

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, О. В Степура

**ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ
СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2021

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/630>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621.316.7

Б-91

Рекомендовано до друку Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 29.04.2021 р.)

Рецензенти:

О. Г. Гриб, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

Бурбело, М. Й.

Б-91 Виявлення та оцінювання джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах : монографія [Електронний ресурс] / М. Й. Бурбело, О. В. Степура. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 96 с.

ISBN 978-966-641-886-2

В монографії висвітлені теоретичні засади і практичні аспекти виявлення джерел спотворень якості електроенергії в розподільчих електричних мережах за несиметрії та несинусоїдності струмів і напруг. Монографія розрахована на широке коло інженерно-технічних працівників, які займаються електричними вимірюваннями, компенсацією неактивних потужностей. Книга може бути корисною студентам та аспірантам електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 621.316.7

ISBN 978-966-641-886-2

© М. Бурбело, О. Степура, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СПОЖИВАЧІВ НА ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	7
1.1 Метод дольового внеску споживачів в спотворення напруги	7
1.2 Методи, які основані на використанні балансу потужностей.....	13
1.3 Багатоточкові методи визначення фактичних внесків споживачів в погіршення якості електроенергії.....	19
1.4 Висновки та основні задачі дослідження	24
РОЗДІЛ 2 ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОЗПОДІЛЬЧІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛАДНИКІВ ПУЛЬСУЮЧОЇ ПОТУЖНОСТІ	25
2.1 Активна та реактивна потужності в несинусоїдних несиметричних режимах електричних мереж.....	25
2.2 Пульсуючі потужності та умовні потужності зворотної послідовності.....	30
2.3 Визначення складників пульсуючої потужності в спектральній формі.....	33
2.4 Виявлення джерел спотворень в розподільчих мережах за складниками пульсуючої потужності	37
2.5 Висновки до розділу 2	43
РОЗДІЛ 3 ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОЗПОДІЛЬЧІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ МИТТЄВИХ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ	44
3.1 Миттєві симетричні складові напруг і струмів	44
3.2 Виявлення джерел спотворень за наявності канонічних гармонік з використанням миттєвих симетричних складових ...	49
3.3 Виявлення джерел спотворень в мережах із заземленою нейтраллю за наявності гармонік, що кратні трьом.....	56
3.4 Дослідження впливу опору системи (потужності і схеми сполучення обмоток силового трансформатора)	63
3.5 Висновки до розділу 3	66

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ВІЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ.....	68
4.1 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням реактивної потужності	68
4.2 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням потужностей спотворень	70
4.3 Аналіз чутливості виявлення джерел спотворень з використанням умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей струмів і напруг.....	73
4.4 Висновки до розділу 4	79
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА АСКОЕ З ФУНКЦІЄЮ ВІЯВЛЕННЯ СПОЖИВАЧІВ, ЯКІ СПОТВОРЮЮТЬ ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	80
5.1 Структурна схема АСКОЕ з виявленням споживачів, які спотворюють якість електроенергії	80
5.2 Принцип роботи АСКОЕ з виявленням споживачів, які спотворюють якість електроенергії	82
5.3 Висновки до розділу 5	84
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АД – асинхронний двигун;
АРМ – автоматизоване робоче місце;
АСКОЕ – автоматизована система контролю та обліку електро-
споживання;
ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;
ГС – гармонічна складова;
ДВ – дольовий внесок;
ЕЕС – електроенергетична система;
ЕЗ – елемент затримки в часі;
КК – комутатор каналів (каналів опитування точок обліку спожи-
вачів);
МК – мікроконтролер;
ПЗПД – підсистема зберігання та передачі даних;
ПН – перетворювач напруг;
ПС – перетворювач струмів;
ПП – перетворювач потужності;
ППР – підсистема прийняття рішень щодо спотворення ЯЕ;
СП – силові перетворювачі;
СС – симетрична складова;
ТН – трансформатор напруги;
ТС – трансформатор струму;
ТЗП – точка загального приєднання;
ФКП – фільтрокомпенсувальний пристрій;
ЯЕ – якість електроенергії;
 Σ – суматор;
GPRS – модем стандарту GSM/GPRS;
HSE – оцінка гармонічного стану (harmonic state estimation);
RTU-325 – пристрій збору та передачі даних;
SVD – сингулярне розкладання (singular value decomposition).

ВСТУП

Особливої актуальності в останні роки набула проблема виявлення та оцінювання впливу нелінійних і несиметричних споживачів на погіршення якості електроенергії в розподільчих електричних мережах. Нелінійні та несиметричні навантаження є джерелами струмів вищих гармонік і струмів трифазних симетричних складових зворотної та нульової послідовностей, які знижують якість електричної енергії, збільшують її втрати.

В [1] рекомендовано метод визначення споживача, що погіршує якість електроенергії (ЯЕ), і оцінювання його внеску в погіршення показника ЯЕ, згідно з яким порівнюють значення показників ЯЕ при вимкненому та увімкненому споживачі, що дозволяє виявити джерело спотворення і його внесок в спотворення в певний момент часу. Недоліком є те, що фіксують показники ЯЕ до приєднання споживача, які в подальшому вважають незмінними, а зміни параметрів ЯЕ після приєднання споживача пояснюють впливом лише останнього приєднаного споживача, що не завжди відповідає дійсності.

Для експериментального визначення відповідальності споживача за погіршення ЯЕ без його вимкнення запропоновано метод з використанням дольового внеску споживачів в спотворення напруги [2–9]. В [10–13] для експериментального визначення дольового внеску використано активний експеримент. Однак ці методи є достатньо складними в реалізації. В [14–17] обґрунтовано метод оцінювання впливу навантажень споживача на рівень напруги n -ї ГС, що володіє властивістю автономності.

В [18, 19] запропонований метод балансу активних та реактивних потужностей для s -ї симетричної складової (СС) зворотної та нульової послідовностей та n -ї гармонічної складової (ГС). Цей метод був проаналізований і доповнений в [20–31]. Група експериментальних методів оснований на використанні інтегральних потужностей, які враховують одночасно всі гармонічні складники струмів і напруг [32–36]. В [37–39] запропоновано використовувати напрямки і значення умовних потужностей спотворення, які визначають як добуток напруги прямої послідовності основної гармоніки на комплексний струм n -ї ГС.

Незважаючи на велику кількість досліджень в області виявлення джерел гармонік, існують певні побоювання з точки зору ідентифікації джерел динамічних гармонік та можливості адаптації методів до постійно мінливих навантажень в розподільчих мережах.

Монографія присвячена підвищенню чутливості виявлення нелінійних і несиметричних споживачів.

РОЗДІЛ 1
МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СПОЖИВАЧІВ
НА ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Метод дольового внеску споживачів в спотворення напруги

Найбільш поширеним для оцінки впливу джерел вищих гармонік та несиметричних навантажень на погіршення ЯЕ є метод з використанням дольового внеску споживачів в спотворення напруги [2–8].

Розглянемо схему заміщення вузла мережі (рис. 1.1). На схемі позначено: $\dot{I}_{(n)m}$ – комплексний струм спотворення n -ї ГС для m -го приєднання; $\underline{Z}_{(n)m}$ – комплексний опір навантаження на n -ій ГС для m -го приєднання; $\underline{Z}_{(n)T}$ – комплексний опір трансформатора на n -ій ГС. Опір трансформатора визначається з урахуванням того, що струми 4, 7, ..., 2, 5, ... гармонік утворюють відповідно пряму та зворотну послідовність, а струми 3, 6, ... гармонік – нульову послідовність. В опорі трансформатора за необхідності можна врахувати опір лінії прямої та зворотної послідовності.

