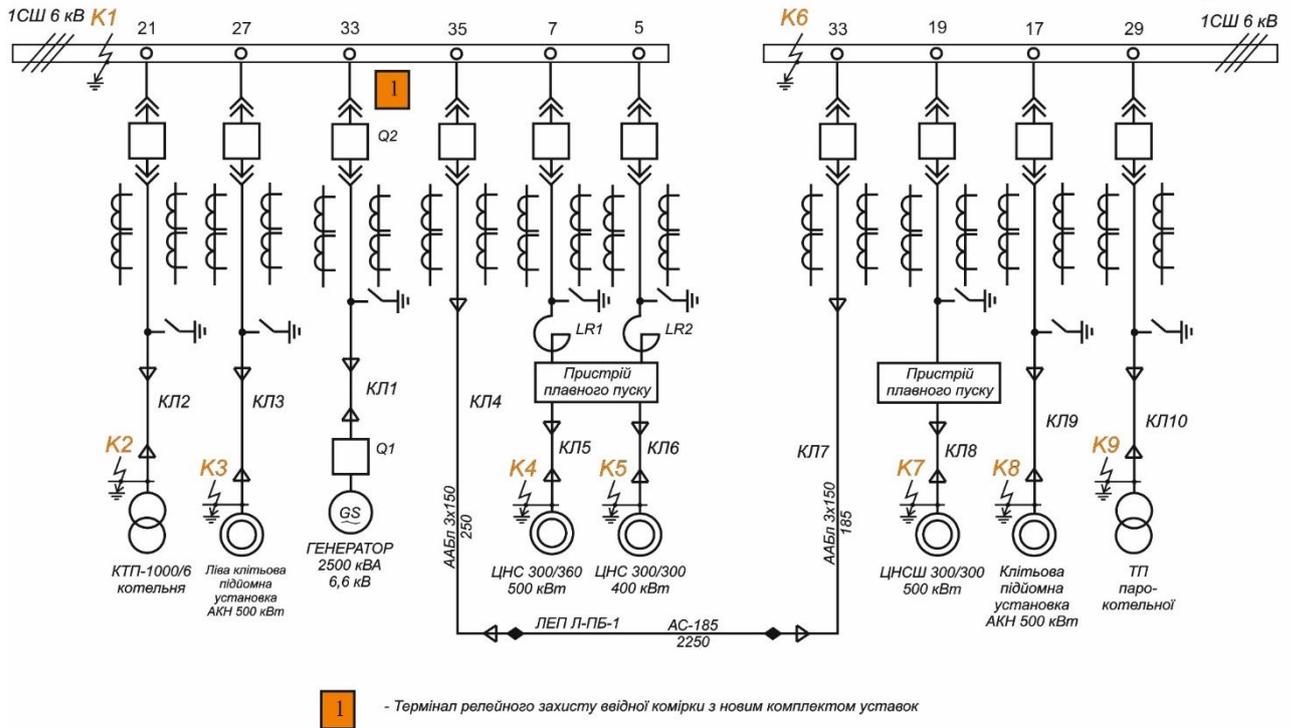


Рис. Д.Г.1. Схема електрична принципова для розрахунку струмів КЗ

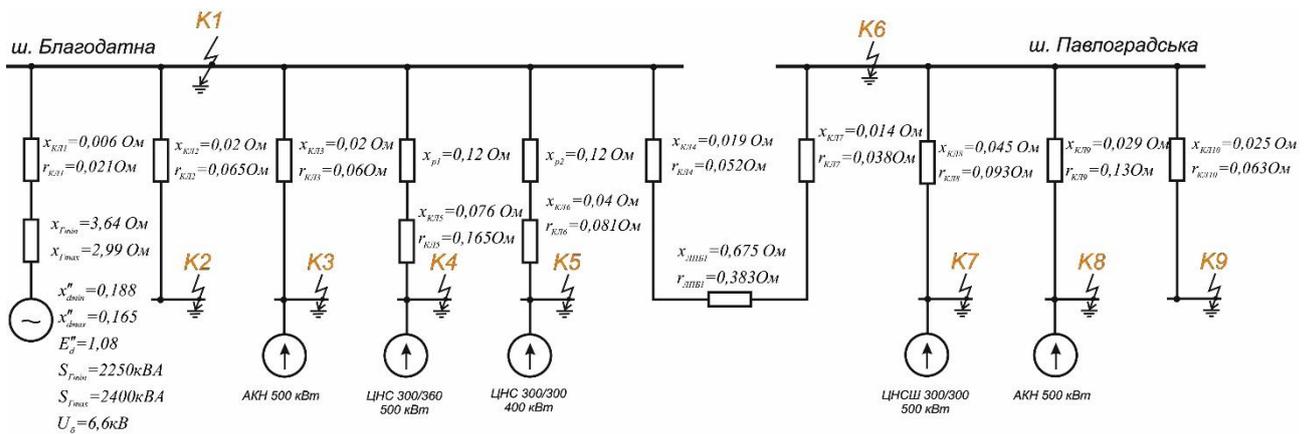


Рис. Д.Г.2. Схема електрична принципова для розрахунку струмів КЗ

1. Визначаємо опори елементів схеми заміщення:

- Опір генератора:

$$x_{\Gamma min} = x_{dmin}'' \frac{U_6^2}{S_{\Gamma min}} = 0,188 \frac{6,6^2}{2,25} = 3,64 \text{ Ом};$$

$$x_{\Gamma max} = x_{dmax}'' \frac{U_6^2}{S_{\Gamma max}} = 0,165 \frac{6,6^2}{2,4} = 2,99 \text{ Ом};$$

- Опір *КЛ1* – кабельна лінія від генератора до ввідної комірки:

$$x_{\text{КЛ1}} = x_{0\text{КЛ1}} L_{\text{КЛ1}} = 0,08 \cdot 0,08 = 0,006 \text{ Ом},$$

$$r_{\text{КЛ1}} = r_{0\text{КЛ1}} L_{\text{КЛ1}} = 0,26 \cdot 0,08 = 0,021 \text{ Ом},$$

$$\text{де } x_{0\text{КЛ1}} = 0,08 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}, \quad r_{0\text{КЛ1}} = 0,26 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

