

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСБАЛАНСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО
НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЦІНКУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ
ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-
2

спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____ / Артем МЕЛЬНИЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Вячеслав МЕЛЬНИКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та

прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Артем МЕЛЬНИЧЕНКО

1. Тема «ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСБАЛАНСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЦІНКУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації, характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. Перелік умовних позначень. МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ БЕЗПЕЧНОГО ІСНУВАННЯ ІНДИКАТОРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ. Опис індикаторів оцінювання рівня енергетичної безпеки України. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСБАЛАНСУ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЦІНКУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ. Висновки. Список посилань

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 12 » _____ 10 _____ 2024 ____ р.

Керівник

(підпис)

Вячеслав МЕЛЬНИКОВ

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Артем МЕЛЬНИЧЕНКО

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Артем МЕЛЬНИЧЕНКО

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ
до магістерської роботи на тему
«ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСБАЛАНСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО
НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЦІНКУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ
ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОЗПОДІЛЬНИХ
МЕРЕЖ»

Артем МЕЛЬНИЧЕНКО

Магістерська робота виконана на 64 стор., містить 4 таблиці, 10 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 49 літературних посилань.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

Мета роботи – ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСБАЛАНСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЦІНКУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ.

Ступінь впровадження: проектні інститути.

Економічна ефективність значимість роботи: дана робота має високу значимість теоретичного й практичного рівня.

В рамках магістерської роботи проаналізовані причини та наслідки дисбалансу фаз у мережах НН та деякі рішення для їх пом'якшення, а також основні показники якості, які використовуються для оцінки дисбалансу напруги та струму або показників, на які впливає цей дисбаланс. Описане дослідження, проведене в цій роботі, щоб дослідити вплив профілів споживання на дослідження якості електроенергії, зокрема вплив дисбалансу навантаження низьковольтної розподільчої мережі на показники якості електроенергії.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДИСБАЛАНС ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, РОЗПОДІЛЬЧІ МЕРЕЖІ, ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА

ABSTRACT
to the master's thesis on the topic
"STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL LOAD
IMBALANCE ON THE ASSESSMENT OF ELECTRICITY QUALITY
WHEN ENSURING ENERGY SECURITY OF DISTRIBUTION
NETWORKS"
Artem MELNYCHENKO

The master's thesis is completed on 64 pages, contains 4 tables, 10 figures characterizing the results of the study, 49 literary references are used.

The object of the study is the operating modes of electrical networks.

The subject of the study is electrical networks.

The purpose of the work is STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL LOAD IMBALANCE ON THE ASSESSMENT OF ELECTRICITY QUALITY WHEN ENSURING ENERGY SECURITY OF DISTRIBUTION NETWORKS.

Level of implementation: design institutes.

Economic efficiency significance of the work: this work has a high significance of the theoretical and practical level.

The causes and consequences of phase imbalance in LV networks and some solutions for their mitigation are analyzed within the framework of the master's thesis, as well as the main quality indicators used to assess voltage and current imbalance or indicators affected by this imbalance. The study conducted in this work is described to investigate the impact of consumption profiles on the study of electricity quality, in particular the impact of load imbalance of the low-voltage distribution network on electricity quality indicators.

KEYWORDS: ELECTRICAL LOAD IMBALANCE, ELECTRICITY QUALITY, ENERGY SECURITY, DISTRIBUTION NETWORKS, ENERGY SECURITY

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ БЕЗПЕЧНОГО ІСНУВАННЯ ІНДИКАТОРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ	10
1.1. Опис індикаторів оцінювання рівня енергетичної безпеки України	10
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСБАЛАНСУ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЦІНКУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ	36
2.1. Аналіз публікацій по досліджувальній тематиці	36
2.2. Розбаланс фаз у розподільних мережах	38
2.2.1. Причини, наслідки та способи пом'якшення	38
2.2.2. Індикатори якості електроенергії дисбалансу фаз	40
2.3. Опис проведеного дослідження	43
2.3.1. Методологія дослідження	43
2.3.2. Моделювання зразкової мережі НН	45
2.3.3. Профілі споживання навантажень	49
2.4. Результати	49
2.4.1. Індикатори дисбалансу фаз	49
2.4.2. Індикатори якості напруги	53
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	57
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	58
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	59

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

BIGT – тиристори із ізольованим затвором

BIM – модель інжекції шини

BFM – модель розгалуженого потоку

BGCT – двомодові комутовані тиристори

CSC – перетворювач джерела струму

DT – динамічні тарифи

DPT – щоденні мережеві тарифи

DSO – оператор систем передачі електроенергії

HVDC – постійний струм високої напруги

LCC – лінійно-комутовані перетворювачі

MMC – модульні багаторівневі перетворювачі

MMK – модульний багаторівневий перетворювач

OPF – оптимальні потоки електроенергії

SOCR-OPF – опуклий конус другого порядку

VSC – перетворювач напруга-джерело

ЕМ – електричні мережі

ПС – підстанція

ВСТУП

Електроенергія, споживана побутовими споживачами, змінюється з часом і залежить від багатьох факторів, таких як характер навантажень компонентів і графік роботи кожного навантаження. Більшість цих навантажень є однофазними, наприклад, джерела світла, побутова техніка, системи кондиціонування повітря та електронні вироби, тоді як трифазні навантаження рідко зустрічаються в житлових приміщеннях. Щоденні профілі споживання різні для кожного клієнта та залежать від його/її повсякденної діяльності, тому характеризуються випадковістю та непередбачуваністю. Якість електроенергії в електричних мережах тісно пов'язана з профілями споживання електричних навантажень, тому дослідження якості електроенергії потребують інформації про споживання навантаження як вхідних даних, які також називаються даними про навантаження в цьому документі.

Дослідження якості електроенергії для розподільчих мереж є дуже важливими для майбутнього розширення мережі, яке реалізують комунальні компанії, тому точність таких досліджень має вирішальне значення. Дані про навантаження, включаючи інформацію про дисбаланс навантаження, у багатьох ситуаціях можуть мати значний вплив на правильну оцінку багатьох показників якості електроенергії. У цьому дослідженні досліджується вплив дисбалансу навантаження на кілька індикаторів дисбалансу фаз і показників якості напруги шляхом порівняння значень цих показників, розрахованих у дослідженні якості електроенергії з використанням, послідовно, різних наборів даних про навантаження, що характеризуються різними дисбалансами навантаження.

Результати цього дослідження підтверджують початкову гіпотезу, показуючи, що використання неточних профілів споживання для навантажень призводить до неточної оцінки деяких показників якості електроенергії. Крім того, результати підкреслюють складність апроксимації фактичних профілів споживання електричних навантажень, щоб ця апроксимація не вплинула на правильність оцінки дисбалансу фаз і показників якості напруги.

У зв'язку з цим метою цієї магістерської роботи є ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСБАЛАНСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЦІНКУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ БЕЗПЕЧНОГО ІСНУВАННЯ ІНДИКАТОРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ

1.1. Опис індикаторів оцінювання рівня енергетичної безпеки України

Індикатори енергетичної безпеки розроблені з урахуванням підходів, визначених Міжнародною енергетичною хартією, зокрема оцінювання ризиків інвестицій в енергетику EIRA. Вони повинні відповідати наступним вимогам:

1. Функціональність/прийнятність: орієнтація на реформи; відображення найкращих практик, які дозволяють країнам управляти ризиками; охоплення аспектів розробки та регулювання політики, що контролюється урядом.
2. Доступність даних: індикаторні дані доступні з надійних джерел, базуються на релевантних і легкодоступних даних, які можна легко збирати.
3. Вимірюваність: індикатори надають кількісну оцінку, на яку не впливають незначні зміни в методах їх побудови.
4. Порівнюваність: дозволяють порівняти стан в різних країнах, енергетичних підгалузях, ланцюгу вартості енергії; послідовні та порівнянні за часом.
5. Об'єктивність: точно відображають політику, регуляторну та правову реальність в країні.

Важливим є принцип неперервності, який передбачає коригування компонентів системи, індикаторів та їх порогових значень або введення додаткових індикаторів у разі отримання нових даних або розробки нових методів розрахунку важливіших індикаторів, які раніше не публікувалися державними органами статистики. За результатами аналізу чинників, що впливають на енергетичну безпеку, було відібрано 42 індикатори, описані нижче.

ВВП на душу населення. Стимулятор (S), який визначає рівень економічного розвитку країни. Всі показники для порівняння виражаються у доларах США. Перерахунок з національних валют у долари здійснюється за ринковими або офіційними обмінними курсами валют. Він розраховується як відношення номінального ВВП до середньої чисельності населення країни за даними Держстату України.

З точки зору системного підходу, цей індикатор характеризує цілісну систему в контексті інших конкурентних систем, а також "розмір" країни за її потенціалом споживання енергоресурсів при досягнутому рівні соціально-економічного та технологічного розвитку.

Для визначення вектора порогових значень використано вибірку значень цього індикатора для 68 країн ЄС та світу за даними МВФ і Світового банку за 2015 рік, розраховану за допомогою методу t-критерію.

Поточне значення індикатора ВВП на душу населення в Україні станом на 2018 рік за різними оцінками становить 3-4 тисячі доларів США на особу (для дослідження прийняте значення 3,09 тисяч доларів США на особу). Цільове значення індикатора визначено з урахуванням ВВП розвинених країн, близьких Україні за рівнем ресурсів (переважно людських), і становить середину гомеостатичного плато (оптимального діапазону) – 35 тисяч доларів США на особу.

Енергоспоживання на душу населення. Стимулятор (S), оскільки характеризує рівень життя в країні. За системним підходом індикатор є показником, що відображає цілісний стан системи з точки зору більшої системи. Цей індикатор характеризує рівень добробуту та технологічного розвитку країни, свідчить про споживчий потенціал населення країни з точки зору енергоспоживання.

Динаміка індикатора визначається за даними Держстату України. Для порівняння з іншими країнами використані дані МЕА. Поточне значення індикатора енергоспоживання на душу населення (т.н.е./рік) в Україні станом на 2018 рік дорівнює 2 т.н.е./рік на особу. Цільове значення індикатора

визначено, виходячи із значень енергоспоживання країн з подібними природно-географічними та економічно-технологічними параметрами розвитку, і становить середину оптимального діапазону – 4,7 т.н.є./рік.

Споживання електроенергії на душу населення. Стимулятор (S), оскільки характеризує рівень життя в країні. З точки зору системного підходу цей індикатор відображає процесуальність системи. Він є відображенням процесу організації забезпечення енергетичних потреб населення, що свідчить про рівень економічного та технологічного розвитку країни, доступність сучасних технологічних пристроїв для населення.

Динаміка індикатора визначається за даними Держстату України, а для порівняння з іншими країнами використані дані МЕА. Поточне значення індикатора споживання електроенергії на душу населення (МВтгод/рік на особу) в Україні станом на 2018 рік дорівнює 3,1 МВтгод/рік на особу. Цільове значення індикатора визначено відповідно до значень енергоспоживання країн з подібними природно-географічними та економічно-технологічними параметрами розвитку і становить середину оптимального діапазону – 7,25 МВтгод/рік на особу.

Рівень витрат на житлово-комунальні послуги для одного домогосподарства визначає частку витрат на житлово-комунальні послуги (як послуги першої необхідності, що забезпечують основні потреби населення та впливають на рівень його життя) у загальних ресурсах домогосподарства. Цей показник вважається дестимулятором (D), оскільки постійне зростання тарифів на житлово-комунальні послуги без урахування реальних доходів населення та їх динаміки призводить до зростання соціальної напруги в суспільстві. Динаміка індикатора визначається за даними Держстату України. Вектор порогових значень визначений експертним шляхом.

З точки зору системного підходу, цей індикатор відображає функціонування системи та характеризує ефективність організації економічних відносин і забезпечення якості життя населення. Неефективність економічних

відносин та систем енергозабезпечення призводить до високих витрат на енергопостачання домогосподарств у відношенні до їх доходів.

Станом на 2018 рік, поточне значення індикатора рівня витрат на житлово-комунальні послуги складає 12,88% від сукупних ресурсів домогосподарств. Цільове значення індикатора, визначене на рівні 8,5%, базується на загальносвітовому розподілі добробуту у країнах з подібним рівнем розвитку і відповідає оптимальному діапазону (гомеостатичному плато). Варто також враховувати, що в Україні є значна група людей, зокрема пенсіонерів, для яких рівень витрат на житлово-комунальні послуги суттєво перевищує поточне значення індикатора.

Частка енергетики у ВВП вважається дестимулятором (D), оскільки високий відсоток енергетики у ВВП притаманний неефективним економікам з низькою доданою вартістю. Вона обчислюється як відношення суми валової доданої вартості (ВДВ) галузей ПЕК (добувна промисловість і розроблення кар'єрів, постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря, водопостачання, каналізація, поводження з відходами) до ВВП України.

Для визначення порогових значень цього індикатора використовується вибірка даних Держстату України за період 2000-2018 років, розрахована методом t-критерію.

З точки зору системного підходу, цей індикатор відображає загальний стан економічної системи, характеризуючи її ефективність та залежність від світових цін на енергоресурси, враховуючи потенціал видобувних енергоресурсів країни.

Станом на 2018 рік частка енергетики у ВВП становила 9,45%. Цільове значення індикатора, визначене на рівні 8,6%, базується на проєктному баченні бажаної структури економіки України, яка позиціонується як споживач енергоресурсів, і відповідає оптимальному діапазону.

Вартість витрат енергоресурсів для країни вважається дестимулятором (D), оскільки висока частка витрат на енергоресурси у ВВП притаманна неефективним економікам із низькою доданою вартістю. Цей показник

обчислюється як відношення суми вартісного еквівалента споживання палива галузей ПЕК (добувна промисловість і розроблення кар'єрів, виробництво коксу та продуктів нафтоперероблення, постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря) з таблиць «витрати – випуск» у цінах споживачів Держстату України до ВВП країни у відсотках. Вектор порогових значень визначається експертним шляхом.

З точки зору системного підходу, цей індикатор відображає процес формування адекватної економічної моделі та організації економічних відносин в Україні, показуючи, наскільки потреби в енергоресурсах є тягарем для економічного розвитку країни.

Поточне значення індикатора вартості витрат на паливно-енергетичні ресурси (ПЕР) у 2018 році становить 28,84% від ВВП. Цільове значення цього індикатора було визначено на рівні 25% від ВВП з урахуванням проєктного бачення майбутньої структури економіки України та рівня економічного розвитку, і воно відповідає оптимальному діапазону (гомеостатичному плато).

Енергоємність ВВП є дестимулятором (D) і є узагальнювальним макроекономічним показником, що визначає рівень витрат паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виробленого валового внутрішнього продукту. Це один з фундаментальних показників для економіки кожної країни.