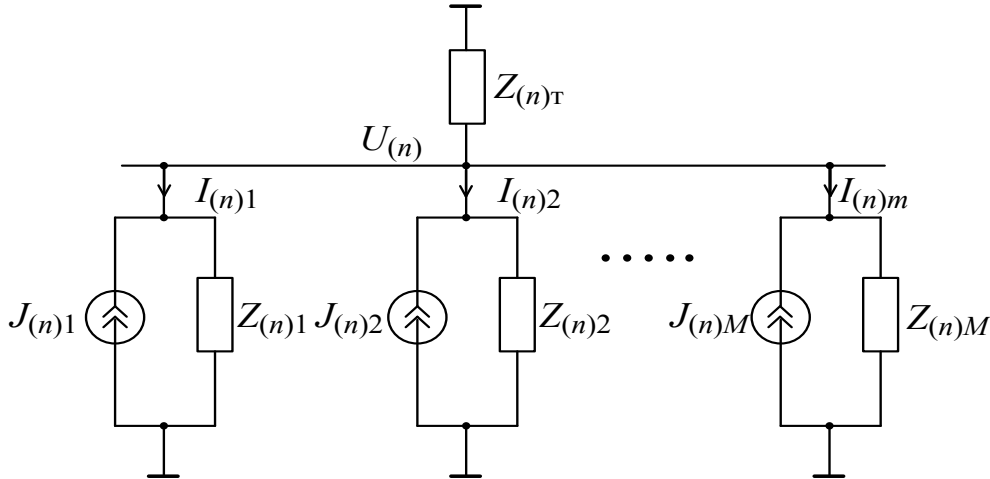


Рисунок 1.1 – Повна схема заміщення вузла мережі для n -ї ГС

Комплексна напруга n -ї гармонічної складової (ГС) або s -ї симетричної складової (СС) в точці загального приєднання (ТЗП) визначається такими виразами [2]:

$$\dot{U}_{(n)} = \sum_{m=1}^M \dot{J}_{(n)m} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{n(m)} ; \dot{U}_{(s)} = \sum_{m=1}^M \dot{J}_{(s)m} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{(s)m} , \quad (1.1)$$

де $\underline{J}_{(n)m}$ – комплексний струм спотворення n -ї ГС для m -го приєднання; $\underline{Y}_{(n)m}$ – комплексна провідність навантаження на n -ій ГС для m -го приєднання ($\underline{Y}_{(n)m} = 1/\underline{Z}_{(n)m}$); $\underline{J}_{(s)m}$ – комплексний струм s -ї СС для m -го приєднання; $\underline{Y}_{(s)m}$ – комплексна провідність навантаження на s -ій СС для m -го приєднання; M – кількість приєднань у вузлі мережі.

Дольовий внесок (ДВ) від джерел гармонічних складових струму або джерел струму зворотної та нульової послідовностей визначають як модуль вектора напруги n -ї гармоніки або модуль вектора напруги зворотної та нульової послідовності, що створює певний суб'єкт в ТЗП. ДВ k -го приєднання в рівень n -ї гармонічної складової (ГС) або s -ї симетричної складової (СС) у вузлі мережі визначається за виразом:

$$\dot{U}_{(n)k}^{DB} = \underline{J}_{(n)k} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{(n)m}; \quad \dot{U}_{(s)k}^{DB} = \underline{J}_{(s)k} / \sum_{m=1}^M \underline{Y}_{(s)m}, \quad (1.2)$$

де $\underline{J}_{(n)k}$ – комплексний струм n -ї ГС для k -го приєднання; $\underline{J}_{(s)k}$ – комплексний струм s -ї СС для k -го приєднання.

Відносно будь-якого споживача схему заміщення можна спростити (рис. 1.2). Джерело спотворення споживача подано джерелом струму навантаження $\underline{J}_{(n)n}$, а решти споживачів – джерелом системи $\underline{J}_{(n)c}$. Опори навантаження споживача і системи позначено $\underline{Z}_{(n)n}$, $\underline{Z}_{(n)c}$. Опір $\underline{Z}_{(n)c}$ визначається як результат паралельного увімкнення опору трансформатора і опорів навантаження решти споживачів.

Розглянемо схему заміщення вузла мережі (рис. 1.2).

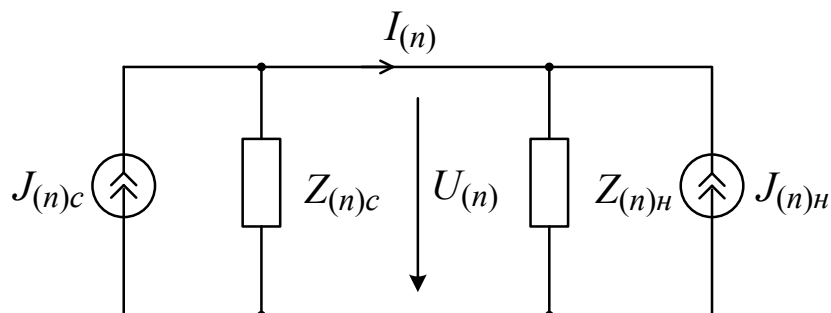


Рисунок 1.2 – Спрощена схеми заміщення вузла мережі для n -ї ГС

Напряга n -ї ГС на межі балансової належності дорівнює сумі дольових внесків системи і навантаження

$$\dot{U}_{(n)} = \dot{U}_{(n)c}^{ДВ} + \dot{U}_{(n)н}^{ДВ} = \dot{J}_{(n)c} \frac{\underline{Z}_{(n)н} \underline{Z}_{(n)c}}{\underline{Z}_{(n)н} + \underline{Z}_{(n)c}} + \dot{J}_{(n)н} \frac{\underline{Z}_{(n)н} \underline{Z}_{(n)c}}{\underline{Z}_{(n)н} + \underline{Z}_{(n)c}}. \quad (1.3)$$

Струм n -ї ГС на межі балансової належності дорівнює різниці фактичних внесків системи і навантаження

$$\dot{I}_{(n)} = \dot{I}_{(n)c}^{ДВ} - \dot{I}_{(n)н}^{ДВ} = \dot{J}_{(n)c} \frac{\underline{Z}_{(n)c}}{\underline{Z}_{(n)н} + \underline{Z}_{(n)c}} - \dot{J}_{(n)н} \frac{\underline{Z}_{(n)н}}{\underline{Z}_{(n)н} + \underline{Z}_{(n)c}}. \quad (1.4)$$

Струми n -ї ГС навантаження $\dot{J}_{(n)н}$ і системи $\dot{J}_{(n)c}$ невідомі. Відомими є напруга і струм n -ї ГС на межі балансової належності. Опір системи приблизно відомий. Він практично визначається опором понижувального трансформатора. Опір навантаження невідомий. Відомий лише діапазон зміни опору споживача, який залежить від складу та діапазону зміни навантаження.

Залежності діючих значень напруги і струму n -ї ГС від кута $\delta_{(n)}$ для випадку $\underline{Z}_{(n)c} = 0,002 + j0,05$ Ом, $\underline{Z}_{(n)н} = 1 + j2,5$ Ом, $\dot{J}_{(n)c} = 5e^{j0}$ А, $\dot{J}_{(n)н} = 5e^{j\delta_{(n)}}$ А зображено на рис. 1.3.