– питомий індуктивний та активний опір кабелю перетину 70 мм^2 , марка кабелю ВЕВБШв-6 3x70+1x10.

$$L_{\text{КЛ1}} = 0,080 \text{ км} – \text{довжина КЛ1.}$$

- Опір *КЛ2* – кабельна лінія до КТП-1000/6:

$$x_{\text{КЛ2}} = x_{0\text{КЛ2}} L_{\text{КЛ2}} = 0,08 \cdot 0,25 = 0,02 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ2}} = r_{0\text{КЛ2}} L_{\text{КЛ2}} = 0,26 \cdot 0,25 = 0,065 \text{ Ом.}$$

- Опір *КЛ3* – кабельна лінія до АКН-500 кВт:

$$x_{\text{КЛ3}} = x_{0\text{КЛ3}} L_{\text{КЛ3}} = 0,08 \cdot 0,23 = 0,02 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ3}} = r_{0\text{КЛ3}} L_{\text{КЛ3}} = 0,26 \cdot 0,23 = 0,06 \text{ Ом.}$$

- Опір *КЛ4* – кабельна лінія від комірки до переходу на повітряну лінію:

$$x_{\text{КЛ4}} = x_{0\text{КЛ4}} L_{\text{КЛ4}} = 0,074 \cdot 0,25 = 0,019 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ4}} = r_{0\text{КЛ4}} L_{\text{КЛ4}} = 0,206 \cdot 0,25 = 0,052 \text{ Ом.}$$