Цей індикатор обчислюється як відношення загального обсягу споживання паливно-енергетичних ресурсів виробничими та невиробничими секторами до ВВП країни за певний період. Вимірюється в нафтовому еквіваленті (т.н.е.). Для розрахунку енергоємності ВВП з метою мінімізації впливу грошової емісії та валютних коливань часто використовують ВВП за паритетом купівельної спроможності (ПКС) у доларах США, згідно з даними Держстату України.

Цей індикатор характеризує ефективність перетворення залучених енергоресурсів у добробут країни, відображаючи взаємовідносини між елементами економічних відносин, виробничих процесів та процесу енергозабезпечення. З точки зору системного підходу, він відображає

процесуальність системи. Водночас, він також може слугувати характеристикою, що відображає цілісний стан системи з точки зору більшої системи.

Для визначення порогових значень цього індикатора використовували вибірку даних Світового банку для 11 країн ЄС та світу за період 2010–2017 років, розраховану методом t-критерію.

Станом на 2018 рік, поточне значення індикатора енергоємності ВВП становило 0,269 т.н.е./1000 дол. США. Цільове значення індикатора, визначене на рівні 0,1 т.н.е./1000 дол. США, базується на значеннях подібних за рівнем розвитку країн і проєктному баченні майбутньої структури економіки країни, що відповідає оптимальному діапазону (гомеостатичному плато).

Рівень інвестування підприємств паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) є стимулятором (S) і слугує основою довгострокової економічної динаміки ПЕК та процесу розширеного суспільного відтворення. Він обчислюється як відношення капітальних інвестицій до випуску паливно-енергетичного комплексу. Зазвичай рівень інвестування визначається відносно ВВП або валової доданої вартості (ВДВ) для видів економічної діяльності. Це підходить для країн, де рівень тіньової економіки не перевищує 10–20%. У країнах із тіньовою економікою понад 40% ВВП занижено через штучне збільшення проміжного споживання, що зменшує ВВП. Тому відношення капітальних інвестицій до зменшеного ВВП (ВДВ) може давати хибне уявлення про достатність інвестицій. Для відображення реальної ситуації доцільно використовувати відношення інвестицій до випуску, що є сумою проміжного споживання та ВВП (або ВДВ).

З точки зору системного підходу, цей індикатор відображає процес розвитку та технологічного переоснащення енергетики відповідно до вимог споживачів і часу. Він характеризує систему політико-економічних відносин, що визначають інвестиційну привабливість енергетики для інвесторів.

Для визначення порогових значень індикатора використано вибірку даних Держстату України та Євростату для 12 економічно розвинених країн ЄС за період 2010–2017 років, розраховану методом t-критерію.

Станом на 2018 рік, рівень інвестування підприємств ПЕК становив 11,12%. Цільове значення цього індикатора (13,7%) визначене на основі світових тенденцій щодо рівня інвестування в енергетику і відповідає оптимальному діапазону.

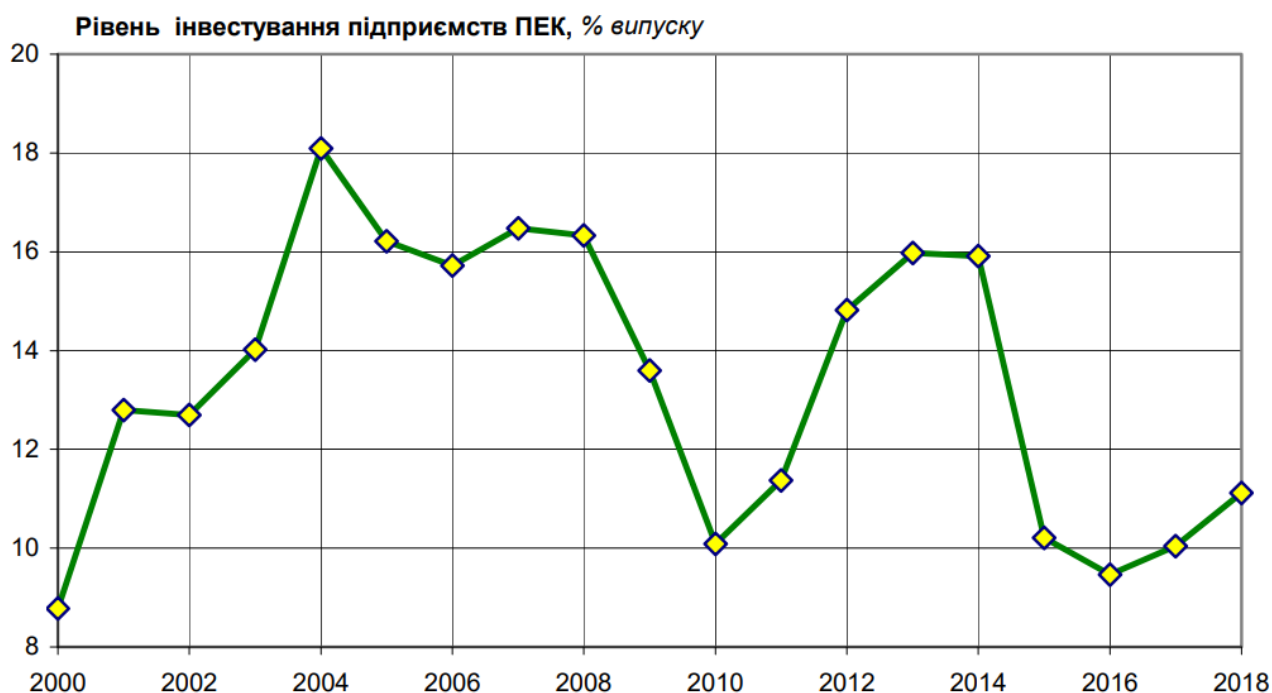


Рисунок 1.1. – Динаміка рівня інвестування підприємств ПЕК у період із 2000 до 2018 рр

Рівень оновлення основних засобів ПЕК. Індикатор є стимулятором (S) та визначає ефективність оновлення основних засобів за рахунок інвестицій.

Визначає ефективність оновлення основних засобів за рахунок інвестицій. Розраховується відношенням капітальних інвестицій у добувну промисловість (добування паливно-енергетичних корисних копалин), у постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря, а також у водопостачання; каналізацію, поводження з відходами до відповідного обсягу основних засобів підприємств ПЕК. Як відомо, капітал, що використовується в поточному періоді, формується у попередньому періоді, тобто з урахуванням

дефлятора ВВП, вибуття та оновлення основних засобів [2].

З точки зору системного підходу цей індикатор відображає процесуальність системи. Він характеризує привабливість енергетичних активів для їх власників, а також ураховує стабільність економічної системи, прогнозованість розвитку економіки й енергетики та захищеність прав інвесторів.

Поточне значення індикатора рівень оновлення основних засобів ПЕК станом на 2018 р. становило 2,8 %. Динаміка індикатора за період з 2000 р. відображена на рисунку 1.2. Цільове значення індикатора (8%) визначене відповідно до світових тенденцій щодо рівня інвестування в енергетику та відповідає середині оптимального діапазону.

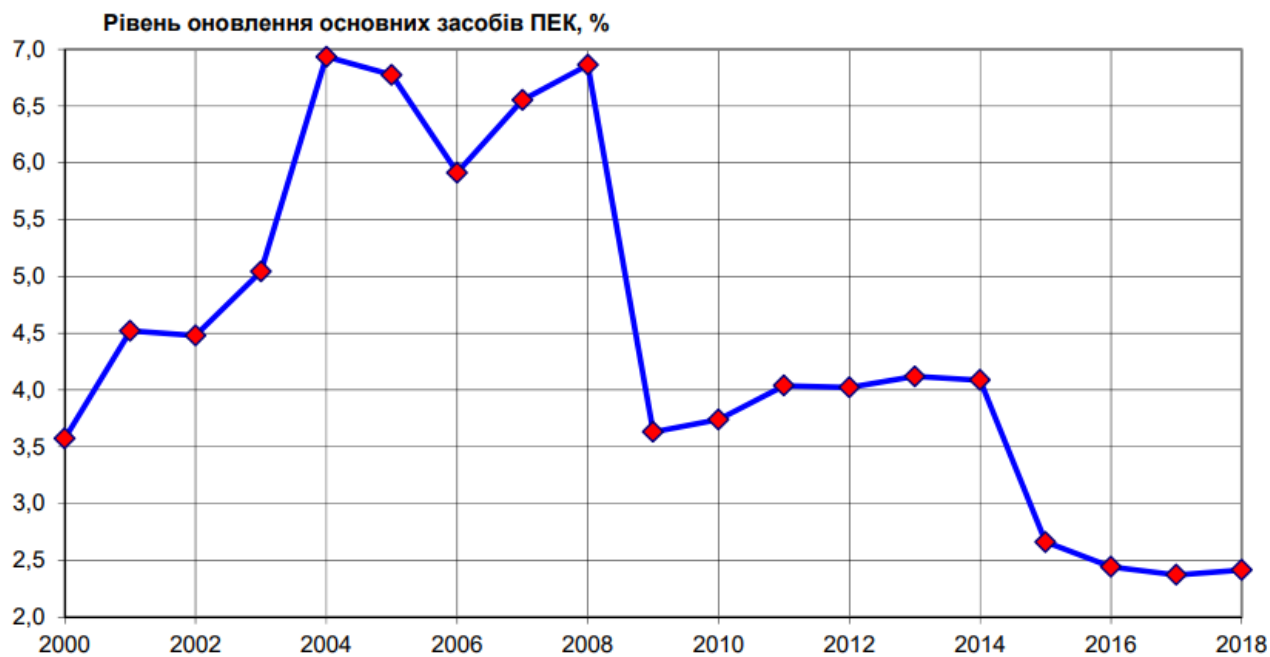


Рисунок 1.2. – Динаміка оновлення основних засобів ПЕК в Україні у період із 2000 до 2018 рр

Для визначення вектора порогових значень використано вибірку значень цього індикатора за даними Євростату для шести економічно розвинених країн ЄС (Німеччина, Франція, Італія, Угорщина, Нідерланди, Португалія) за період 2012–2017 рр. та розрахововано за методом t-критерію.

Рівень тінізації ПЕК. Індикатор визнаний дестимулятором (D) та

визначає частку ВДВ ПЕК, яка не враховується Держстатом України та є додатком до офіційної ВДВ. Розраховується відношенням обсягу тіньової ВДВ ПЕК до обсягу офіційної ВДВ ПЕК у відсотках. Обсяг тіньової ВДВ ПЕК розраховується методом соціальної справедливості [2] за допомогою моделі загальної економічної рівноваги «Альфа».

З точки зору системного підходу цей індикатор відображає процесуальність системи. Індикатор характеризує суспільно-політичні та економічні відносини, що формують процеси узгодження цілей суб'єктів управління та елементів системи, привабливість системи для тіньової (корупційної) діяльності.

Враховуючи закономірність ряду чисел Фібоначчі, тобто принцип золотого перетину, та досвід 11 країн ЄС до значень індикатора «частка оплати праці у випуску» (0,2; 0,26; 0,32; 0,382), пов'язаного з рівнем тінізації за Ф. Шнайдером [2], можна визначити через макроекономічні зв'язки в моделі вектор порогових значень індикатора «рівень тінізації».

Поточне значення індикатора рівень тінізації ПЕК (% ВДВ ПЕК) станом на 2018 р. становить 42,295 %. Цільове значення індикатора (12,5 %) визначене з урахуванням світових тенденцій щодо стану в країнах, подібних за рівнем розвитку, та відповідає середині оптимального діапазону.

Рівень оплати праці у випуску ПЕК. Індикатор визнаний стимулятором (S), який визначає частку випуску ПЕК, що спрямовується на оплату праці найманих працівників з урахуванням нарахувань на фонд оплати праці. Розраховується в моделі сукупної пропозиції на базі виробничої функції Кобба – Дугласа.

З точки зору системного підходу цей індикатор відображає процесуальність системи. Індикатор характеризує соціально-економічні взаємовідносини в економічній сфері, і в енергетиці зокрема, що формують привабливість енергетичного сектору для кваліфікованого персоналу.

Порогові значення індикатора «рівень оплати праці у випуску» впливають із закономірностей ряду чисел Фібоначчі та досвіду економічно

розвинених країн ЄС58, а також розрахунків Ф. Шнайдера [2] (за даними Євростату, значення 0,26 та 0,32 відповідають мінімальному та максимальному значенням серед країн ЄС; 0,29 – середньому значенню).

Поточне значення індикатора рівень оплати праці у випуску ПЕК станом на 2018 р. становить 0,1526, % випуску ПЕК. Цільове значення індикатора (0,29) визначене відповідно до показників країн ЄС та проєктного бачення майбутнього політико-економічного розвитку країни, воно відповідає середині оптимального діапазону.

Рівень тіньового завантаження капіталу підприємств ПЕК. Індикатор визнаний дестимулятором (D), він визначає відсоток основних засобів підприємств ПЕК, задіяних у виробництві тіньової ВДВ.

З точки зору системного підходу цей індикатор відображає процесуальність системи. Індикатор характеризує суспільно-політичні відносини, які зумовлюють непрозорість економічних відносин, що визначають привабливість системи для тіньової (корупційної) діяльності.

Розраховується в моделі сукупної пропозиції як складової частини макроекономічної моделі «Альфа» через обчислення коефіцієнта завантаження капіталу за наявності та відсутності тіньової економіки. Отже, коефіцієнт тіньового завантаження капіталу обчислюється як різниця між двома вимірами завантаження капіталу [2].

Очевидно, що рівень тіньового завантаження капіталу цілком залежить від рівня тінізації економіки, який пов'язаний зі значенням індикатора «частка оплати праці у випуску». Тому визначення вектора порогових значень індикатора «рівень тіньового завантаження капіталу» здійснюється через макроекономічні зв'язки в моделі загальної економічної рівноваги при різних значеннях частки оплати праці у випуску ПЕК (0,2; 0,26; 0,32; 0,382).

Поточне значення індикатора рівень тіньового завантаження капіталу (29,2 % від офіційного) наведене станом на 2018 р. Цільове значення цього індикатора (8,5%) визначене з оглядом на показники країн ЄС та відповідає середині оптимального діапазону.