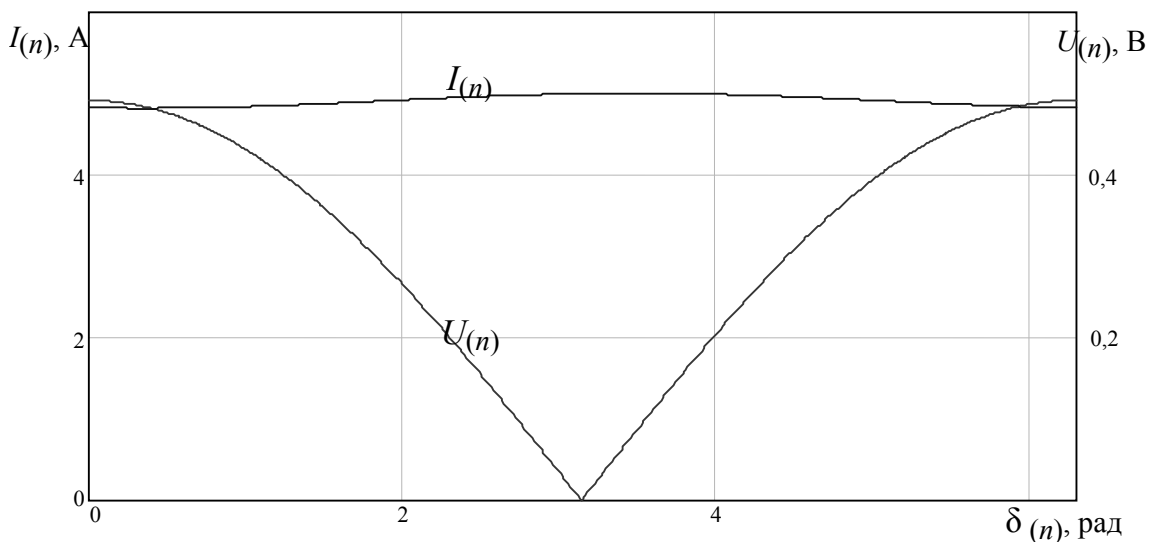


Рисунок 1.3 – Залежності напруги і струму від кута $\delta_{(n)}$

Оскільки опір навантаження приблизно в 50 разів більший від опору системи, то струм n -ї ГС на межі балансової належності практично визначається струмом спотворення споживача (див. вирази (1.4)). Отже, наявність струму n -ї ГС на межі балансової належності системи і споживача свідчить про наявність спотворення в навантаженні споживача.

Метод дольових внесків виявлення гармонічних джерел полягає у вимірюванні гармонічних напруг і струмів на межі балансової належності, уточненні опорів системи і навантаження, а потім обчисленні дольового внеску гармонічних джерел [4–8].

Розглянемо схему заміщення вузла мережі (рис. 1.2). Струм n -ї ГС на межі балансової належності можна виразити через струми спотворення системи $J_{(n)c}$ і навантаження $J_{(n)н}$:

$$\dot{I}_{(n)} = \dot{J}_{(n)c} - \frac{\dot{U}_{(n)}}{\underline{Z}_{(n)c}}; \quad \dot{I}_{(n)} = -\dot{J}_{(n)н} + \frac{\dot{U}_{(n)}}{\underline{Z}_{(n)н}}. \quad (1.5)$$

З урахуванням (1.5) вирази для дольових внесків системи і навантаження в зниження якості електроенергії набудуть вигляду:

$$\dot{U}_{(n)c}^{ДВ} = \frac{(\dot{U}_{(n)} + \dot{I}_{(n)}\underline{Z}_{(n)c})\underline{Z}_{(n)н}}{\underline{Z}_{(n)н} + \underline{Z}_{(n)c}}; \quad \dot{U}_{(n)н}^{ДВ} = \frac{(\dot{U}_{(n)} - \dot{I}_{(n)}\underline{Z}_{(n)н})\underline{Z}_{(n)c}}{\underline{Z}_{(n)н} + \underline{Z}_{(n)c}}. \quad (1.6)$$

З (1.5) також випливає, що у разі сталого значення струму спотворення в системі і зміни струму спотворення в навантаженні можна визначити опір системи, а у разі сталого значення струму спотворення навантаження і зміни струму спотворення в системі можна визначити опір навантаження:

$$\underline{Z}_{(n)c} = - \left. \frac{\Delta \dot{U}_{(n)}}{\Delta \dot{I}_{(n)}} \right|_{J_{(n)н} = \text{var}}; \quad \underline{Z}_{(n)н} = \left. \frac{\Delta \dot{U}_{(n)}}{\Delta \dot{I}_{(n)}} \right|_{J_{(n)c} = \text{var}}. \quad (1.7)$$

У такому випадку дійсна частина еквівалентного опору $\underline{Z}_{(n)e} = \frac{\Delta \dot{U}_{(n)}}{\Delta \dot{I}_{(n)}}$ може виступати як критерій наявності джерела спотворення в системі або в навантаженні. Якщо дійсна частина опору $\underline{Z}_{(n)e}$

додатна, то джерело гармоніки знаходиться в системі. Якщо дійсна частина опору $Z_{(n)e}$ від'ємна, то джерело гармоніки знаходиться на стороні споживача [8].

Оскільки цей метод ґрунтується на гармонічних варіаціях, які є відносно слабкими, то дуже важко визначити гармонічний опір з достатньою точністю. Недоліками методу є: а) високі вимоги до вимірювання гармонік напруги та струму, особливо щодо їх аргументів; б) оскільки інтервал часу між вимірами повинен бути малим (1–3 с), то вимагається велика кількість розрахунків; в) точність розрахунків може бути досягнута виключно тоді, коли домінуюче джерело гармонік знаходиться на одній стороні [9].

В [10–13] для експериментального визначення фактичного внеску навантаження та системи в зниження якості електроенергії запропоновано використовувати метод активного експерименту (увімкнення або вимкнення конденсаторної батареї, увімкнення трансформаторів на паралельну роботу, перемикання регульовального відгалуження трансформатора, збільшення активного опору фільтрокомпенсувального пристрою).

Ці методи є достатньо складними в реалізації. Наприклад, для реалізації методу із застосуванням фільтрокомпенсувального пристрою (ФКП) для визначення джерела вищих гармонік, що вносить найбільший вклад в коефіцієнт гармонічних складових напруги електричної мережі промислового підприємства необхідно [13]:

- провести аналіз спектра гармонік і визначити гармоніки, які вносять найбільший внесок в сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги;
- варіюючи активний опір ФКП, слід отримати залежність струму системи від $R_{\text{ФКП}}$.
- якщо функція має увігнутий вигляд, або опуклий з наявністю екстремуму, то найбільший вплив на установки конденсаторних батарей матимуть спотворення в напрузі, що викликані мережею живлення;
- якщо функція має опуклий характер, без наявності екстремумів, то найбільший вплив робить спотворення струму, викликаного нелінійним навантаженням самого підприємства.