- Опір реактора РБ1:

$$x_{p1} = x_{p2} = x_{p4} = 0,12 \text{ Ом.}$$

- Опір *КЛ5* – кабельна лінія від реактора до РПП-6 кВ:

$$x_{\text{КЛ5}} = 0,087 \cdot 0,03 + 0,076 \cdot 0,875 + 0,078 \cdot 0,08 = 0,076 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ5}} = 0,52 \cdot 0,03 + 0,153 \cdot 0,875 + 0,194 \cdot 0,08 = 0,165 \text{ Ом.}$$

- Опір *КЛ6* – кабельна лінія від реактора до ЦПП-6 кВ:

$$x_{\text{КЛ6}} = 0,087 \cdot 0,03 + 0,076 \cdot 0,48 = 0,04 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ6}} = 0,52 \cdot 0,03 + 0,153 \cdot 0,48 = 0,081 \text{ Ом}$$

- Опір повітряної лінії:

$$x_{\text{ЛПБ1}} = x_{0\text{ЛПБ1}} L_{\text{ЛПБ1}} = 0,3 \cdot 2,25 = 0,675 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{ЛПБ1}} = r_{0\text{ЛПБ1}} L_{\text{ЛПБ1}} = 0,17 \cdot 2,25 = 0,383 \text{ Ом.}$$

- Опір *КЛ7* – кабельна лінія від переходу Л-ПБ-1 до комірки

$$x_{\text{КЛ7}} = 0,074 \cdot 0,185 = 0,014 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ7}} = 0,206 \cdot 0,185 = 0,038 \text{ Ом.}$$

- Опір *КЛ8* – кабельна лінія до ЦПП-6 кВ:

$$x_{\text{КЛ8}} = 0,087 \cdot 0,03 + 0,076 \cdot 0,55 = 0,045 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ8}} = 0,52 \cdot 0,03 + 0,153 \cdot 0,55 = 0,093 \text{ Ом.}$$

- Опір *КЛ9* – кабельна лінія до АКН-500 кВт:

$$x_{\text{КЛ9}} = 0,083 \cdot 0,35 = 0,029 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ9}} = 0,37 \cdot 0,35 = 0,13 \text{ Ом.}$$

- Опір *КЛ10* – кабельна лінія до КТП парокотельної:

$$x_{\text{КЛ10}} = 0,078 \cdot 0,326 = 0,025 \text{ Ом.}$$

$$r_{\text{КЛ10}} = 0,194 \cdot 0,326 = 0,063 \text{ Ом.}$$

2. Початкове значення періодичної складової струму КЗ у точці *К1*:

Режим мінімальних навантажень:

$$I_{\text{Пок1 min}} = \frac{E_*'' \cdot U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot z_{\text{екв1 min}}} = \frac{1,08 \cdot 6600}{\sqrt{3} \cdot 3,646} = 1128,7 \text{ А,}$$

де $E_*'' = 1,08$ – надперехідне значення ЕРС генератора [1].

Режим максимальних навантажень:

$$I_{\text{Пок1 max}} = \frac{E_*'' \cdot U_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot z_{\text{екв1 max}}} = \frac{1,08 \cdot 6600}{\sqrt{3} \cdot 2,996} = 1373,6 \text{ А.}$$

Значення струмів КЗ для точок 2-9 представлені у таблиці Д.Г.1.

Таблиця Д.Г.1 – Значення струмів КЗ у розрахункових точках

Розрахункова точка	Початкове значення періодичної складової струму КЗ <i>I_{по}</i> , А	
	<i>Режим мінімального навантаження</i>	<i>Режим максимального навантаження</i>
Точка <i>K1</i>	1128,7	1373,6
Точка <i>K2</i>	1122,3	1372,1
Точка <i>K3</i>	1070,9	1372,2
Точка <i>K4</i>	1121,1	1287,1
Точка <i>K5</i>	1080,9	1303,3
Точка <i>K6</i>	939,2	1101,3
Точка <i>K7</i>	927,3	1087,3
Точка <i>K8</i>	927,9	1084,6
Точка <i>K9</i>	930,7	1089,0