Рівень тіньового споживання ПЕР. Індикатор визнаний дестимулятором (D), що визначає відсоток основних засобів підприємств ПЕК, задіяних у виробництві тіньової ВДВ. З точки зору системного підходу цей індикатор відображає процесуальність системи, а саме взаємодію між суб'єктами господарювання (виробниками та споживачами енергоресурсів) та органами державної влади, які формують привабливість системи для тіньової (корупційної) діяльності. Для розрахунку обсягів тіньового споживання ПЕР використовується модель макроекономічної рівноваги «Альфа» як основа методу розрахунку тіньової економіки [6463]. Первинними даними є дані Держстату України щодо вартості споживання ПЕР у гривневом еквіваленті для визначення частки цього споживання в офіційному проміжному споживанні. Використовуючи модельні розрахунки чистого проміжного споживання (без тіньової економіки), можна обчислити фактичне (чисте) споживання ПЕР, а різниця між обсягами загального та фактичного споживання ПЕР буде становити обсяг тіньового споживання ПЕР [2].

Порогові значення індикатора рівень тіньового споживання ПЕР слід пов'язувати з вектором порогових значень за значеннями індикатора «частка оплати праці у випуску» (0,2, 0,26, 0,32, 0,382) за допомогою макромоделі «Альфа».

Поточне значення індикатора рівень тіньового споживання ПЕР становить 10,7 % станом на 2018 р. Цільове значення індикатора (4 %) визначене з урахуванням показників країн ЄС, воно відповідає середині оптимального діапазону.

Концентрація ринків за індексом Герфіндаля – Гіршмана (за постачальниками). Індикатор є дестимулятором (D) та об'єктивним критерієм загрозливих для національної енергетики ситуацій на міжнародних ринках енергетичних ресурсів. Розраховується як сума квадратів часток ринку, що належать k-му постачальнику j-го енергетичного енергоносія [2].

З точки зору системного підходу цей індикатор відображає процесуальність системи. Зокрема, характеризує процес взаємодії

постачальників та споживачів на енергетичних ринках, що визначає легкість зміни постачальника, гнучкість постачання, конкурентність відносин в енергетиці. Вища конкуренція свідчатиме про створення стимулів до підвищення ефективності господарювання та встановлення мінімально можливих цін на ринках і недопущення зловживань монопольним становищем з боку окремого суб'єкта.

Для визначення вектора порогових значень використовується вибірка значень цього індикатора за даними Світового банку для 47 економічно розвинених країн ЄС та світу за період 2016–2018 рр. (залишені значення, що перевищують 3000), розраховується методом t-критерію.

Поточне значення індикатора концентрація ринків за індексом Герфіндаля – Гіршмана в Україні (2642) наведене станом на 2018 р. Цільове значення індикатора (1400) визначене згідно з показниками економічно розвинених країн ЄС і світу та відповідає середині оптимального діапазону.

Рівень залученості до ринків ЄС. Стимулятор (S), який свідчить про відповідність організації роботи ринків ПЕР в Україні вимогам конкурентної ринкової економіки. Поточна динаміка та вектор порогових значень розраховуються за експертними оцінками. З точки зору системного підходу цей індикатор характеризує цілісну систему, зокрема відображення її місця та ролі країни у взаємовідносинах із більшими системами. Для України цей індикатор відображатиме ступінь її взаємодії та взаємозалежності з більшим регіональним ринком (ЄС). Поточне значення індикатора рівень залученості до ринків ЄС (35 %) та цільове значення (55 %) визначені з урахуванням думок експертів щодо важливості співпраці в енергетичній сфері саме з країнами ЄС та поточного рівня торгівлі в енергетичній сфері; цільове значення відповідає середині оптимального діапазону.

Рівень викидів CO₂ на TPES. Індикатор є дестимулятором (D). Цей індикатор характеризує рівень негативного впливу на довкілля процесу перетворення залучених первинних енергоресурсів у добробут країни. З точки зору системного підходу такий індикатор відображає процесуальність

системи. Водночас цей індикатор також може слугувати характеристикою країни, що відображає цілісний стан системи, з точки зору більшої систем.

Динаміка індикатора також визначається за даними Держстату України, а для порівняння з іншими країнами використано дані МЕА.

Цільове значення індикатора рівень викидів CO₂ на TPES станом на 2018 р. становить 1,9 т. CO₂/т.н.е. Цільове значення (1,59) вибране відповідно до значень індикаторів подібних за рівнем розвитку країн та проєктного бачення бажаної структури економіки, воно відповідає середині гомеостатичного плато (оптимального діапазону, в межах якого існують найкращі умови функціонування системи та від'ємній зворотній зв'язок).

Рівень викидів CO₂ на одиницю ВВП. Індикатор є дестимулятором (D). Цей індикатор характеризує рівень негативного впливу на довкілля під час перетворення залучених енергоресурсів у вироблені товари та послуги.

З точки зору системного підходу такий індикатор відображає процесуальність системи. Динаміка індикатора також визначається за даними Держстату України, а для порівняння з іншими країнами використано дані МЕА.

Цільове значення індикатора рівень викидів CO₂ на одиницю ВВП станом на 2018 р. становило 1,4 кг CO₂/дол. США. Цільове значення індикатора (0,415) вибрано згідно із значеннями індикаторів країн, подібних за рівнем розвитку, та проєктного бачення бажаного стану виробничої інфраструктури й рівня технологічного розвитку економіки.

Кінцева вуглеємність енергії. Індикатор є дестимулятором (D). Цей індикатор характеризує рівень негативного впливу на довкілля під час перетворення первинних видів енергоресурсів на спожиту споживачами кінцеву енергію.

З точки зору системного підходу цей індикатор відображає процесуальність системи.

Динаміка індикатора також визначається за даними Держстату України, а для порівняння з іншими країнами використані дані МЕА.

Поточне значення індикатора кінцева вуглеємність енергії станом на 2018 р. становило 82 г CO₂/МДж.

Цільове значення цього індикатора 70 г CO₂/МДж вибрано з урахуванням значень індикаторів подібних за рівнем розвитку країн та проєктного бачення бажаної системи енергозабезпечення та енергетичного балансу.

Задоволення потреб з власних джерел за видами ПЕР. Індикатор є стимулятором (S), який відображає рівень гарантованого забезпечення потреб країни власними енергоресурсами (також і її стійкості), ризик втрати яких унаслідок зовнішніх впливів є найменшим.

З точки зору системного підходу цей індикатор слугує характеристикою функціонального призначення підсистеми ресурсного забезпечення системи.

Динаміка індикатора так само визначається за даними Держстату України, а для порівняння з іншими країнами використано дані МЕА.

Поточне значення індикатора задоволення потреб з власних джерел станом на 2018 р. становило 63,99 %. Цільове значення індикатора (87 %) встановлене, зважаючи на наявність ресурсної бази та проєктного бачення бажаної структури економіки України, воно відповідає середині оптимального діапазону.

Вартість імпорту енергоресурсів для країни. Індикатор є дестимулятором (D), що відображає рівень витрат системи на залучення енергоресурсів ззовні та може слугувати мірилом: а) доступності купівлі енергоресурсів для країни з точки зору результатів діяльності економіки країни; б) залежності країни (та її стійкості) від зовнішніх постачальників ПЕР.

З точки зору системного підходу цей індикатор є характеристикою цілісної системи.

Розраховується відношенням вартості імпорту енергоресурсів для країни з урахуванням поточного обмінного курсу до ВВП країни у відсотках. Дані щодо імпорту отримані із джерел Держстату України.

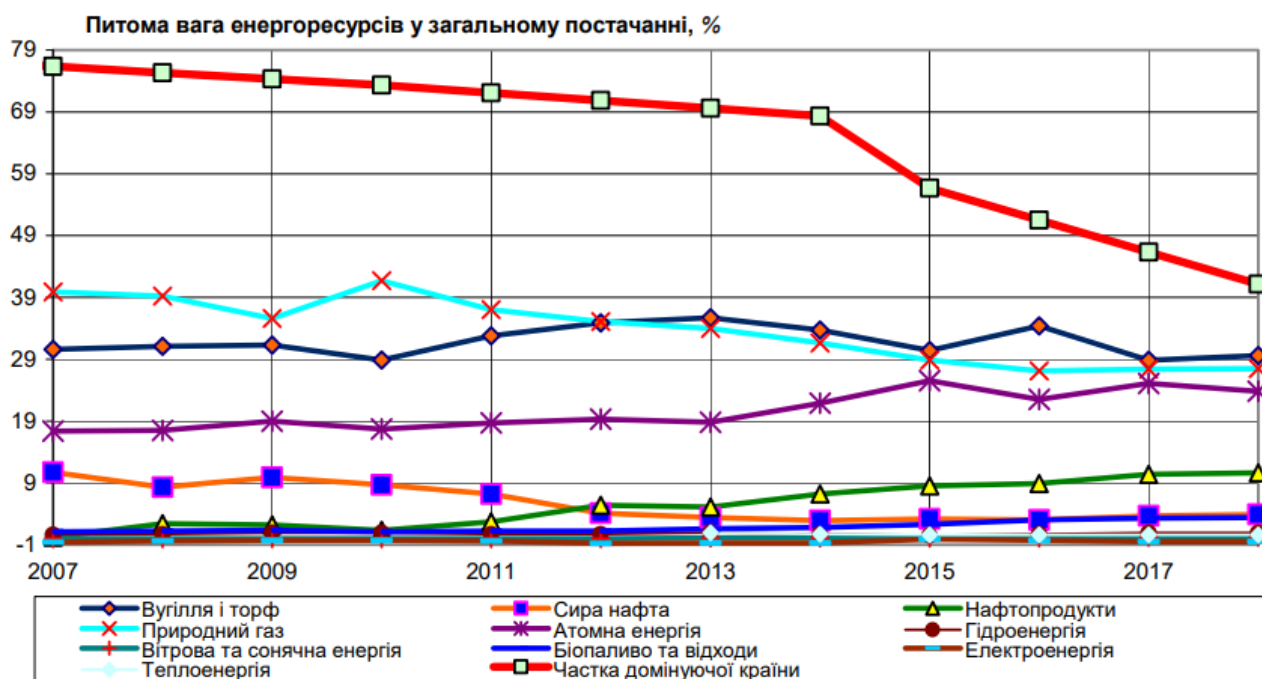
Поточне значення індикатора вартість імпорту ПЕР станом на 2018 р.

становило 10,24 % від ВВП. Цільове значення індикатора (7,5 %) встановлене за проєктним баченням бажаної структури економіки України, рівня економічного розвитку, енергетичної незалежності, воно відповідає середині оптимального діапазону.

Частка домінуючої країни (постачальника) в загальному обсязі імпорту за видами ПЕР. Дестимулятор (D). Індикатор відображає рівень залежності країни від постачання енергоресурсів із визначеної країни, ризик втрати постачання з якої має бути оцінений та передбачені шляхи його мінімізації іншими елементами системи.

З точки зору системного підходу цей індикатор слугує характеристикою функціонального призначення.

Для розрахунку індикатора використані дані Держстату України, за якими отримана фактична динаміка імпорту різних видів енергоресурсів (енергії), у т. ч. з однієї країни, у загальному обсязі його імпорту. Побічно розраховується й «частка власних джерел у балансі ПЕР». На рисунку 1.3 подано дані щодо розрахунку залежності України від імпорту енергоресурсів, у т. ч. з Росії як найбільшого зовнішнього постачальника.



Рисунку 1.3. – Динаміка питомої ваги енергоресурсів у загальному постачанні за період із 2007 до 2017 рр.

Поточне значення індикатора частка домінуючої країни в імпорті ПЕР (% від імпорту) станом на 2018 р. становила 41,17 %. Під домінуючою країною розуміється РФ, а зниження її частки, починаючи з 2014 р., пов'язане із заходами з диверсифікації постачань природного газу та ядерного палива. Водночас зростання частки імпорту ядерного палива пов'язане із: а) зростанням частки ядерної енергетики у балансі; б) зменшенням абсолютних значень імпорту інших ПЕР.

Цільове значення індикатора (30%) встановлене відповідно до наявності ресурсної бази та проєктного бачення бажаної структури економіки України, пріоритетів національної безпеки (енергетичної незалежності), рекомендацій ЄС та відповідає середині оптимального діапазону.

Рівень технологічної залежності імпорту/експорту з одного джерела (за видами енергетичних технологій). Дестимулятор (D). Індикатор відображає рівень залежності країни від постачання енергетичних технологій з одного джерела (компанії, країни), ризик втрати постачання якої має бути оцінений та передбачені шляхи його мінімізації іншими елементами системи.

З точки зору системного підходу цей індикатор слугує характеристикою функціонального призначення.

Поточне значення індикатора рівень технологічної залежності з одного джерела (%) станом на 2018 р. з огляду на експертну оцінку визначено на рівні 63%. Цільове значення індикатора (35%) встановлене за оцінкою наявності технологічної бази та проєктного бачення бажаної структури економіки України, пріоритетів національної безпеки (енергетичної незалежності), воно відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Рівень запасів/резервів від обсягів місячного споживання за видами ПЕР. Індикатор є стимулятором (S). Індикатор відображає спроможність країни забезпечити визначений рівень функціонування за блокування постачання енергоресурсів/технологій/послуг тощо.

З точки зору системного підходу цей індикатор є характеристикою

функціонального призначення системи стратегічних резервів енергоресурсів/технологій.

Поточне значення індикатора рівень запасів/резервів за видами ПЕР (% від місячного споживання) станом на 2018 р., за експертною оцінкою, визначено на рівні 25,83 %. Цільове значення індикатора (90 %) встановлене відповідно до наявності ресурсної бази та пріоритетів національної безпеки (забезпечення національної стійкості), відповідає середині оптимального діапазону.

Індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI). Індикатор є дестимулятором (D), що відображає спроможність країни забезпечити визначений рівень та якість постачання електричної енергії споживачам. Індикатор може слугувати мірилом стійкості (відновлення) електропостачання під час блокування постачання енергоресурсів/технологій/послуг тощо.

З точки зору системного підходу цей індикатор може бути характеристикою функціонального призначення, а також якості системи. Поточне значення індикатора індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні станом на 2018 р. становить 696 хв/рік (наведено за даними Регулятора).

Цільове значення індикатора на рівні 200 хв/рік встановлене згідно із пріоритетами національної безпеки (забезпечення національної стійкості), станом технологічного розвитку електроенергетики, тривалістю, готовністю учасників ринку реалізувати відповідні заходи. Це значення відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Наявність законодавства. Індикатор є стимулятором (S), який відображає рівень інституційної бази та законодавчого забезпечення регулювання діяльності у сфері енергетичної безпеки. З точки зору системного підходу цей індикатор є характеристикою інституційно-організаційного забезпечення системи.

Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора наявність та якість законодавства станом на 2018 р. визначено на рівні 48,17 %. Цільове значення індикатора (80%) вибрано відповідно до проєктного бачення майбутнього стану законодавства щодо регулювання сфери енергетичної безпеки та відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Управлінські процеси та інфраструктура. Індикатор є стимулятором (S), котрий відображає рівень інституційної бази, законодавчого забезпечення та організації управлінської діяльності в енергетичній галузі та сфері енергетичної безпеки (постановка цілей, планування, моніторинг, контроль (оцінювання ефективності й результативності, відповідності цілям), коригування цілей; управління власністю).