В [14–17] обґрунтовано метод оцінювання впливу навантажень споживача на рівень напруги n -ї ГС в ТЗП, що володіє на відміну від

методу ДВ властивістю автономності. На основі введених коефіцієнтів збігу за фазою струмів $K_{cI(n)}$ та провідностей $K_{cY(n)}$:

$$K_{cI(n)} = \left| \frac{\sum_{m=1}^M \dot{I}_{(n)m}}{\sum_{m=1}^M |\dot{I}_{(n)m}|} \right|; \quad K_{cY(n)} = \left| \frac{\sum_{m=1}^M \underline{Y}_{n(m)}}{\sum_{m=1}^M |\underline{Y}_{n(m)}|} \right|, \quad (1.8)$$

які можуть приймати значення на проміжку від 0 до 1, вираз для модуля напруги набуде вигляду:

$$U_{(n)} = \frac{K_{cI(n)} \sum_{m=1}^M |\dot{I}_{(n)m}|}{K_{cY(n)} \sum_{m=1}^M |\underline{Y}_{n(m)}|}. \quad (1.9)$$

Відношення $K_{cY(n)}/K_{cI(n)}$ названо коефіцієнтом вигідності, оскільки характеризує вигідність сумісного увімкнення навантажень споживача для зниження напруги n -ї ГС. Теоретично коефіцієнт вигідності може приймати значення від нуля (умова резонансу струмів) до безмежно великого значення (умова взаємної компенсації струмів ГС).

Умова допустимості режиму за напругою n -ї ГС в ТЗП має такий вигляд:

$$\sum_{m=1}^M \left(|\underline{Y}_{n(m)}| U_{(n)\text{доп}} \frac{K_{cY(n)}}{K_{cI(n)}} - |\dot{I}_{(n)m}| \right) \geq 0. \quad (1.10)$$

Достатньою умовою виконання нерівності (1.10) є додатне значення кожного складника. Це забезпечить всім споживачам однакові умови, необхідні для підтримання $U_{(n)} \leq U_{(n)\text{доп}}$ в допустимих межах. Тоді для k -го приєднання достатньо виконати умову:

$$K_{впл} = \frac{\left(U_{(n)\text{доп}} - \frac{|\dot{I}_{(n)k}|}{|\underline{Y}_{(n)k}|} \right)}{U_{(n)\text{доп}}} \geq 0, \quad (1.11)$$

де $K_{впл}$ – коефіцієнт впливу.

Якщо $K_{впл}$ від'ємний, то навантаження k -го споживача недопустимо спотворюють напругу за рахунок генерації n -ї ГС.

Встановлено, що [17]:

1. Споживач, який не спотворює ЯЕ, за будь-якого характеру навантажень у зовнішній мережі не може бути винен у спотворенні напруги і має $K_{впл} \geq 1$.

2. Споживач, який спотворює ЯЕ, будь-якої потужності визнається винним у погіршенні ЯЕ і має негативний $K_{впл}$. При цьому не має значення, як розташований вектор його струму спотворення щодо еквівалентного струму спотворення ЕЕС. Навіть якщо ці струми компенсують один одного, і напруга спотворення в ТЗП мала, то споживач винен в погіршенні ЯЕ і повинен вжити заходів щодо зменшення власного струму спотворення.

3. Змішаний споживач може здійснювати як позитивний, так і негативний вплив на ЯЕ в залежності від автономної напруги спотворення. Останнє залежить тільки від параметрів споживача і не залежить від взаємного розташування векторів струмів спотворення і провідностей споживача і системи.

Таким чином, для визначення струмів n -ї ГС навантаження $\dot{J}_{(n)n}$ і системи $\dot{J}_{(n)c}$ можна використати вимірювання напруг $\dot{U}_{(n)}$, струмів $\dot{I}_{(n)}$, окремих ГС, однак можливість застосування таких методів обмежується відношенням $|\dot{J}_{(n)n}| > |\dot{J}_{(n)c}|$.

1.2 Методи, які основані на використанні балансу потужностей

Для експериментального визначення відповідальності споживача за погіршення ЯЕ без його вимкнення одним з перших був запропонований метод балансу активних та реактивних потужностей для s -ї симетричної складової (СС) зворотної та нульової послідовностей та n -ї гармонічної складової (ГС) на межі балансової належності [18, 19], згідно з яким вважають, що окрім основного потоку енергії з мережі до навантаження, що визначається симетричною складовою прямої послідовності основної гармоніки, для несиметричних та нелінійних навантажень існує вторинний потік енергії, який направлений в електричну мережу, що зумовлений симетричними складовими зворотної

та нульової послідовностей промислової частоти та вищими гармоніками.

Вирази для визначення вторинної активної та реактивної потужностей мають такий вигляд [18]:

$$P_{\text{em}} = 3U_{21}I_{21} \cos \varphi_{21} + 3U_{01}I_{01} \cos \varphi_{01} + \sum_n 3U_{1n}I_{1n} \cos \varphi_{1n} + \sum_n (3U_{2n}I_{2n} \cos \varphi_{2n} + 3U_{0n}I_{0n} \cos \varphi_{0n}); \quad (1.12)$$

$$Q_{\text{em}} = 3U_{21}I_{21} \sin \varphi_{21} + 3U_{01}I_{01} \sin \varphi_{01} + \sum_n 3U_{1n}I_{1n} \sin \varphi_{1n} + \sum_n (3U_{2n}I_{2n} \sin \varphi_{2n} + 3U_{0n}I_{0n} \sin \varphi_{0n}), \quad (1.13)$$

де U_{sn}, I_{sn} – напруга і струм s -ї послідовності n -ї гармоніки; φ_{1n} – кут зсуву фаз між напругою і струмом s -ї послідовності n -ї гармоніки.

Активну та реактивну потужності n -ї ГС описують виразами:

$$P_{(n)} = J_{(n)H} J_{(n)C} Z_{(n)} \sin(\delta_{(n)} + \beta_{(n)}) - J_{(n)H}^2 Z_{(n)} \sin \beta_{(n)}; \quad (1.14)$$

$$Q_{(n)} = J_{(n)H} J_{(n)C} Z_{(n)} \cos(\delta_{(n)} + \beta_{(n)}) - J_{(n)H}^2 Z_{(n)} \cos \beta_{(n)}, \quad (1.15)$$

де $\delta_{(n)}$ – кут між векторами струмів спотворення системи та навантаження $\dot{J}_{(n)C}, \dot{J}_{(n)H}$; $\beta_{(n)} = \arctg(R_{(n)} / X_{(n)})$ – кут, що доповнює до 90 ел. градусів кут між векторами гармонічної напруги та струму.

Якщо складники активної та реактивної потужностей s -ї послідовності n -ї гармоніки від'ємні, то вони направлені від споживача в мережу (від джерела спотворення) і споживачі повинні нести відповідальність за зниження показників ЯЕ.

В [20] доведено, що активну потужність n -ї ГС не можна використовувати для виявлення джерела спотворення. Це пояснюється тим, що напруга ГС визначається струмами спотворення як системи, так і навантаження в рівній мірі і значення активної потужності не характеризують однозначно внесок споживача в зниження ЯЕ.

На рис. 1.4 зображено залежності активної та реактивної потужностей n -ї ГС від кута $\delta_{(n)}$ для випадку $\underline{Z}_{(n)C} = 0,002 + j0,05$ Ом,

$$\underline{Z}_{(n)H} = 1 + j2,5 \text{ Ом}, \quad \dot{J}_{(n)C} = 5e^{j0} \text{ А}, \quad \dot{J}_{(n)H} = 5e^{j\delta_{(n)}} \text{ А}.$$

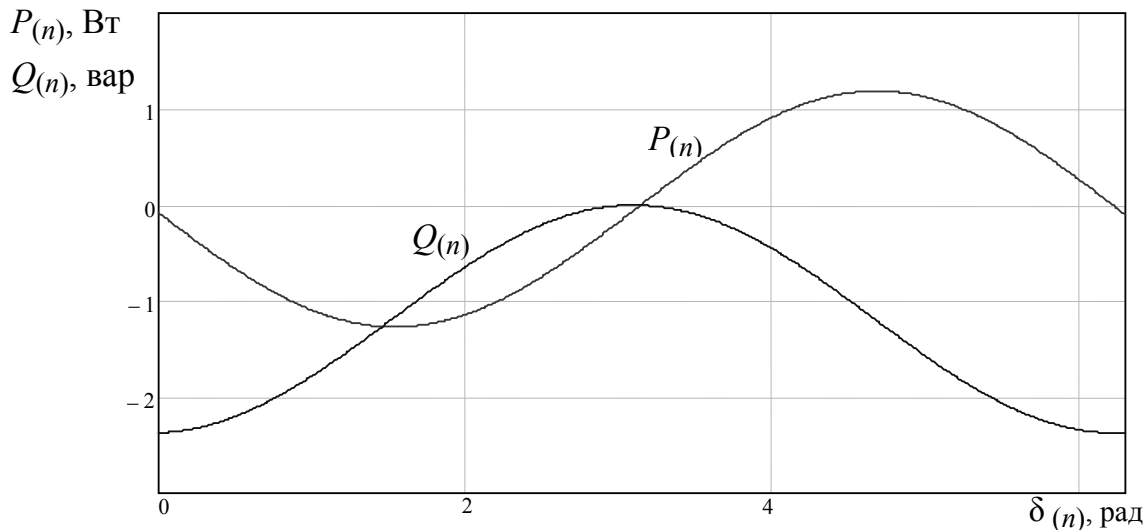


Рисунок 1.4 – Залежності активної та реактивної потужностей від кута $\delta_{(n)}$
за рівних струмів спотворення системи і навантаження

За рівних струмів спотворення системи і навантаження значення активної потужності n -ї ГС може мати як додатне, так і від'ємне значення в залежності від кута $\delta_{(n)}$. Отже, активну потужність n -ї ГС, дійсно, не можна використовувати для виявлення джерела спотворення.

Зокрема, в [21] показано, що активна і реактивна потужності на межі балансової належності для кожної гармоніки за наявності джерел вищих гармонік зі сторони системи і навантаження будуть:

$$P_{(n)} = J_{(n)c}^2 \frac{Z_{(n)c}^2}{Z_{(n)\Sigma}^2} R_{(n)n} - J_{(n)n}^2 \frac{Z_{(n)n}^2}{Z_{(n)\Sigma}^2} R_{(n)c} +$$

$$+ J_{(n)c} J_{(n)n} \frac{\left(Z_{(n)c}^2 R_{(n)n} - Z_{(n)n}^2 R_{(n)c} \right) \cos \delta_{(n)} + \left(Z_{(n)c}^2 X_{(n)n} + Z_{(n)n}^2 X_{(n)c} \right) \sin \delta_{(n)}}{Z_{(n)\Sigma}^2};$$

(1.16)

$$Q_{(n)} = J_{(n)c}^2 \frac{Z_{(n)c}^2}{Z_{(n)\Sigma}^2} X_{(n)n} - J_{(n)n}^2 \frac{Z_{(n)n}^2}{Z_{(n)\Sigma}^2} X_{(n)c} +$$

$$+ J_{(n)c} J_{(n)n} \frac{\left(Z_{(n)c}^2 X_{(n)n} - Z_{(n)n}^2 X_{(n)c} \right) \cos \delta_{(n)} + \left(Z_{(n)c}^2 R_{(n)n} + Z_{(n)n}^2 R_{(n)c} \right) \sin \delta_{(n)}}{Z_{(n)\Sigma}^2};$$

(1.17)

де $Z_{(n)\Sigma}^2 = (R_{(n)c} + R_{(n)n})^2 + (X_{(n)c} + X_{(n)n})^2$ – квадрат повного опору системи і навантаження на n -ій гармоніці.

Наявність взаємного складника не дає змоги визначити однозначну залежність значення або напрямку активної (реактивної) потужності n -ї ГС. Тому в [21] пропонується потужність n -ї ГС інтегрувати на інтервалі часу.

Значення реактивної потужності n -ї ГС за рівних струмів спотворення системи і навантаження має від'ємне значення за будь-якого кута $\delta_{(n)}$ окрім вузької зони, коли струми спотворення знаходяться в протифазі. Отже, реактивна потужність може бути використана для виявлення споживача, що має переважний вплив на спотворення якості електроенергії.

Авторами в [22–27] було запропоновано використання методу балансу активної та реактивної потужностей із застосуванням перетворення Парка для трифазної системи.

В другій модифікації методу визначають кут між струмом і напругою вищих гармонік або симетричних складових зворотної та нульової послідовностей і за характером цього кута визначають чи є споживач джерелом спотворення [28].

В [29] використано метод реактивної потужності, а в [30, 31] метод реактивної потужності розширений концепцією критичного імпедансу. Ключову ідею цього методу можна підсумувати таким чином. Реактивна потужність n -ї ГС, що генерується споживачем, оцінюється в першу чергу. Потім визначають еквівалентний опір або провідність, які називаються критичним імпедансом та критичним адмітансом:

$$CI = \frac{2 \cdot Q_{(n)}}{I_{(n)}^2}; CA = \frac{2 \cdot Q_{(n)}}{U_{(n)}^2}. \quad (1.18)$$

Порівнюючи CI (або CA) з відомим діапазоном імпедансу (або адмітансу) системи, можна знайти розташування джерела гармонік.

Недоліком такого підходу є неможливість виявлення споживача, що спотворює якість електроенергії у разі, якщо $\dot{J}_{(n)n} \leq \dot{J}_{(n)c}$.

Ще одним недоліком використання реактивної потужності n -ї гармоніки є їх відносна малість (десяті, соті частки відсотка від потужності основної гармоніки прямої послідовності). У разі якщо опір мережі малий (жорстка мережа), то спади напруг незначні. Розрахунок

реактивної потужності ускладнений через неможливість точно виміряти амплітуди і початкові фази напруг вищих гармонік.

Група експериментальних методів оснований на використанні інтегральних потужностей, які враховують одночасно всі гармонічні складники струмів і напруг. Авторами [32] пропонується для виявлення нелінійних споживачів використати порівняння реактивної потужності на основній гармоніці, реактивної потужності за С. Фрізе та реактивної потужності за Д. Шароном, відповідно:

$$Q_1 = U_{(1)} I_{(1)} \sin \varphi_{(1)}; Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}; Q_S = U \sqrt{\sum_n I_{(n)}^2 \sin^2 \varphi_{(n)}}, \quad (1.19)$$

де S, P, U – повна і активна потужності та середньоквадратична напруга. Метод базується на тому, що для випадку синусоїдних струму та напруги всі три значення Q_1, Q_F та Q_S будуть рівні, а для нелінійного навантаження – різними. Причому, Q_1 буде мінімальною, а Q_F буде мати максимальне значення. Реактивна потужність Q_S буде знаходитися між Q_1 та Q_F . Причому, у випадку несинусоїдної напруги та лінійного навантаження, Q_S має значення, яке близьке до Q_1 . В протилежному випадку, коли напруга синусоїдна і навантаження нелінійне, Q_S має значення, близьке до Q_F , через більші спотворення струму, споживаного нелінійним навантаженням. У випадку несинусоїдної напруги та нелінійного навантаження значення Q_S буде мати середнє значення між Q_1 та Q_F .