З точки зору системного підходу цей індикатор слугує характеристикою інституційно-організаційного забезпечення системи.

Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора управлінські процеси та інфраструктура станом на 2018 р. визначено на рівні 66,83 %. Цільове значення індикатора (78 %) вибрано з огляду на проєктне бачення бажаної структури управління енергетикою та регулювання сфери енергетичної безпеки, воно відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Допоміжні та сервісні процеси й інфраструктура. Індикатор є стимулятором (S), який відображає рівень інституційної бази, науково-технічної та сервісної підтримки поточного функціонування енергетики власними суб'єктами (підвищення кваліфікації персоналу, обслуговування та ремонт, охорона та фізичний захист, транспортні послуги, фінансово-економічні, юридичні послуги).

З точки зору системного підходу цей індикатор є характеристикою інституційно-організаційного забезпечення системи.

Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора допоміжні та сервісні процеси та інфраструктура станом на 2018 р. визначено на рівні 84,08 %. Цільове

значення індикатора (87,5 %) вибрано відповідно до проєктного бачення бажаної структури енергетичної галузі, енергетичної інфраструктури та пріоритетів науково-технічного розвитку країни та відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Процеси та інфраструктура з підтримки об'єктів на всіх етапах життєвого циклу. Індикатор є стимулятором (S), який відображає рівень інституційної бази, науково-технічної та сервісної підтримки функціонування об'єктів енергетики протягом їх життєвого циклу (від виникнення ідеї до зняття з експлуатації, утилізації відходів та рекультивації земель: проєктування, будівництво, монтаж та налагодження, введення в експлуатацію, експлуатація, зняття з експлуатації).

З точки зору системного підходу цей індикатор слугує характеристикою інституційно-організаційного забезпечення системи.

Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора процеси та інфраструктура з підтримки на всіх етапах життєвого циклу станом на 2018 р. визначено на рівні 63,75 %. Цільове значення індикатора (75 %) вибрано залежно від проєктного бачення майбутнього стану енергетичної інфраструктури, пріоритетів науково-технічного розвитку країни, захисту довкілля та відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Виробничі процеси та інфраструктура. Індикатор є стимулятором (S), який відображає рівень інституційної бази, нормативно-правового регламентування, технічного забезпечення та організації виробничих процесів на об'єктах енергетики (видобування, зберігання, транспортування, перетворення, виробництво та використання ПЕР).

З точки зору системного підходу цей індикатор є характеристикою інституційно-організаційного забезпечення системи. Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора виробничі процеси та інфраструктура станом на 2018 р. визначено на рівні 42,83 %. Цільове значення індикатора (68

%) визначалося з огляду на проєктне бачення майбутнього стану енергетичної інфраструктури, пріоритетів науково-технічного розвитку країни, захисту довкілля та відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Інформаційно-комунікаційні процеси та інфраструктура. Індикатор є стимулятором (S), відображає рівень наявності інституцій та регламентування обміну інформацією, а також наявність процедур отримання, аналізу та використання інформації всіма заінтересованими суб'єктами як у межах системи, так за її межами (підготовка та оприлюднення звітів щодо фінансово-економічних результатів, виконання планованих заходів та досягнення цілей; інформування клієнтів та стейкхолдерів; формування позитивного іміджу; формування громадської думки та суспільної свідомості).

З точки зору системного підходу цей індикатор слугує характеристикою інституційно-організаційного забезпечення системи.

Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора інформаційно-комунікаційні процеси та інфраструктура станом на 2018 р. визначено на рівні 67,33 %. Цільове значення індикатора (82,5 %) було вибрано з урахуванням проєктного бачення майбутнього стану управління у сфері енергетики та національної безпеки, відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Прогнозованість та послідовність змін політики та регуляторних змін. Індикатор є стимулятором (S), відображає наявність інституційної бази, законодавчого забезпечення та організації управлінської діяльності, спрямованої на формування й реалізацію планів довгострокового розвитку енергетики країни з урахуванням вимог національної безпеки.

З точки зору системного підходу такий індикатор є характеристикою інституційно-організаційного забезпечення системи.

Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора прогнозованість та послідовність змін політики та регуляторних змін станом на 2018 рік визначено на рівні 55 %.

Цільове значення індикатора (70 %) експерти встановили, ураховуючи проєктне бачення бажаної моделі управління в країні та системи регулювання енергетичних ринків, воно відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Енергетичний баланс. Ця складова частина оцінює ресурсну забезпеченість за видами ПЕР та енергетичний баланс.

До цієї складової частини увійшли 8 індикаторів: нафта та нафтопродукти; природний газ; вугілля; ядерна енергія (а в перспективі – й термоядерна); гідроенергія; відновлювані джерела: сонячна, вітрова та біоенергетика. У перспективі планується використати ще два індикатори: воднева енергетика та накопичувачі енергії.

З огляду на низьковуглецевий вектор розвитку перші три індикатори визначені як дестимулятори (D), а інші – як стимулятори (S). Ці індикатори відображають місце окремих джерел енергоресурсів та відповідних галузей енергетики в системі.

З точки зору системного підходу ці індикатори є елементами системи, вони разом із відповідальними за їх функціонування суб'єктами відображають організаційно-інституційну структуру системи (елементи системи).

За кожним індикатором аналізується частка ресурсу у відсотках в енергобалансі країни. Для розрахунків використано дані Дежстату України за період 2000–2018 рр. 63 та цільові показники енергобалансу (% виду енергоресурсу у загальному балансі), які визначені експертним шляхом.

Нафта та нафтопродукти: поточне значення – 14,47 %, цільове значення – 8,3 %. Природний газ: поточне значення – 27,53 %, цільове значення – 23,43 %. Вугілля: поточне значення – 29,61 %, цільове значення – 22,35 %. Ядерна енергія: поточне значення – 23,82 %, цільове значення – 17,45 %. Гідроенергетика: поточне значення – 0,96 %, цільове значення – 0,95 %. Сонячна та вітрова енергетика: поточне значення – 0,21%, цільове значення – 9,9 %. Біоенергетика: поточне значення – 3,437 %, цільове значення – 4,79 %.

Воднева енергетика: поточне значення – 0,001 %, цільове значення – 1,71 %.
Накопичувачі енергії: поточне значення – 0,001 %, цільове значення – 3 %.

Поточні значення індикаторів наведені станом на 2018 р. Цільові значення встановлені відповідно до загальносвітових тенденцій та проектного бачення майбутньої бажаної (цільової) структури енергетичного балансу, відповідають середині гомеостатичного плато (оптимального діапазону, в межах якого існують найкращі умови функціонування системи та від’ємний зворотній зв’язок).

Якість державної політики. Індикатор є стимулятором (S), який характеризує ефективність та результативність політики держави та її адекватність вимогам часу та цілям, що постають перед системою.

Цей індикатор є відображенням якості елементів системи управління в енергетичній сфері. Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом. Поточне значення індикатора якості державної політики станом на 2018 р. визначено на рівні 36,42 %. Цільове значення індикатора, а це 85 %, встановлювалося відповідно до проектного бачення бажаної якості елементів, процесів та функцій системи, відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Якість послуг (первинних ресурсів, продуктів та енергії). Індикатор є стимулятором (S), характеризує відповідність використовуваних та вироблених у системі матеріалів, наданих та спожитих послуг, що свідчитиме про якість і надійність функціонування системи відповідно до визначених політикою цілей та умов.

Цей індикатор є відображенням якості складових частин системи.

Визначення значень індикатора здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора якості послуг (первинних ресурсів, продуктів та енергії) станом на 2018 р. визначено на рівні 68 %. Цільове значення індикатора – 80 %, воно було вибране з огляду на проектне бачення бажаної якості елементів, процесів та функцій системи, відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Якість кадрів (технічних та управлінських). Індикатор є стимулятором (S), який характеризує відповідність персоналу елементів системи визначеним цілям, що свідчитиме про спроможність системи забезпечити проєктне функціонування системи, її здатність до розвитку та реагування на дестабілізуючі чинники.

Цей індикатор є відображенням якості складових частин системи.

Значення індикатора встановлюється експертним методом.

Поточне значення індикатора якість кадрів (управлінських, технічних та допоміжних) станом на 2018 р. визначено на рівні 43,33 %. Цільове значення індикатора вибрано у 80 % залежно від проєктного бачення бажаної якості елементів, процесів та функцій системи, відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Відповідність політичних лідерів завданням, що постають перед системою. Індикатор є стимулятором (S), характеризує адекватність осіб, які формують політику та здійснюють цілепокладання в системі, що свідчить про адекватність їхніх спроможностей вимогам забезпечення безпеки та розвитку системи.

Зазначений індикатор є відображенням якості складових частин системи.

Визначення значень індикатора також здійснюється експертним методом.

Поточне значення індикатора відповідність політичних лідерів цілям системи станом на 2018 р. визначено на рівні 28,17 %. Цільове значення індикатора вибрано у 90 % відповідно до проєктного бачення бажаної якості стратегічного лідерства. Таке значення відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

Використовуючи вищевикладене, розраховано вектори порогових значень індикаторів енергетичної безпеки України, згрупованих за принципом розширення сфери управління (складності управлінських рішень) щодо об'єкта управління таблиця 1.1.

Таблиця 1.1. – Скорочений набір індикаторів (параметрів оцінювання) енергетичної безпеки та їх порогові значення, використані у моделюванні оцінювання стану енергетичної безпеки України

	Тип	Тип розподілу	Нижній поріг	Нижнє оптим.	Верх опти
			0,2994	0,4743	0,663
	<i>D</i>	Експоненційний	15	10,2	6,4
	<i>D</i>	Логнормальний	27,6	25,2	21,6
	<i>D</i>	– « – « –	30	25,4	19,3
	<i>S</i>	Експоненційний	5,1	13,2	21,7
	<i>S</i>	– « – « –	0,8	0,9	1
	<i>S</i>	– « – « –	3,2	6,8	13
	<i>S</i>	– « – « –	3,2	4,12	5,45
			0,1753	0,3436	0,572
<i>і поточним</i>	<i>S</i>	Експоненційний	15	25	45
<i>іс;</i>	<i>S</i>	Нормальний	2,2	3,56	5,83
<i>,</i>	<i>S</i>	Логнормальний	2,3	5	9,5
<i>супних</i>	<i>D</i>	– « – « –	20	10	7
<i>країни, %</i>	<i>D</i>	– « – « –	10,4	9,4	7,8
	<i>D</i>	Експертна оцінка	35	30	20
			0,4630	0,6503	0,777

Індикатор	Тип	Тип розподілу	Нижній поріг	Нижнє оптим.	Верхнє оптим.	Верхній поріг	Ціль значе
Індикатор ВВП, т.н.е./1000 дол. США; тування підприємств ПЕК, % лення основних засобів ПЕК, %; ції ПЕК, % ВДВ ПЕК; ги праці ПЕК, % випуску ПЕК; вого завантаження капіталу ПЕК та виробництва електроенергії, ффіц.; вого споживання ПЕР, % ВВП ія ринків за індексом ршмана (за постачальниками); ієності до ринків ЄС, % ка)	<i>D</i>	Логнормальний – « – « –	0,18 11,6	0,13 12,8	0,09 14,6	0,06 17,7	0,1 13,
	<i>S</i>						
	<i>S</i>	Експоненційний	4	6	10	15	8
	<i>D</i>	Модель «Альфа»	25	15	10	5	12,
	<i>S</i>	– « – « –	0,2	0,26	0,32	0,382	0,2
	<i>D</i>	– « – « –	17	10	7	3,5	8,4
	<i>D</i>	– « – « –	8	5	3	2	4
	<i>D</i>	Логнормальний	2900	1900	895	260	139
	<i>S</i>	Експертна оцінка	20	50	60	80	55
а прийнятність:			0,2257	0,4188	0,5846	0,6974	0,49
дів CO ₂ на TPES, т CO ₂ /т.н.е.;	<i>D</i>	Експоненційний	2,15	1,8	1,38	0,91	1,5
дів CO ₂ на одиницю ВВП,	<i>D</i>	Логнормальний	0,82	0,51	0,32	0,2	0,41
ієємість енергії, г CO ₂ /МДж	<i>D</i>	Логнормальний	100	80	60	50	70
хнічне забезпечення:			0,3892	0,6213	0,7887	0,9201	0,70
і потреб із власних джерел	<i>S</i>	Експертна оцінка	65	80	94	100	87
% заг. спожив.;	<i>D</i>	– « – « –	15	10	5	0	7,4
іорту енергоресурсів для країни,	<i>D</i>	– « – « –	60	40	20	10	30
нуючої країни (постачальника)							
сязі імпорту за видами ПЕР,	<i>D</i>	– « – « –	60	40	30	20	35
; злогічної залежності							

сатор	Тип	Тип розподілу	Нижній поріг	Нижнє оптим.	Верхнє оптим.	Верхній поріг
нційна забезпеченість:			0,6236	0,7133	0,8448	1
інфраструктура,	<i>S</i>	Експертна оцінка	46	56	80	100
га інфраструктура,	<i>S</i>	– « – « –	66	72	84	100
процеси	<i>S</i>	– « – « –	78	85	90	100
ертна оцінка);	<i>S</i>	– « – « –	65	70	80	100
тура з підтримки						
тєвого циклу, %	<i>S</i>	– « – « –	60	80	95	100
аційні процеси						
ертна оцінка)						
ниці:			0,5596	0,7	0,8698	1
ва, % (експертна	<i>S</i>	Експертна оцінка	50	70	90	100
злідовність змін	<i>S</i>	– « – « –	50	60	80	100
змін, % (експертна						
ики, % (експертна	<i>S</i>	– « – « –	70	80	90	100
м:			0,6264	0,7389	0,9137	1
них ресурсів, продуктів	<i>S</i>	Експертна оцінка	60	70	90	100
цінка);	<i>S</i>	– « – « –	60	70	90	100
ських, технічних	<i>S</i>	– « – « –	70	85	95	100
тна оцінка);						
их лідерів завданням,						
ою, % (експертна						
КА ЗАГАЛОМ			0,3815	0,5635	0,7408	0,8859

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСБАЛАНСУ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЦІНКУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

2.1. Аналіз публікацій по досліджувальній тематиці

Доступність даних про навантаження часто є недостатньою, тому в багатьох дослідженнях якості електроенергії передбачається, що електричні навантаження або збалансовані, тобто всі фази навантажені однаково, або характеризуються заздалегідь визначеним рівнем дисбалансу, тобто фази нерівномірно навантажені [21, 22]. Це припущення не завжди вірне, і, отже, результати таких досліджень можуть бути неточними [21, 22]. Наприклад, рівень напруги на кінці радіального фідеру низької напруги (LV) може значно відрізнятися від рівня напруги, оціненого оператором системи розподілу (DSO), через використання нереалістичного рівня дисбалансу для електричних навантажень. Очевидно, що в цьому випадку страждає оцінка рівнів дисбалансу напруги та струму. Різниця між розрахунковими та фактичними величинами, включаючи величину напруги, буде більш вираженою для мереж, які більш чутливі до коливань потужності, таких як слабкі мережі [23].