В [33, 34] запропоновано метод, що заснований на потужності спотворення К. Будяну. Як показники наявності спотворення використано потужності спотворення

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}; D_1 = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2} \text{ та } D_e = \sqrt{S^2 - P_e^2 - Q_e^2}, \quad (1.20)$$

де S, P, Q – повна, активна та реактивна потужності у визначені (1.18)

[35], згідно з яким: $P = P_1 + P_H = P_{(1)} + \sum_{n=2}^{\infty} P_{(n)};$

$$Q = Q_1 + Q_H = Q_{(1)} + \sum_{n=2}^{\infty} Q_{(n)};$$

P_e, Q_e – ефективні активна та реактивна потужності у визначені

$$[35], \text{ згідно з яким: } P_e = \sqrt{P_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n^2}; \quad Q_e = \sqrt{Q_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} Q_n^2}.$$

Головним недоліком визначення K . Будяну в контексті D є те, що існують випадки, коли $D > 0$, навіть якщо навантаження є лінійним. Це може відбутися тоді, коли напруга вже спотворена, а навантаження має реактивну складову.

В [36] запропоновано метод кількісної оцінки вкладу потужності гармонічних спотворень в повну потужність S з використанням відношення потужності гармонічних спотворень до повної потужності основної гармоніки уявну потужність S з використанням відношення потужності гармонічних спотворень до повної потужності основної гармоніки

$$HDPR = \frac{D_H}{S_1}; \quad D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} = \sqrt{S_1^2 \cdot (THD_U)^2 \cdot (THD_I)^2 - P_H^2}, \quad (1.21)$$

де THD_U, THD_I – сумарні коефіцієнти гармонічних спотворень напруги і струму, і порівняння значення $HDPR$ з пороговим значенням $HDPR > THR = (THD_{UB})^2$, де THD_{UB} – фонове значення коефіцієнта гармонічних спотворень за напругою для даного вузла мережі. По суті за даним методом порівнюють сумарні коефіцієнти гармонічних спотворень за струмом та напругою. Якщо $THD_I > THD_{UB}$, то споживач є джерелом гармонічних спотворень.

В [37–39] запропоновано використовувати напрямки і значення потужностей спотворення, які визначають як добуток напруги прямої послідовності основної гармоніки на комплексний струм n -ї ГС. Обґрунтування такого підходу ґрунтується на тому, що струм n -ї ГС на межі балансової належності практично визначається струмом спотворення споживача.

Порівняємо комплексні пульсуючу потужність n -ї ГС і комплексну потужність спотворення 1-ї та n -ї ГС:

$$\underline{N}_{(n)} = \underline{U}_{(n)} \underline{I}_{(n)} = \frac{\dot{E}_{(n)c}^2 \underline{Y}_{(n)n} - \dot{J}_{(n)n}^2 \underline{Z}_{(n)c} - \dot{E}_{(n)c} \dot{J}_{(n)n} (1 - \underline{Y}_{(n)n} \underline{Z}_{(n)c})}{(1 + \underline{Y}_{(n)n} \underline{Z}_{(n)c})^2}, \quad (1.22)$$

$$\underline{N}_{(1,n)} = \dot{U}_{(1)} \dot{I}_{(n)} = \frac{\dot{E}_{(1)c} \dot{E}_{(n)c} \underline{Y}_{(n)n} - \dot{E}_{(1)c} \dot{J}_{(n)n}}{(1 + \underline{Y}_{(1)n} \underline{Z}_{(1)c}) (1 + \underline{Y}_{(n)n} \underline{Z}_{(n)c})}. \quad (1.23)$$

З порівняння цих виразів випливає, що застосування потужності спотворення істотно спрощує можливість визначення внеску споживача в погіршення якості електроенергії.

Недоліком усіх методів є те, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

З дерегуляцією електроенергетики комунальні підприємства все частіше зацікавлені у визначенні відповідальності за проблеми з якістю електроенергії [40–42]. Це питання набуває особливого значення при формуванні контрактів на постачання електроенергії та дотримання, за допомогою тарифних ставок, додаткових витрат на погіршення якості електроенергії [9]. Один з найважливіших напрямків подальших досліджень пов'язаний із доведенням теоретичних досліджень до рівня, що забезпечує їхнє упровадження у практику експлуатації електромереж. Даний напрямок полягає у використанні нових методів щодо визначення участі суб'єктів у відповідальності за порушення вимог до ЯЕ в автоматизованих системах контролю й обліку електроспоживання (АСКОЕ) [40].

1.3 Багатоточкові методи визначення фактичних внесків споживачів в погіршення якості електроенергії

Хоча одноточковий підхід є ефективним у забезпеченні виявлення джерела гармонічних збурень з точки зору замовника та мережі, він не визначає точний вузол, де відбувається гармонічне порушення. Для систем з великим числом одночасних гармонічних джерел у будь-який момент часу гармонічні спотворення, виміряні в ТЗП, є сукупністю всіх одночасних гармонічних джерел у системі. Ці гармонічні ін'єкції, як правило, протікають від своїх джерел до мережі, отже, вони можуть частково компенсувати один одного за рахунок різниці фазового кута. Тому гармонічні спотворення в ТЗП можуть не бути точним поданням гармоніки ін'єкції в вузлах системи. В результаті застосовується багатоточковий підхід для ідентифікації гармонічних джерел [43–44].

Поширеним багатоточковим методом ідентифікації джерел гармонік є метод оцінки гармонічного стану (Harmonic state estimation – HSE). Вперше ідентифікація гармонічних джерел з використанням HSE була проведена в [45]. Джерела гармонічних ін'єкцій визначаються з обмежених вимірювань. Вибрані змінні стану оцінюються для кожного гармонічного складника для визначення вузлів з гармонічними внесками в систему.

Розрізняють статичну і динамічну HSE. Одним з найбільш поширених методів статичного HSE є сингулярне розкладання (Singular value decomposition – SVD) [46, 47]. Перевага SVD полягає в тому, що вирішення проблеми можна отримати за часткової спостережуваності системи. В [48] для вирішення проблеми HSE використовуються вагові найменші квадрати (Weighted least squares – WLS) і сингулярне розкладання SVD. WLS також було запропоновано в [49] для HSE, коли параметри системи є невизначеними. Головний фактор, який необхідно враховувати при проведенні HSE – розміщення вимірювальних приладів в енергосистемі. Аналіз чутливості та критерій мінімальної дисперсії були застосовані в [50] для визначення оптимальних місць розміщення вимірювальних приладів для виконання HSE. Послідовний метод суттєво зменшує кількість вимірювальних приладів, необхідних для виконання HSE, однак не враховує зміну в часі природу гармонічних навантажень. У роботі [51] для визначення місця розташування декількох гармонічних джерел в енергосистемі використовувався двоступеневий підхід. По-перше, WLS використовувався для оцінки можливих вузлів, які представляють гармонічні джерела, а згодом застосовується евклідова норма для визначення точних вузлів з гармонічними ін'єкціями. Максимізація розрідженості також була застосована до статичної HSE [52, 53].

У динамічній HSE використовується динамічна модель енергосистеми для виконання HSE. Ця динамічна модель забезпечує інформацією про часову еволюцію системи, що дозволяє їм реагувати відповідним чином у разі змін в енергосистемі. Перевагою динамічного методу HSE перед статичним методом є можливість відстежувати вміст гармонік за певний час. Динамічна HSE була вперше проведена в [54] за допомогою фільтра Калмана та Фур'є-аналізу.

Окрім HSE, до ідентифікації декількох гармонічних джерел в енергосистемах були застосовані й інші методи. Метод незалежного компонентного аналізу для ідентифікації гармонічних джерел був пред-

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] «Правила присоединения потребителя к сети общего назначения по условиям влияния на качество электроэнергии,» *Главгосэнергонадзор*, 1991.

[2] «Review of methods for measurement and evaluation of the harmonic emission level from an individual distorting load,» CIGRE 36.05 / CIRED 2 Joint WGCC02 (Voltage Quality), 1999.