Як уже згадувалося, багато досліджень якості електроенергії роблять різноманітні припущення щодо рівня дисбалансу навантаження. Наприклад, у [23] досліджувався вплив роздільної здатності даних про швидкість вітру та даних про сонячне опромінення на оцінку коливань напруги в низьковольтних фідерах із розподіленою сонячною та вітровою генерацією з припущенням, що всі навантаження на фідери є триступенчатими. фазних навантажень і збалансованих. У [24, 25] автори досліджували, яку потужність можна вводити в трифазну мережу НН однофазними сонячними інверторами без порушення обмежень дисбалансу. При цьому в [24] передбачалося, що всі фази навантажені однаково, а в [25] припускалося, що друга фаза і третя фаза відповідно вдвічі і втричі більше навантажені, ніж перша фаза. У роботі [26] досліджено вплив рівня дисбалансу навантаження на втрати потужності

розподільних мереж, авторами розглянуто кілька сценаріїв електричних навантажень. Відповідно, в одному зі сценаріїв всі навантаження вважалися збалансованими, але в інших сценаріях навантаження другої фази було зменшено на певний відсоток, тоді як навантаження третьої фази або збільшено на той самий відсоток, або зменшено на вдвічі більше, ніж у другій фазі, з розглянутим відсотком від 2,5% до 15% [26]. У [27] автори проаналізували вплив незбалансованих конфігурацій лінії та незбалансованого навантаження фаз на падіння фазної напруги та рівні дисбалансу напруги в розподільчих мережах. Аналіз працював з різними припущеннями про навантаження, включаючи рівне фазове навантаження та неоднакове фазове навантаження, а саме, одна фаза на 15% більше навантажена, а інша фаза на 15% менше, ніж решта фази [27].

В інших дослідженнях якості електроенергії автори певною мірою мали доступ до даних про навантаження. Наприклад, у [28] модель імовірнісного навантаження була розроблена на основі фактичних даних про споживання, а потім була використана для статистичної оцінки падінь напруги та рівнів дисбалансу напруги для великих розподільних мереж НН. Інші автори використовували вимірювання потужності [29] або вимірювання напруги та струму [30] з одного місця, наприклад, кінця підстанції фідеру НН, щоб оцінити сукупний рівень дисбалансу для всієї області, але оцінка неможлива для інших електричних вузлів, наприклад конкретний споживач або конкретна розподільна коробка. Незважаючи на кілька останніх прикладів, можна стверджувати, що найчастіше реальні дані про навантаження недоступні в дослідженнях якості електроенергії.

Ця робота спрямована на дослідження впливу даних про навантаження на дослідження якості електроенергії, зосереджуючись на рівні дисбалансу навантаження та якості напруги для розподільних фідерів НН. З цієї причини результати дослідження якості електроенергії з використанням реальних даних про навантаження порівнюються з результатами подібних досліджень, але які роблять типові припущення щодо даних про навантаження. Порівняння

спрямоване на кілька показників якості електроенергії, таких як зміна величини напруги, падіння напруги на фідері та різні фактори дисбалансу фаз, оскільки саме ці показники є актуальними для операторів систем передачі електроенергії при плануванні підключення нових споживачів або споживачів до своїх мереж. Вся робота можлива завдяки наявності реальних даних про навантаження, що надаються інтелектуальними лічильниками інтелектуальної електромережі Данії.

2.2. Розбаланс фаз у розподільних мережах

2.2.1. Причини, наслідки та способи пом'якшення

Набір із трьох векторів, наприклад трифазних напруг або струмів, є збалансованим, якщо всі вектори мають однакову величину та симетрично зсунуті по фазі на 120° один до одного. Будь-яке відхилення величин і/або фазових зсувів від цих умов призводить до незбалансованості розглянутого набору векторів. Згідно з альтернативним визначенням, набір з трьох напруг або струмів є збалансованим, якщо він розкладається лише на напруги прямої послідовності або струми прямої послідовності, відповідно, в іншому випадку він незбалансований [31]. Системні оператори прагнуть забезпечити збалансований набір напруг у точці загального з'єднання (РСС) між мережею низького напруги та мережею середньої напруги (MV) [32]. У цьому сенсі зручно, що синхронні генератори, які є основними джерелами електроенергії, розраховані на вироблення лише напруги прямої послідовності, тобто трифазних збалансованих напруг [31], і що дисбаланс фаз, який вносить мережа, обладнання, що з'єднує масове виробництво та розподіл НН, як правило, незначне [32]. Фактично, за нормальних умов дисбаланс фаз на РСС між мережею LV та мережею SN має, у більшості випадків, локальні причини в самій мережі LV. До них належать неоднакові фазові імпеданси, однофазні бічні та інші структурні асиметрії мереж НН, нерівномірний розподіл

однофазних споживачів між трьома фазами, незбалансоване трифазне навантаження та випадкова зміна споживання з часом [33]. Крім того, наявність однофазної розподіленої генерації, наприклад, однофазних сонячних інверторів, також сприяє дисбалансу фаз, що виникає в мережах НН [34]. Однак асиметрія навантаження є основною причиною дисбалансу напруги та струму в розподільчих мережах НН [28, 32]. Асиметричні несправності є ще одним джерелом дисбалансу напруги або струму [31, 35], але це перехідні події, які зазвичай швидко усуваються з мережі, тому вони не розглядатимуться в цій роботі.

Залежно від їх рівня дисбаланс фаз може мати негативні наслідки для мереж НН та електрообладнання. Поточні дисбаланси призводять до зменшення експлуатаційної навантажувальної здатності кабелів низького навантаження та розподільних трансформаторів, у тому сенсі, що деякі фази більше не можуть використовуватися до номінальних номіналів [30, 32], таким чином стаючи обмежуючим фактором для підключення навантажень та розподілена генерація [33]. Дисбаланс струму також викликає додаткові втрати Джоуля в розподільних трансформаторах і кабелях низького напруги, як у фазних, так і в нейтральних проводах [33, 36]. Фактично, згідно з [36], у багатьох країнах втрати енергії, спричинені дисбалансом, становлять значну частину загальних втрат, що виникають у мережах низького напруги. При живленні незбалансованою напругою асинхронні машини та перетворювачі потужності стикаються з негативними наслідками, такими як зниження ефективності, збільшення втрат, потенційно небезпечний перегрів і, в деяких ситуаціях, передчасні відмови [37, 38]. При серйозних рівнях дисбалансу напруги або струму деякі типи реле захисту можуть працювати несправно, що призводить до порушення координації, неприємного відключення та відсутності селективності [35].

Через згубні наслідки дисбалансів напруги та струму на електрообладнання робляться спроби обмежити та знизити рівень дисбалансу в мережах НН. Найпоширенішим рішенням є перерозподіл однофазних

навантажень і однофазних латеральних відводів таким чином, щоб фідери НН ставали менш незбалансованими [33]. Крім того, підключення однофазних сонячних інверторів до низьковольтних мереж регулюється нормативами щодо максимальної встановленої потужності [39]. Інші рішення для пом'якшення фазового дисбалансу включають заміну низьковольтних кабелів на кабелі з більшим поперечним перерізом [25], встановлення фазових балансерів у низьковольтних фідерах [33, 40] і впровадження методів компенсації дисбалансу в сонячних інверторах [37, 41]. У [32] стверджується, що вирівнювання навантаження є обов'язком як DSO, так і споживачів, і тому автори пропонують тариф на електроенергію на основі дисбалансу, щоб стимулювати споживання збалансованих струмів з мережі низького рівня.

Зрештою, обладнання, чутливе до дисбалансу, захищено захисними реле, так що небезпечні рівні дисбалансу фаз призводять до відключення реле та відключення мережі, а не до пошкодження обладнання [35].

2.2.2. Індикатори якості електроенергії дисбалансу фаз

Питання якості електроенергії, включно з дисбалансом фаз, в основному оцінюються шляхом вивчення якості форми сигналу напруги на РСС. Що стосується дисбалансу напруги, зазвичай використовуються показники якості, визначені Міжнародною електротехнічною комісією (ІЕС), Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ) і Національною асоціацією виробників обладнання (NEMA) Сполучених Штатів [42].

ІЕС визначає коефіцієнт дисбалансу напруги (VUF), який відповідає так званому «справжньому визначенню» дисбалансу напруги, заснованому на симетричних компонентах напруги. VUF наведено у рівнянні (2.1), де V_1 і V_2 представляють позитивну та негативну послідовність, відповідно, фазних напруг [23].

$$VUF = \frac{|V_2|}{|V_1|} \cdot 100(\%) \quad (2.1)$$

IEEE визначає коефіцієнт дисбалансу фазної напруги (PVUR) як відношення між максимальним відхиленням напруги від середньої фазної напруги, позначеної ΔV_{P_max} , і середньої фазної напруги, позначеної V_{P_avg} [44]. PVUR наведено у рівнянні (2.2). NEMA пропонує подібний індекс, але з використанням лінійної напруги замість фазної [42].

$$PVUR = \frac{\Delta V_{P_max}}{V_{P_avg}} \cdot 100(\%) \quad (2.2)$$

Різні стандарти, включаючи EN50160 і ANSI C84.1, рекомендують, щоб VUF, PVUR або інші еквівалентні показники не перевищували 2–3% у розподільчих мережах НН [45], [46], але багато DSO встановлюють суворіші обмеження для своїх установок.

Додаткові показники дисбалансу струму можна отримати шляхом заміни в рівняннях (2.1) і (2.2) напруг на еквівалентні струми [32]. Таким чином, рівняння (2.3) і (2.4) визначають коефіцієнт дисбалансу струму (IUF) і коефіцієнт дисбалансу фазного струму (PIUR).

$$IUF = \frac{|I_2|}{|I_1|} \cdot 100(\%) \quad (2.3)$$

$$PIUR = \frac{\Delta I_{P_max}}{I_{P_avg}} \cdot 100(\%) \quad (2.4)$$

У літературі наводяться й інші показники якості для оцінки дисбалансів напруги в електричних мережах. Наприклад, у [30] автори пропонують альтернативний індикатор VUF, стверджуючи, що компонент нульової послідовності фазних напруг також повинен враховуватися індикатором дисбалансу напруги. Запропонований показник, який у цій роботі називається альтернативним VUF (AVUF), виражається у рівнянні (2.5), де V_0 є нульовою послідовністю фазних напруг.

$$AVUF = \frac{\sqrt{|V_0|^2 + |V_2|^2}}{|V_1|} \cdot 100(\%) \quad (2.5)$$

Іншим індикатором, який обговорюється в літературі, є комплексний VUF (CVUF), який являє собою розширення VUF шляхом врахування як величин, так і кутів симетричних компонентів фазних напруг [38]. CVUF наведено у рівнянні (2.6), де φ_1 і φ_2 є кутами прямої та зворотної послідовності, відповідно, фазних напруг.

$$CVUF = \frac{V_2}{V_1} = \frac{|V_2|}{|V_1|} \angle (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2.6)$$

Дисбаланс фаз може впливати на величини, які не обов'язково призначені для оцінки дисбалансу фаз. Регулювання напруги (VR), наприклад, використовується для кількісної оцінки здатності електричних систем забезпечувати постійну напругу при різних навантаженнях [47] і на нього впливає дисбаланс напруги через чіткий зв'язок, який останні мають із змінами напруги. Формула VR наведена в рівнянні (2.7), де V_{P_NoLoad} — фазна напруга без навантаження, а V_{P_Load} — фазна напруга під навантаженням, виміряна в тому самому місці в електричній системі [47]. Фазовий дисбаланс викликає різні варіації напруги в кожній фазі, що в подальшому спричиняє різні VR в кожній фазі.

$$VR = \frac{V_{P_NoLoad} - V_{P_Load}}{V_{P_Load}} \cdot 100(\%) \quad (2.7)$$

VR використовується у зв'язку з обладнанням, яке може активно контролювати напругу, таким як трансформатори з перемикачами РПН, а також у зв'язку з обладнанням без можливостей контролю напруги, таким як безвідводні трансформатори та електричні кабелі [47]. Для останньої категорії обладнання, а особливо для радіальних фідерів, падіння напруги внаслідок протікання струму також є актуальними і тому регламентованими. Падіння напруги, позначене ΔV , обчислюється за формулою, наведеною в рівнянні (2.8), де V_{P_Source} — фазна напруга джерела живлення, наприклад, вторинної обмотки трансформатора, V_{P_PCC} — фазна напруга на РСС даного споживача, а V_{P_rated} — номінальна фазна напруга.

$$\Delta V = \frac{V_{P_Source} - V_{P_PCC}}{V_{P_rated}} \cdot 100(\%) \quad (2.8)$$

Перепади напруги обмежені максимумом 4–6% для більшості фідерів НН [48]. З іншого боку, коливання величини напруги обмежені $\pm 5\%$ у Сполучених Штатах і $\pm 10\%$ у більшості європейських країн, тоді як в решті світу ці межі не сильно відрізняються. Допустимі межі коливань величини напруги виражені відносно номінальної напруги країни, про яку йдеться, і застосовуються в РСС замовника з низьковольтною мережею [48].

2.3. Опис проведеного дослідження

2.3.1. Методологія дослідження

Як згадувалося у Вступі, це дослідження має на меті визначити важливість точності даних дисбалансу навантаження в дослідженнях якості електроенергії для розподільних мереж низького навантаження. У цьому сенсі виконується дослідження якості електроенергії для типової низьковольтної мережі, але з використанням чотирьох різних наборів даних про навантаження для оцінки однакових показників якості. Результати, отримані для кожного набору даних, потім порівнюються та детально обговорюються. Індикатори якості електроенергії, вибрані для оцінки, належать до тих, що представлені в попередньому розділі, а саме: коливання величини напруги, VR, VUF, PVUR, AVUF, IUF і PIUR. Приклад низьковольтної мережі моделюється за допомогою MATLAB Simulink і моделюється послідовно для кожного набору даних про навантаження та базується на топології та електричних параметрах низьковольтної інтелектуальної мережі з сільської місцевості північної Данії, де всі навантаження мають трифазне з'єднання. Моделювання цієї типової низьковольтної мережі описано в розділі 2.3.2.