[3] A. de Oliveira, J. C. de Oliveira, J. W. Resende, and M. S. Miskulin, «Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements,» *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, pp. 1721–1726, 1991.

[4] H. Yang, P. Pirotte, and A. Robert, «Assessing the harmonic emission level from one particular customer,» in *Proc. 3rd Int. Conf. Power Quality: End-Use Applicat. Perspectives*, Amsterdam, The Netherland, 1994, B-2.08.

[5] В. Я. Майер, «Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии,» *Электричество*, № 49, с. 19–24, 1994.

[6] M. Tsukamoto, I. Kouda, Y. Natsuda, Y. Minowa, and S. Nishimura, «Advanced method to identify harmonic characteristic between utility grid and harmonic current sources,» in *Proc. 8th Int. Conf. Harmonics Quality Power*, Athens, Greece, 1998, pp. 419–425.

[7] E. Thunberg and L. Soder, «A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies,» *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, pp. 272–277, 1999.

[8] T. Tayjasant, C. Li, and W. Xu, «A resistance sign-based method for voltage sag source detection,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 4, pp. 2554–2551, 2005.

[9] Z. Hanzelka, P. Słupski, K. Piątek, Y. Varetsky, and M. Zieliński, «Single-point methods for location of distortion, unbalance, voltage fluctuation and dips sources in a power system,» *Power quality – monitoring, analysis and enhancement*, Rijeka : InTech, – eISBN: 978-953-307-330-9, pp. 157–198, 2011.

[10] С. И. Гамазин, и В. А. Петрович, «Определение фактического вклада потребителя в искажении параметров качества электрической энергии,» *Промышленная энергетика*, № 1, с. 32–38, 2003.

[11] Е. И. Васильев, «Определение фактического вклада потребителей и системы в несинусоидальность напряжения на основе активных экспериментов,» автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.09.03, Москва, 2008.

[12] И. Е. Васильев, Р. В. Ключев, и Е. И. Васильев, «Определение фактического вклада потребителя и системы в несинусоидальность напряжения предприятий цветной металлургии на основе активного эксперимента – включения трансформаторов на параллельную работу,» *Аудит и финансовый анализ*, № 4, с. 464–467, 2011.

[13] Бунтеев Ю.Е. «Оценка определяющего влияния источников высших гармоник на качество электрической энергии в электротехнических комплексах промышленных предприятий,» автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.09.03, Санкт-Петербург. 2016.

[14] А. Н. Висящев, и С. Г. Тигунцев, «Влияние потребителей на искажение напряжения,» *Электрические станции*, № 7, с. 26–31, 2002.

[15] С. Г. Тигунцев, «Оценка вклада участников электроснабжения в качество электрической энергии,» в *Сборник трудов Международной научно-практической конференции Управление качеством электрической энергии «Power Quality Management»*, Л. И. Коверниковой, И. И. Карташева, В.Н. Тульского, Ю. В. Шарова, Б. В. Олексюка, Ред. Москва, Россия : ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014, с. 199–207.

[16] А. Н. Висящев, Д. С. Федосов, и В. В. Федчишин, «Оценка влияния электроприемников на уровень гармонических составляющих напряжения в электрической сети,» в *Сборник трудов Международной научно-практической конференции Управление качеством электрической энергии «Power Quality Management»*, Л. И. Коверниковой, И. И. Карташева, В.Н. Тульского, Ю. В. Шарова, Б. В. Олексюка, Ред. Москва, Россия : ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014, с. 209–216.

[17] Д. С. Федосов, «Разработка метода оценки влияния потребителей на несинусоидальность и несимметрию напряжений в электрической сети,» автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.14.02, Иркутск, 2014.

[18] Ф. А. Зыкин, «Энергетические процессы в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии,» *Электричество*, № 12, с. 5–9, 1987.

[19] Ф. А. Зыкин, «Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии,» *Электричество*, № 11, с. 13–19, 1992.

[20] Ю. С. Крайчик, и В. Н. Никифорова, «Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии,» *Электричество*, № 11, с. 72–74, 1993.

[21] Г. Сендерович, «Визначення часткової участі суб'єктів у порушенні якості електричної енергії,» автореф. дис. докт. техн. наук, спец. 05.14.02, Донецьк, 2012.

[22] L. S. Czarnecki, «Current and power equations at bidirectional flow of harmonic active power in circuits with rotating machines,» *ETEP*, no. 1, pp. 45–52, 1993.

[23] M. Depenbrock, «Some remarks to active and fictitious power in polyphase and single-phase systems,» *ETEP*, no.1, pp. 15–19, 1993.

[24] A. Ferrero, G. Superti-Furga, «A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, pp. 568–577, 1991.

[25] A. Ferrero, A. P. Morando, R. Ottoboni, and G. Superti-Furga, «On the meaning of the Park power components in the three-phase systems under nonsinusoidal conditions,» *ETEP*, no. 1, pp. 33–43, 1993.

[26] L. Cristaldi, and A. Ferrero, «A digital method for the identification of the source of distortion in electric power systems,» *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, no. 1, pp. 14–16, 1994.

[27] L. Cristaldi, and A. Ferrero, «A Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality,» *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, no. 3, pp. 683–685, 1995.

[28] В. Н. Никифорова, и А. Н. Лушнова, «Метод определения фактического вклада субъекта, имеющего искажающие электроприемники, обусловившие несоответствие показателей качества электроэнергии,» *Технологии электромагнитной совместимости*, № 1 (4), 2002.

[29] W. Xu, Xian Liu and Y. Liu, «An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 214–219, 2003.

[30] C. Li, W. Xu and T. Tayjasant «A «Critical Impedance» – Based Method for Identifying Harmonic Sources,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 671–678, 2004.

[31] C. Chen, X. Liu, D. Koval, W. Xu, and T. Tayjasant, «Critical impedance method – a new detecting harmonic sources method in distribution systems,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 288–297, 2004.

[32] P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, «A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, pp. 1782–1789, 2007.

[33] D. Stevanović, and P. Petković, «A single-point method based in distortion power for the detection of harmonic sources in a power system,» *Metrology and Measurement Systems*, vol. XXI, no. 1, pp. 3–14, 2014.

[34] D. Stevanović, and P. Petković, «A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters,» *Electrical Engineering*, 2015, 97(2):165-174.

[35] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010. [Online]. Available: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf.

[36] R. Lin, L. Xu and X. Zheng, «A Method for Harmonic Sources Detection based on Harmonic Distortion Power Rate,» in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, no. 322, 2018. doi:10.1088/1757-899X/322/7/072038.

[37] С. С. Смирнов, и Л. И. Коверникова, «Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети,» *Электричество*, № 1, с. 56–64, 1996.

[38] С. С. Смирнов, «Метод определения фактического вклада сети и потребителя в коэффициенты высших гармоник напряжения узла,» *Электричество*, № 10, с. 54–61, 2005.

[39] С. С. Смирнов, *Высшие гармоники в сетях высокого напряжения*. Новосибирск, Россия: Наука, 2010.

[40] О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, та П. Г. Щербакова, «Науково-технічні аспекти визначення відповідальності за порушення якості електричної енергії,» *Стандартизація, сертифікація, якість*, № 6, с. 48–55, 2013.

[41] О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, та П. Г. Щербакова, «Особенности визначення часткового внеску споживача у відповідальність за порушення синусоїдності кривої напруги,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 98–101, 2014.