Перший набір даних містить реальні дані про навантаження, отримані інтелектуальними лічильниками тієї самої інтелектуальної електромережі Данії,

яка лежить в основі зразкової мережі НН, використаної в цьому дослідженні. Інтелектуальні лічильники зафіксували потужність, споживану кожною фазою кожного домогосподарства, тому навантаження за своєю суттю є незбалансованими в цьому наборі даних і мають випадкові зміни з часом. Інші набори даних генеруються шляхом маніпулювання реальними даними про навантаження, як показано в таблиці 2.1. Точніше, маніпуляції з даними виконуються таким чином, що загальна потужність, споживана кожним трифазним навантаженням у будь-який момент часу, залишається такою ж, як і для першого набору даних, тобто як у випадку реальних навантажень. Для набору даних 2 усі навантаження є збалансованими, а для набору даних 3 і набору даних 4 усі навантаження дотримуються певної моделі дисбалансу, яка відповідає типовим припущенням щодо дисбалансу навантаження, які існують у літературі та обговорюються у Вступі. Навантаження в наборі даних 1 представлені в розділі 2.3.3.

Таблиця 2.1. – Завантаження наборів даних

Набір даних	Фаза А	Фаза Б	Фаза С	Загальна потужність	Характер навантажень
1	па	Рb	ПК	$P_a + P_b + P_c = 3P$	реальні навантаження
2	П	П	П	3P	збалансовані навантаження
3	П	$0,85 \cdot П$	$1,15 \cdot C_{тор}$	3P	незбалансовані навантаження
4	П	$0,50 \cdot C$	$1,50 \cdot C$	3P	незбалансовані навантаження

Примітка: навантаження є змінним у часі для кожного набору даних, навіть якщо для наборів даних 2, 3 і 4 співвідношення між фазовими навантаженнями є постійними в часі.

2.3.2. Моделювання зразкової мережі НН

На рисунку 2.1 показана однолінійна схема мережі НН, що розглядається в цій роботі. Він складається з радіального розподільного фідера та 23 трифазних побутових навантажень, які живляться через 13 розподільних коробок, позначених як Box1, Box2 тощо. До кожної розподільної коробки підключено одне, два або три навантаження, як показано на рисунку 2.1. Навантаження живляться від мережі середньої напруги (СН) через силовий трансформатор СН/НН і кілька розподільних кабелів.

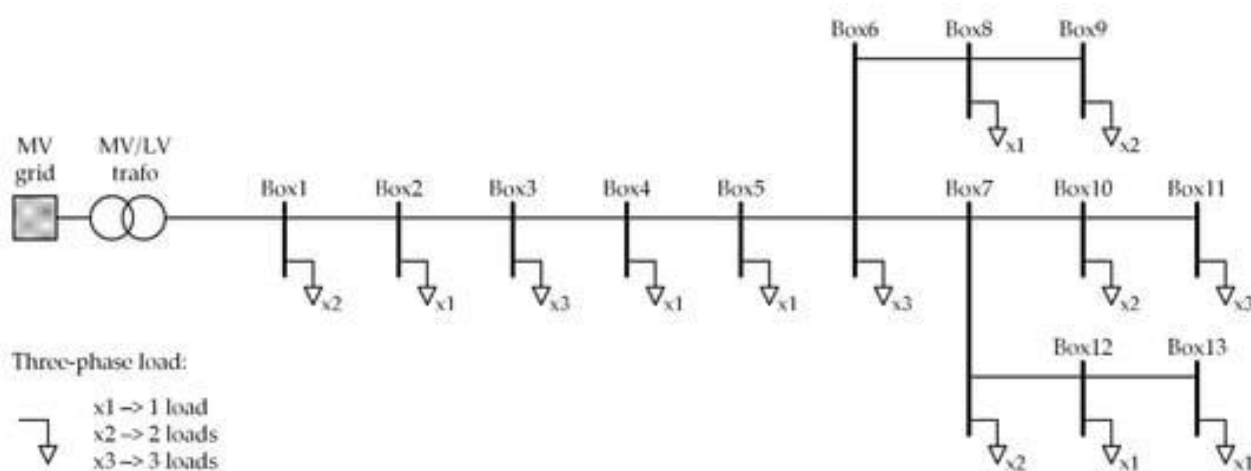


Рисунок 2.1. – Однолінійна схема зразкової розподільної мережі низької напруги (НН), що живиться від мережі середньої напруги (СН)

Мережа середнього напруги та силовий трансформатор середнього/низького напруги моделюються як еквівалентна схема Тевенена, тобто ідеальне джерело напруги за еквівалентним опором, розподільні кабелі моделюються як еквівалент π -моделі, а навантаження моделюються як еквівалент навантаження імпеданс. Моделювання всього цього обладнання показано на рисунку 2.2, із зазначенням, що всі розподільні кабелі мають чотири ідентичні дроти, три з яких призначені для фаз, а один є нейтральним. Ідеальне джерело напруги, позначене V_{grid} , має таку саму напругу, як мережа НН в умовах холостого ходу.

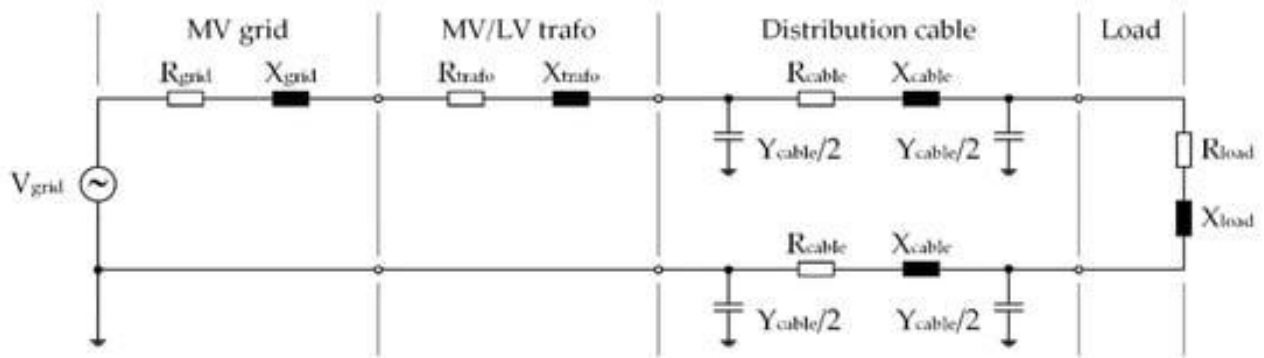


Рисунок 2.2. – Моделювання електрообладнання зразкової розподільчої мережі НН

Еквівалентний опір і реактивний опір мережі середнього напруги розраховуються в рівняннях (2.9) і (2.10) з використанням коефіцієнта короткого замикання (SCR) і співвідношення X/R , що є типовим підходом для таких розрахунків в інших подібних дослідженнях [23, 49].

$$R_{grid} = \frac{1}{SCR} \cdot \cos \left[\arctan \left(\frac{X}{R} ratio \right) \right] \cdot Z_{base} \quad (2.9)$$

$$X_{grid} = \frac{1}{SCR} \cdot \sin \left[\arctan \left(\frac{X}{R} ratio \right) \right] \cdot Z_{base} \quad (2.10)$$

Базовий імпеданс Z_{base} виражається у рівнянні (2.11), де S_{trafo} та V_{trafo} є номінальною повною потужністю та напругою вторинної лінії, відповідно, трансформатора середнього/нижнього рівня.

$$Z_{base} = \frac{V_{trafo}^2}{S_{trafo}} \quad (2.11)$$

Еквівалентний опір і реактивний опір трансформатора середнього/низького напруги розраховуються в рівняннях (2.12) і (2.13) з

використанням його втрат у міді P_{Cu} та процентного опору короткого замикання $z_{sc} \%$ [49, 50].

$$R_{trafo} = \frac{P_{Cu} \cdot V_{trafo}^2}{S_{trafo}^2} \quad (2.12)$$

$$X_{trafo} = \sqrt{(z_{sc} \% \cdot Z_{base})^2 - R_{trafo}^2} \quad (2.13)$$

Відповідні електричні параметри трансформатора середнього/низького напруги, розглянутого в цій роботі, наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. – Електричні параметри трансформатора СН/НН [23]

прим. Напруга [кВ]	розд. Напруга [кВ]	S trafo [кВА]	P Cu [кВт]	z sc % [%]
10	0,4	100	3.25	4

Для моделювання мережі середнього напруги в цьому дослідженні $SCR = 10$, співвідношення $X/R = 3$ і напруга мережі $V = 242,5$ В, оскільки передбачається, що перемикачі РПН трансформатора середнього/нижнього напруги встановлені на $+5\%$, що є типовим налаштування відводів для сільських розподільних трансформаторів.

Еквівалентні параметри кабелю, а саме опір $R_{кабелю}$, реактивний опір $X_{кабелю}$ та провідність $Y_{кабелю}$, розраховуються з використанням параметрів, наведених у таблиці 2.3, причому кожен кабель позначається відповідно до назви розподільних коробок, до яких він підключається, за винятком першого кабелю, який з'єднує трансформатор середнього/нижнього напруги з першою розподільною коробкою фідеру низького напруги та позначений як *MV/LV trafo-Box1*.

Таблиця 2.3. – Основні параметри електричних кабелів

Кабель	Тип	R [$\Omega/\text{км}$]	X [$\Omega/\text{км}$]	Y [C/км]	Довжина [км]
MV/LV trafo–Box1	4xAl150	0,2075	0,072	4897,1	0,081
Box1–Box2	4xAl150	0,2075	0,072	4897,1	0,079
Box2–Box3	4xAl150	0,2075	0,072	4897,1	0,183
Box3–Box4	4xAl95	0,3208	0,075	5684,1	0,262
Box4–Box5	4xAl95	0,3208	0,075	5684,1	0,143
Вставка 5–Вставка 6	4xAl95	0,3208	0,075	5684,1	0,202
Вставка 6–Вставка 7	4xAl95	0,3208	0,075	5684,1	0,120
Вставка 6–Вставка 8	4xAl95	0,3208	0,075	5684,1	0,161
Box8–Box9	4xAl95	0,3208	0,075	5684,1	0,062
Вставка 7–Вставка 10	4xAl50	0,6417	0,079	6366,2	0,117
Box10–Box11	4xAl50	0,6417	0,079	6366,2	0,060
Вставка 7–Вставка 12	4xAl50	0,6417	0,079	6366,2	0,259
Вставка 12–Вставка 13	4xAl50	0,6417	0,079	6366,2	0,223

Примітка: X і Y наведені для системи 50 Гц.

Параметри еквівалентного навантаження, а саме опір $R_{\text{навантаження}}$ та реактивний опір $X_{\text{навантаження}}$, розраховуються та регулюються під час моделювання відповідно до споживаної потужності кожним навантаженням у кожній фазі.

2.3.3. Профілі споживання навантажень

На рисунку 2.3 представлені 24-годинні профілі сукупного навантаження, а точніше, профілі активної потужності для кожної розподільної коробки низьковольтної мережі, показаної на рисунку1 для набору даних 1. Як згадувалося в попередніх розділах, профілі навантаження були отримані розумним метрів і зберігаються у внутрішній пам'яті із середнім інтервалом 15 хвилин. Отже, є 4 проби на годину та 96 проб за весь 24-годинний профіль. Усі навантаження є житловими і тому характеризуються майже одиничним коефіцієнтом потужності, тому їх обмін реактивною потужністю з мережею незначний. Реактивна потужність кожного навантаження все ще розглядається в цьому дослідженні якості електроенергії, але профілі навантаження реактивної потужності в цьому документі не показані.

Профілі навантаження інших трьох наборів даних також не показані в цьому документі, оскільки їх можна легко визначити за допомогою таблиці 2.1.

2.4. Результати

2.4.1. Індикатори дисбалансу фаз

На рисунку 2.4 представлені ВУФ, ПВУР і АБУФ для чотирьох розподільних коробок мережі НН. Усі ці показники дорівнюють нулю для набору даних 2, оскільки в цьому випадку всі навантаження збалансовані, тому на рисунку 2.4 показано результати лише для трьох інших наборів даних. На рисунку 2.4 показані як 24-годинні профілі згаданих індикаторів дисбалансу напруги, так і їхнє середнє значення за 24 години, позначене μ . Розподільчі коробки, які спостерігаються, вибрано таким чином, щоб вони розташовувалися по всій довжині розподільного фідера.

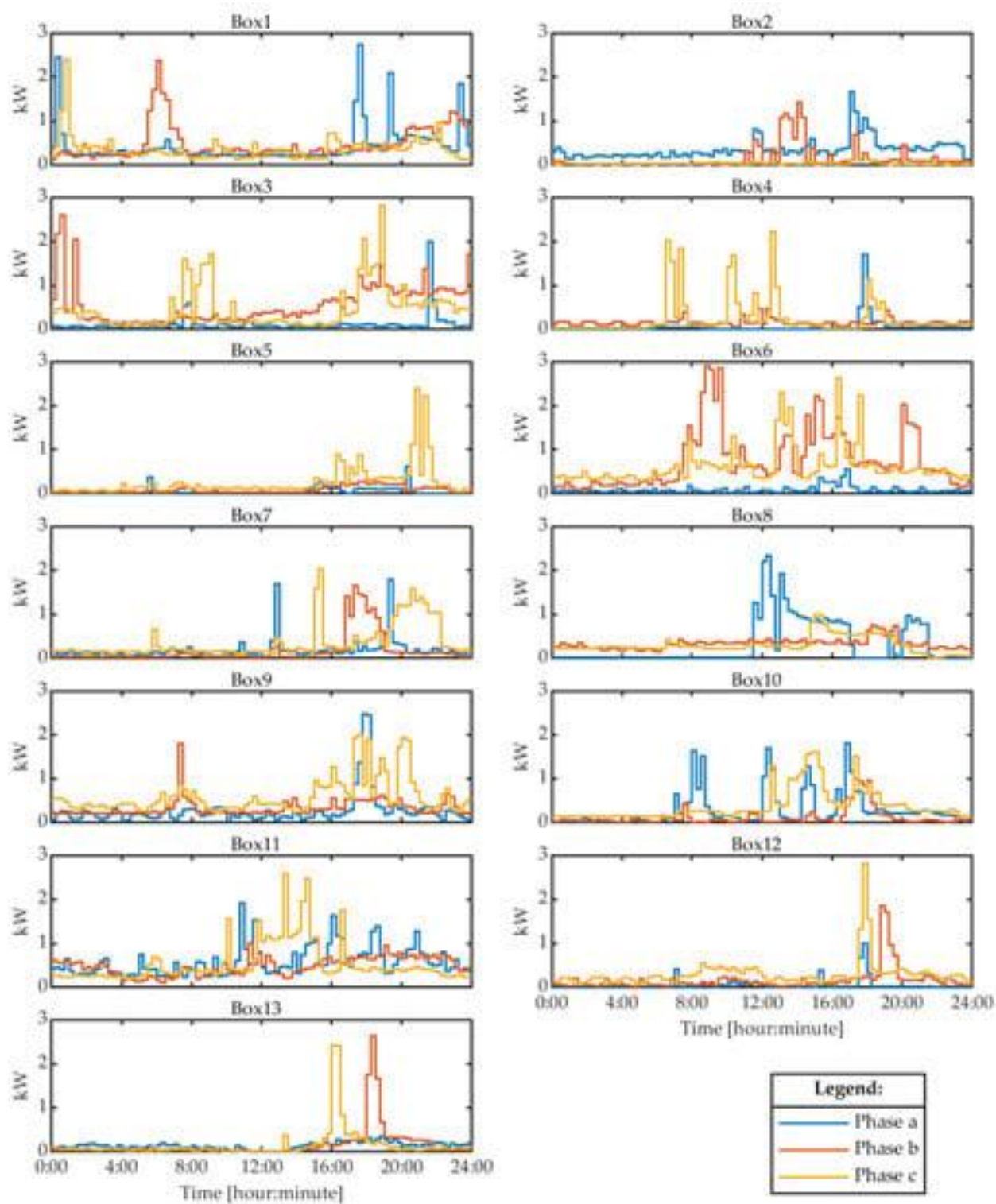


Рисунок 2.3. – Двадцятичотиригодинний агрегований профілі навантаження (активна потужність) набору даних 1

Враховуючи, що набір даних 1 включає вимірювання реального навантаження, можна стверджувати на основі результатів, показаних на рисунку 2.4, що, використовуючи набір даних 3 і набір даних 4, рівень дисбалансу напруги занижений і переоцінений відповідно. Однак, аналізуючи результати дисбалансу напруги в цьому дослідженні, можна зробити два інших важливих спостереження. Перше спостереження полягає в тому, що дані про навантаження мають найменший вплив на VUF і найбільший вплив на PVUR. Насправді, незалежно від використовуваного набору даних, VUF завжди менше 2%, тоді як PVUR і AVUF значно перевищують межу 2%, але лише для наборів даних 1 і 4. Друге спостереження полягає в тому, що дані про навантаження мають сильніший вплив на розподільчі коробки, розташовані далі від розподільного трансформатора. Наприклад, різниця між середнім AVUF набору даних 1 і середнім AVUF набору даних 3 становить 0,22% для розподільної коробки 1 і 1,05% для розподільчої коробки 13. Те саме стосується інших індикаторів дисбалансу напруги та інших набори даних.

На рисунку 2.5 представлено IUF і PIUR, обчислені з використанням струму через трансформатор середнього/низького напруги для наборів даних 1, 3 і 4. На рисунку 2.5 показано як 24-годинні профілі цих індикаторів струму, так і їх середнє значення за 24 години, позначене μ . Його було вибрано для показу величин IUF і PIUR для трансформатора середнього/низького напруги, оскільки це найбільш чутливе розподільче обладнання до дисбалансу струму, тому DSO більше зацікавлені в ньому для розрахунку показників дисбалансу струму.

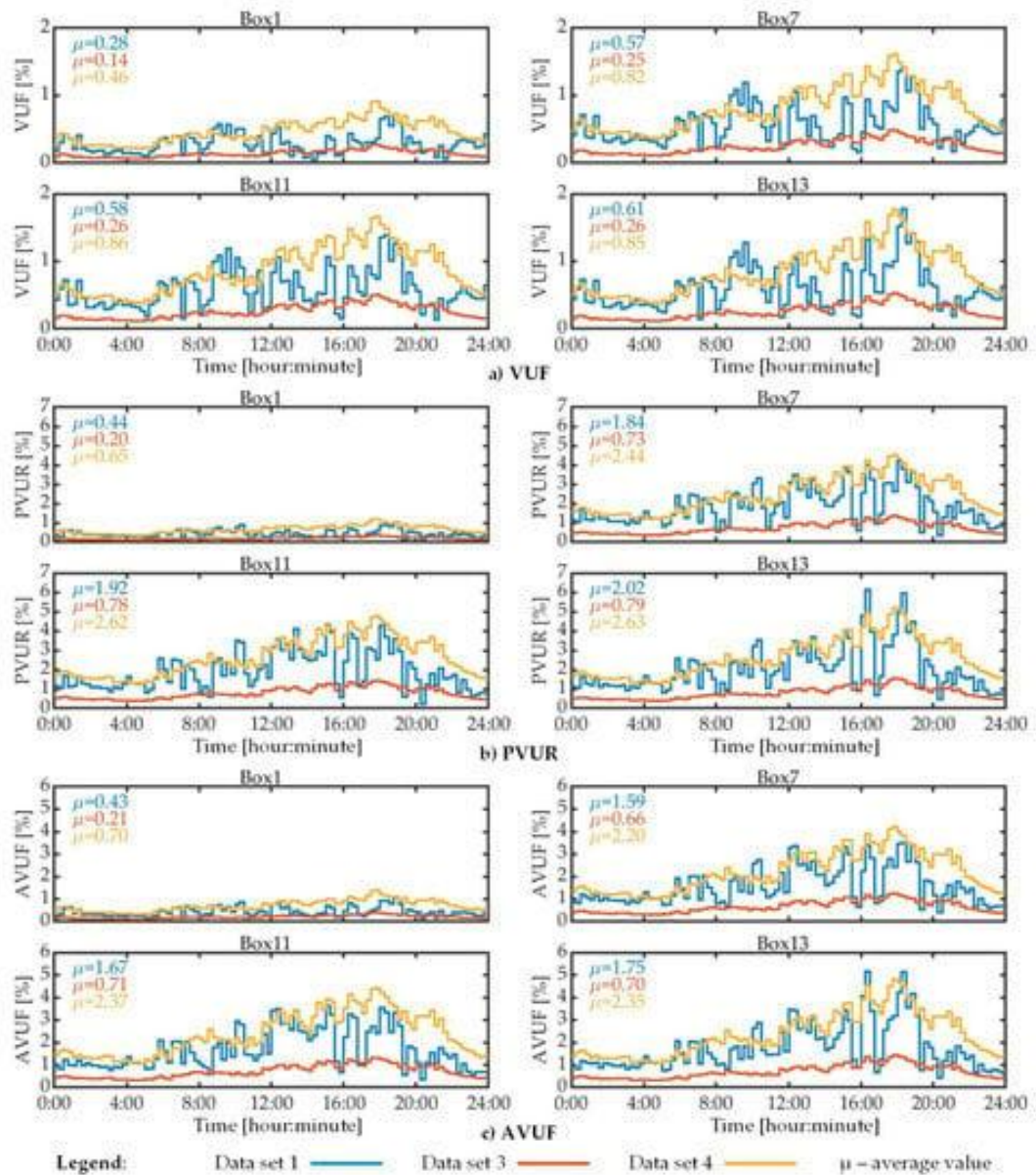


Рисунок 2.4. – Індикатори дисбалансу напруги, результати 24-годинного профілю

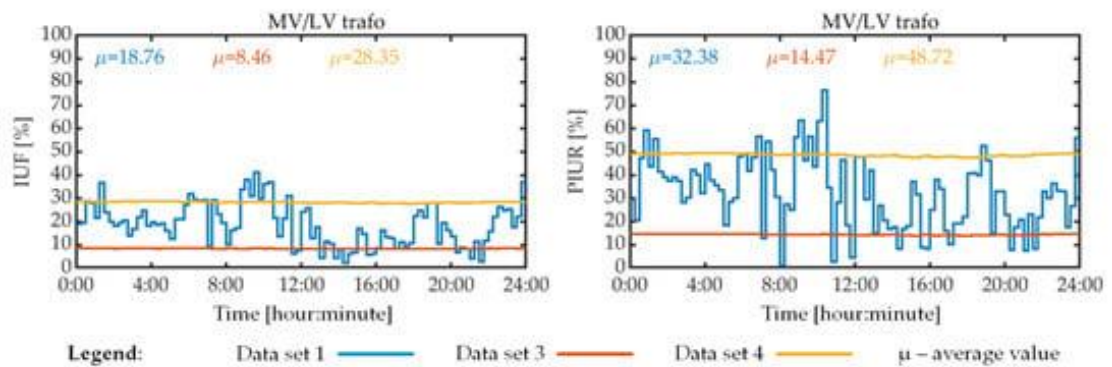


Рисунок 2.5. – Показники поточного дисбалансу, результати профілю за 24 години

Вивчення результатів, наведених на рисунку 2.5, показує, що IUF і PIUR сильно змінюються з часом для набору даних 1, але не для наборів даних 3 і 4. Крім того, існує значна різниця між середнім IUF або середнім PIUR, обчисленим для набору даних 1 і ті самі показники, обчислені для наборів даних 3 і 4. Ці результати свідчать про те, що припущення щодо дисбалансу навантаження, які відповідають наборам даних 3 і 4, не забезпечують точної оцінки показників поточного дисбалансу, коли профілі навантаження такі, як у наборі даних 1. Відносна відсутність мінливості IUF і PIUR для наборів даних 3 і 4 пояснюється постійними коефіцієнтами фазового навантаження споживачів, як видно у таблиці 2.1.

2.4.2. Індикатори якості напруги

На рисунку 2.6 представлено відносний розподіл величини напруги фаза-нейтраль для 23 навантажень розглянутої розподільчої мережі НН для кожного набору даних про навантаження. Як видно на цьому малюнку, відносний розподіл бінів напруги залежить від даних про навантаження, які використовуються. Наприклад, варіація напруги менша для набору даних 2, тобто коли навантаження збалансовані, і для набору даних 3, відносний розподіл якого не сильно відрізняється від розподілу набору даних 2. Для порівняння, напруга змінюється ширше для набору даних 3. набори даних 1 і 4, оскільки для цих двох наборів даних навантаження існує більше бункерів напруги.

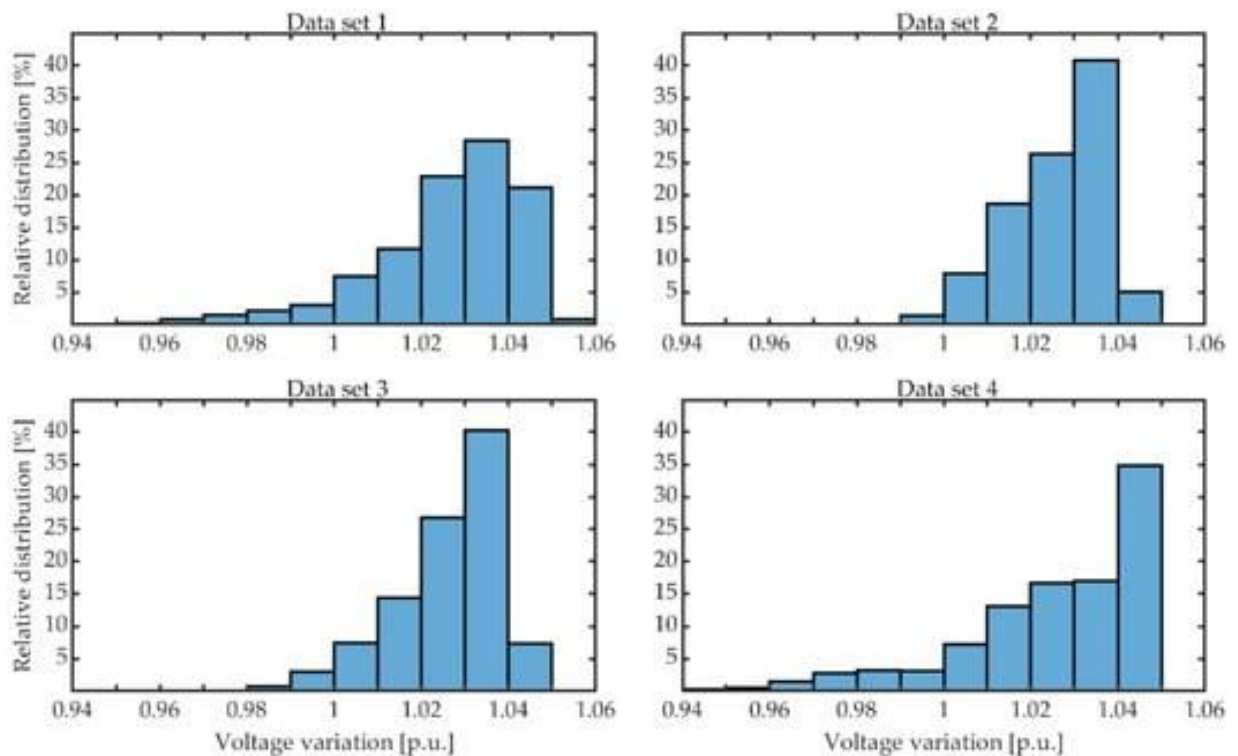


Рисунок 2.6. – Зміна величини напруги між фазою та нейтраллю для всієї мережі НН

Інший цікавий результат представлено порівнянням найнижчої напруги для кожного набору даних, яка становить 0,95–0,96 о.е. для набору даних 1, 0,99–1,00 о.е. для набору даних 2, 0,98–0,99 для набору даних 3 і 0,94–0,95 для набору даних 3. набір даних 4. Цей результат показує, що неадекватні припущення щодо дисбалансу навантаження можуть призвести до неточних оцінок щодо мінімальної величини напруги, особливо в кінці фідерів НН. Цей висновок також підтверджується спостереженнями за VR і падінням напруги для розподільної коробки 13, які показані на рисунку 2.7.

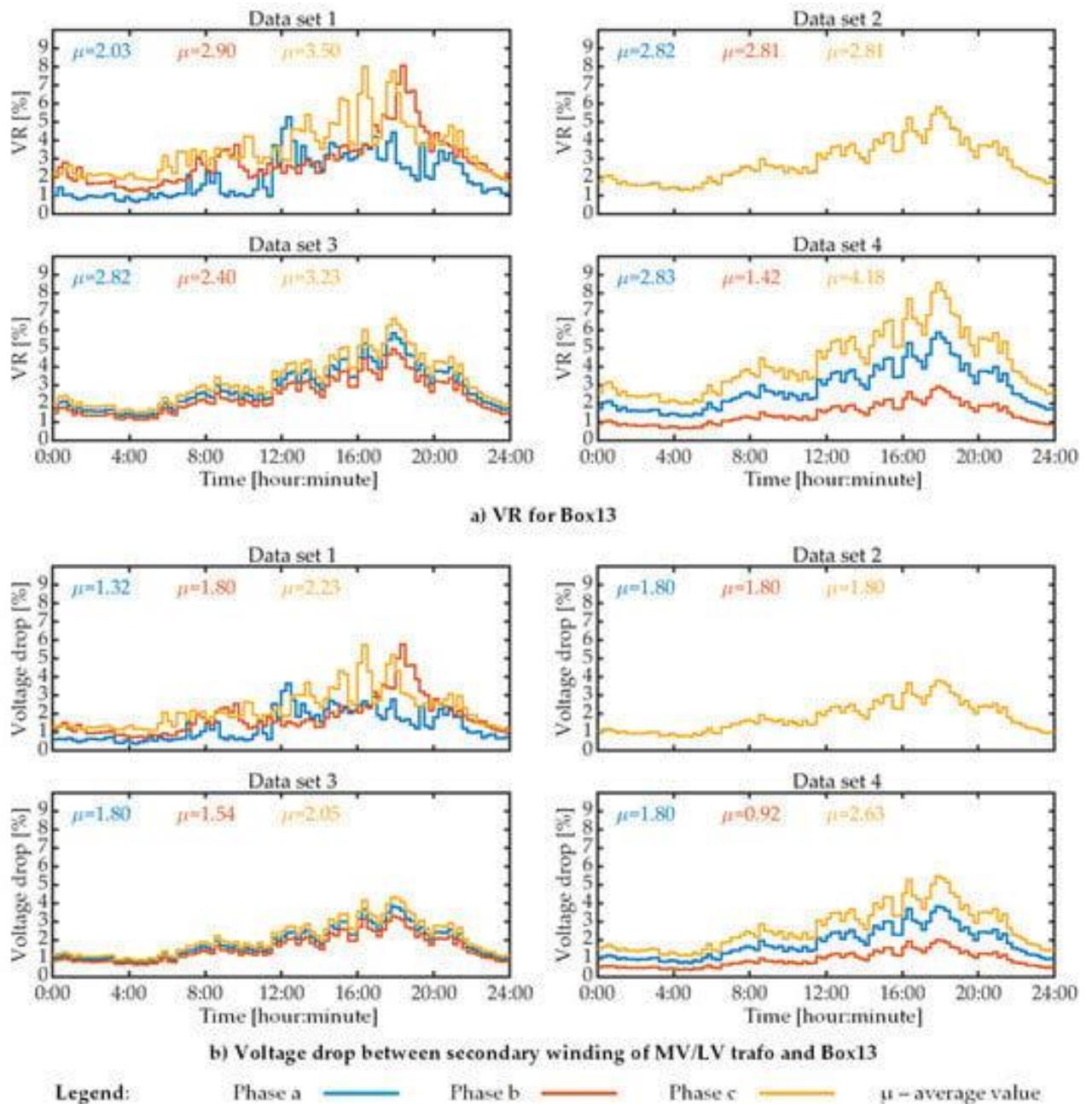


Рисунок 2.7. – Регулювання напруги (VR) і падіння напруги, результати 24-годинного профілю

DSO в основному зацікавлені у фазі з найвищим VR і падінням напруги, і результати показують, що набір даних 2, а саме припущення збалансованих навантажень, забезпечує найгіршу оцінку таких показників, принаймні, коли досліджуються середні значення. Набір даних 3 забезпечує результати, найближчі до набору даних 1 щодо найвищого середнього VR і найвищого середнього падіння напруги, тоді як набір даних 4 дає найближчий результат до

набору даних 1 щодо максимального миттєвого VR і максимального миттєвого падіння напруги. Однак основний висновок цих результатів полягає в тому, що дані про навантаження мають великий вплив на результати досліджень якості напруги. Наприклад, якщо не використовувати реальні дані про навантаження, тобто набір даних 1, такі дослідження можуть не виявити, що миттєві падіння напруги у фазі b і c становлять близько 6% для розподільної коробки 13, таким чином, можливо, перевищуючи в цьому місці обмеження встановлені нормативними актами.

Значення VR і падіння напруги є максимальними для розподільної коробки 13, оскільки це найбільш віддалена розподільна коробка від трансформатора СН/НН, тому значення цих показників якості напруги не будуть показані для інших місць розташування мережі НН.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

В дослідженні розглянут вплив даних про навантаження на дослідження якості електроенергії, зосереджуючись на рівні дисбалансу навантаження та якості напруги для мереж НН. Показано, що дисбаланс навантаження має значний вплив на правильну оцінку деяких показників якості електроенергії, таких як VUF, IUF, PVUR, PIUR, AVUF, VR та падіння напруги. Відмінності між розрахунковими та фактичними значеннями цих показників можуть бути значними в деяких випадках, особливо в мережах, які більш чутливі до коливань потужності, таких як слабкі мережі або ближче до кінця фідерів НН. Робота стала можливою завдяки наявності даних про реальне навантаження, наданих інтелектуальними лічильниками низьковольтної мережі, що дозволило порівняти результати, що відповідають реальним даним про навантаження, та результати, що відповідають даним, згенерованим на основі певних припущень щодо дисбалансу навантаження. Це дослідження не мала на меті встановити найбільш відповідну гіпотезу щодо дисбалансу навантаження для досліджень якості електроенергії, а скоріше порівняти результати таких досліджень, отримані з використанням гіпотез дисбалансу навантаження, які вже існують у літературі.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

В рамках магістерської роботи проаналізовані причини та наслідки дисбалансу фаз у мережах НН та деякі рішення для їх пом'якшення, а також основні показники якості, які використовуються для оцінки дисбалансу напруги та струму або показників, на які впливає цей дисбаланс. Описане дослідження, проведене в цій роботі, щоб дослідити вплив профілів споживання на дослідження якості електроенергії, зокрема вплив дисбалансу навантаження низьковольтної розподільчої мережі на показники якості електроенергії.

Зрештою, можна зробити висновок про складність апроксимації фактичних профілів навантаження у фідерах НН у сільській місцевості таким чином, щоб ця апроксимація не вплинула на правильність оцінки дисбалансу фаз та показників якості напруги. Ця складність полягає в тому, що схеми навантаження в таких мережах випадкові і непередбачувані, особливо якщо загальна кількість споживачів порівняно невелика. Отже, DSO та інженери з планування повинні бути обережними, роблячи припущення щодо профілів електричного навантаження для досліджень якості електроенергії. У цьому відношенні результати цього дослідження показують, що припущення про те, що трифазні навантаження є збалансованими або трохи незбалансованими, не завжди є доречним і що кращою практикою є скоріше припустити, що навантаження є сильно незбалансованими, наприклад, дві фази двічі або втричі більше навантаження, ніж інша фаза, як було припущено для набору даних 4. Однак дані про реальне навантаження слід завжди використовувати, якщо вони доступні, щоб отримати найбільш точні результати в дослідженні якості електроенергії.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України: Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665-III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80> .
9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021-2030 роки: Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних

- «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
 11. Енергетична безпека України: стратегія та механізми забезпечення / А. І. Шевцов, М. Г. Земляний, В. О. Бараннік [та ін.]; за ред. А. І. Шевцова. Дніпропетровськ: Пороги, 2002. 264 с.
 12. Суходоля О. М. Законодавче забезпечення та механізми управління у сфері енергетичної безпеки України. Стратегічні пріоритети. 2019. № 2. С. 13–26
 13. Суходоля О. М. Стійкість функціонування енергетичної системи чи стійкість енергозабезпечення споживачів: постановка проблеми. Стратегічні пріоритети. 2018. № 2. С. 101–117.
 14. Суходоля О. М. Проблеми визначення сфери регулювання енергетичної безпеки. Стратегічні пріоритети. 2019. № 1. С. 5–17.
 15. Енергетична безпека України. Світові та національні виклики / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2006. 408 с.
 16. Бобров Є. Енергетична безпека держави: монографія. Київ: Ун-т економіки та права «КРОК», 2013. 308 с.
 17. Luft G., Korin A. (Eds.). Energy Security Challenges for the 21st Century: A Reference Handbook. Praeger Security International, 2009.
 18. Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування: аналіт. доп. / [Суходоля О. М., Харазішвілі Ю. М., Бобро Д. Г., Сменковський А. Ю., Рябцев Г. Л., Завгородня С. П.] ; за заг. ред. О. М. Суходолі. – Київ: НІСД, 2020. – 178 с.
 19. Харазішвілі Ю. М., Дронь Є. В. Прогнозування індикаторів, порогових значень та рівня економічної безпеки України у середньостроковій перспективі : аналіт. доп. Київ : НІСД, 2014. 117 с.

20. Carvalho, P.M.S.; Ferreira, L.A.F.M.; Santana, J.J.E.; Dias, A.M.F. Combined effects of load variability and phase imbalance onto simulated LV losses. *IEEE Trans. Power Syst.* 2018, 33, 7031–7041. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Peralta, J.; de Leon, F.; Mahseredjian, J. Assessment of errors introduced by common assumptions made in power system studies. In Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 24–28 July 2011. [Google Scholar]
22. Ciontea, C.; Sera, D.; Iov, F. Influence of resolution of the input data on distributed generation integration studies. In Proceedings of the 14th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, Romania, 22–24 May 2014. [Google Scholar]
23. Lucas, A. Single-phase PV power injection limit due to voltage unbalances applied to an urban reference network using real-time simulation. *Appl. Sci.* 2018, 8, 1333. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
24. Shahnian, F.; Majumder, R.; Ghosh, A.; Ledwich, G.; Zare, F. Voltage imbalance analysis in residential low voltage distribution networks with rooftop PVs. *Electr. Power Syst. Res.* 2011, 81, 1805–1814. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Ochoa, L.F.; Ciric, R.M.; Padilha-Feltrin, A.; Harrison, G.P. Evaluation of distribution system losses due to load unbalance. In Proceedings of the 15th Power Systems Computation Conference, Liege, Belgium, 22–26 August 2005. [Google Scholar]
26. Yan, R.; Saha, T.K. Investigation of voltage imbalance due to distribution network unbalanced line configurations and load levels. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013, 28, 1829–1838. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Valois, P.V.S.; Tahan, C.M.V.; Kagan, N.; Arango, H. Voltage unbalance in low voltage distribution networks. In Proceedings of the 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Part 1: Contributions. CIRED (IEE Conf. Publ. No. 482), Amsterdam, The Netherlands, 18–21 June 2001. [Google Scholar]
28. Meyer, J.; Möller, F.; Perera, S.; Elphick, S. General definition of unbalanced power to calculate and assess unbalance of customer installations. In Proceedings of the

- 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), Kärđla, Estonia, 12–15 June 2019. [Google Scholar]
29. Tavakoli, B.M.; Kashefi, A. Three-phase unbalance of distribution systems: Complementary analysis and experimental case study. *Electr. Power Energy Syst.* 2011, 33, 817–826. [Google Scholar]
 30. Ciontea, C.I.; Bak, C.L.; Blaabjerg, F.; Madsen, K.K.; Sterregaard, C.H. Fault analysis for protection purposes in maritime applications. In Proceedings of the 13th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP), Edinburgh, UK, 7–10 March 2016. [Google Scholar]
 31. Arghavani, H.; Peyravi, M. Unbalanced current-based tariff. In Proceedings of the 24th International Conference & Exhibition n Electricity Distribution (CIRED), Glasgow, UK, 12–15 June 2017. [Google Scholar]
 32. Ma, K.; Fang, L.; Kong, W. Review of distribution network phase imbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions. *CSEE J. Power Energy Syst.* 2020, 6, 479–488. [Google Scholar]
 33. Klonari, V.; Lobry, J.; Vallée, F.; Meersman, B.; Bozalakov, D.; Vandoorn, T.L. Long term assessment of a voltage unbalance mitigation scheme implemented by photovoltaic inverters. In Proceedings of the IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Leuven, Belgium, 4–8 April 2016. [Google Scholar]
 34. Ciontea, C.I. The use of symmetrical components in electrical protection. In Proceedings of the 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), College Station, TX, USA, 25–28 March 2019. [Google Scholar]
 35. Fang, L.; Ma, K.; Li, R.; Wang, Z. A statistical approach to estimate imbalance-induced energy losses for data-scarce low voltage networks. *IEEE Trans. Power Syst.* 2019, 34, 2825–2835. [Google Scholar] [CrossRef]
 36. Shigenobu, R.; Nakadomari, A.; Hong, Y.Y.; Mandal, P.; Takahashi, H.; Senjyu, T. Optimization of voltage unbalance compensation by smart inverter. *Energies* 2020, 13, 8. [Google Scholar] [CrossRef]

37. Anwari, M.; Hiendro, A. New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under- and overvoltage unbalance. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2010, 25, 619–625. [Google Scholar] [CrossRef]
38. Ruiz-Rodriguez, F.J.; Hernández, J.C.; Jurado, F. Voltage unbalance assessment in secondary radial distribution networks with single-phase photovoltaic systems. *Electr. Power Energy Syst.* 2015, 64, 646–654. [Google Scholar] [CrossRef]
39. Fristot, P.; Constant, O.; Moncet, C. 3-phase low voltage network load balancer: A cost effective solution to line voltage variations. In Proceedings of the in 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2015), Lyon, France, 15–18 June 2015. [Google Scholar]
40. Bajo, C.G.; Hashemi, S.; Kjær, S.B.; Yang, G.; Østergaard, J. Voltage unbalance mitigation in LV networks using three-phase PV systems. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, Spain, 17–19 March 2015. [Google Scholar]
41. Girigoudar, K.; Molzahn, D.K.; Roald, L.A. On the relationships among different voltage unbalance definitions. In Proceedings of the 2019 North American Power Symposium (NAPS), Wichita, KS, USA, 13–15 October 2019. [Google Scholar]
42. IEC. *IEC 61000-3-14: Assessment of Emission Limits for Harmonics, Interharmonics, Voltage Fluctuations and Unbalance for the Connection of Disturbing Installations to LV Power Systems*; IEC: Geneva, Switzerland, 2011. [Google Scholar]
43. IEEE. *IEEE Standard 141-1993: Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*; IEEE: New York, NY, USA, 1994. [Google Scholar]
44. CENELEC. *EN 50160-2010: Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*; CENELEC: Brussels, Belgium, 2010. [Google Scholar]
45. ANSI. *C84.1: Electric Power Systems and Equipment—Voltage Ratings (60 Hz)*; ANSI: Rosslyn, VA, USA, 2016. [Google Scholar]

46. Todorovski, M. Transformer Voltage Regulation—Compact expression dependent on tap position and primary/secondary voltage. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2014, 29, 1516–1517. [Google Scholar] [CrossRef]
47. Lee, J.; Kim, G.H. Comparison analysis of the voltage variation ranges for distribution networks. In Proceedings of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Milan, Italy, 6–9 June 2017. [Google Scholar]
48. Saadat, H. *Power System Analysis*, 2nd ed.; McGraw Hill: New York, NY, USA, 2004. [Google Scholar]
49. Kasikci, I. *Short Circuits in Power Systems. A Practical Guide to IEC60909*; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 2002. [Google Scholar]