[42] О. Г. Гриб та ін., *Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії*. Харків, Україна: ПП «Ранок-НТ», 2012.

[43] S. Liang, «A Novel Method for Major Harmonic Sources Identification in High Voltage Transmission Systems,» Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Arlington, USA, 2009.

[44] A. Ujile «Harmonic Estimation and Source Identification in Power Distribution Systems Using Observers,» A Thesis Submitted to the University of Manchester for the Degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, England, 2015.

[45] G. Heydt, «Identification of harmonic sources by a state estimation technique,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 569–576, 1989.

[46] S. S. Matair and N. R. Watson, «Harmonic state estimation: a method for remote harmonic assessment in a deregulated utility network,» in *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, London, 2000, pp. 4–7.

[47] C. Madtharad, S. Premrudeepreechacharn, N. R. Watson, and R. Saengudom, «An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1514–1521, 2005.

[48] M. Moghadasian, H. Mokhtari, and A. Baladi, «Power System Harmonic State Estimation using WLS and SVD; A practical Approach,» *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, USA, 2010, pp. 730–736.

[49] C. Rakpenthai and S. Uatrongjit, «On Harmonic State Estimation of Power System With Uncertain Network Parameters,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4829–4838, 2013.

[50] J. E. Farach, W. M. Grady, and A. Arapostathis, «An optimal procedure for placing sensors and estimating the locations of harmonic sources in power systems,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1303–1310, 1993.

[51] A. Kumar, B. Das, and J. Sharma, «Determination of location of multiple harmonic sources in a power system,» *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 73–78, 2004.

[52] H. Liao, «Power system harmonic state estimation via sparsity maximization,» in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006.

[53] H. Liao, «Power system harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 15–23, 2007.

[54] H. Beides and G. Heydt, «Dynamic state estimation of power system harmonics using Kalman filter methodology,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1663–1670, 1991.

[55] M. Farhoodnea, A. Mohamed, and H. Shareef, «A new method for determining multiple harmonic source locations in a power distribution system,» in *IEEE International Conference on Power and Energy*, pp. 146–150, 2010.

[56] E. Gursoy, «Independent component analysis for harmonic source identification in electric power systems,» Ph.D. dissertation, Drexel University, Philadelphia, USA, 2007.

[57] H. E. Mazin, W. Xu, and B. Huang, «Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing loads,» in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–9.

[58] H. E. Mazin, W. Xu and B. Huang, «Determining the Harmonic Impacts of Multiple Harmonic-Producing Loads,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, 1187–1195, 2011.

[59] Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, и С. В. Страхов, *Основы теории цепей*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1989.

[60] Г. А. Штамбергер, *Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания)*. Новосибирск, Россия: Наука, 1975.

[61] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken, USA: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2007.

[62] F. Z. Peng and J.-S. Lai, «Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems,» *IEEE Trans. Inst. Meas.*, vol. 45, no. 1, pp. 293–297. 1996.

[63] Н. А. Мельников, *Реактивная мощность в электрических сетях*. Москва, Россия: Энергия, 1975.

[64] М. Й. Бурбело, та С. М. Мельничук, «Визначення потужностей трифазної несиметричної системи з ізольованою нейтраллю,» *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 66–70, 2013.

[65] А. К. Шидловский, та В. Г. Кузнецов, *Повышение качества энергии в электрических сетях*. Київ, Україна: Наукова думка, 1985.

[66] М. Й. Бурбело, *Квазірівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.

[67] Н. С. Маркушевич, и Л. А. Солдаткина, *Качество напряжения в городских электрических сетях*. Москва, Россия: Энергия, 1975.

[68] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, та М. В. Никитенко, «Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень,» *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 54–56, 2011.

[69] М. Й. Бурбело, та С. М. Мельничук, «Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю,» *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 71–75, 2015.

[70] A. Firlit, «Power Theory with Non-sinusoidal Waveforms», Annex 3. «Handbook of Power Quality,» *Edited by Angelo Baggiini. John Wiley & Sons, Ltd.* pp. 27–51, 2008.

[71] М. Й. Бурбело, та А. В. Гадай, «Визначення потужностей нелінійних навантажень трифазних електричних мереж,» *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, № 24/25, с. 61–67, 2016.

[72] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, С. М. Мельничук, та Ю. В. Лобода, «Визначення потужностей навантажень трифазних електричних мереж в несинусоїдних та несиметричних режимах,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 51–56, 2017.

[73] M. J. Burbelo, V. Zavadskiy, A. Koczorowska-Gazda, L. M. Melnychuk, and Yu. V. Loboda, "Measurement of reactive power under asymmetrical nonsinusoid modes of electric networks with earthed neutral,» *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 100311X, 2016. [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2564860>. doi:10.1117/12.2248788, 2016.

[74] А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевиц, Э. П. Трейманис, и Я. К. Шинка, *Мощность переменного тока*. Рига, Латвия: Физ.-энерг. инст. Латв. АН, 1993.

[75] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, та О. В. Степура, «Визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж,» *Технічна електродинаміка. Електроенергетичні системи та устаткування*, № 1, с. 42–49, 2019.

[76] А. И. Важнов, *Переходные процессы в машинах переменного тока*. Ленинград, СССР: Энергия, 1980.

[77] P. Tenti, J. L. Willems, P. Mattavelli and E. Tedeschi, «Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals,» *Electrical Power Quality and Utilization*, vol. XIII, no 1, pp. 9–15, 2007.

[78] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії,» *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. *Енергетика: надійність та енергоефективність*, № 14(1339), с. 78–82, 2019.

[79] М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, та О. В. Степура, «Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення нелінійних та несиметричних споживачів,» на *Science, Research, Development #18 (Наука, Исследования, Развитие #18)*, Ваку/Баку, 2019, с. 13–17.

[80] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Оцінювання впливу нелінійних несиметричних навантажень на низьковольтні електричні мережі,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. *Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, № 1, с. 24–30, 2019.

[81] И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк, Ю. Л. Саенко, и Н. А. Нойбергер *Электромагнитная совместимость потребителей*. Москва, Россия: Машиностроение, 2012.

[82] А. К. Шидловский, та А. Ф. Жаркин, *Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях*. Київ, Україна: Наукова думка, 2005.

[83] А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, та Д. О. Малахатка, «Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів,» *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 69–77, 2018.

[84] М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, та О. В. Степура, «Умовні потужності нульової послідовності за несиметричних несинусоїдних режимів трифазних електричних мереж із заземленою нейтраллю» *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. Вип. 38. С. 144-151. 2019.

[85] М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук, та О. В. Степура, «Аналіз чутливості методів виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії,» на *Monografia pokonferencyjna. Science, Research, Development #16. Technics and technology*, Barcelona, 2019, pp. 58–67.

[86] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, «Аналіз чутливості виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії, методом умовних потужностей,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, № 3, с.13–20, 2019.

[87] О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, О. В. Саприка, та В. О. Саприка, «Моніторинг показників якості електричної енергії на підприємствах житлово-комунального господарства,» *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*, вип. 101, с. 25–27, 2010.

[88] О. Г. Гриб, Р. В. Жданов, Д. А. Гапон, и А. А. Зуев, «Современное аппаратное обеспечение устройств учета и мониторинга показателей качества электрической энергии,» *Праці ТДАТУ*, вип. 13, т. 4, с. 90–95, 2013.

[89] О. Г. Гриб, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, Д. В. Бородин, и А. В. Дяченко, «Мониторинг качества электрической энергии на вводе тяговой подстанции,» *Електротехніка і Електромеханіка.*, № 6, с. 61–65, 2015.

[90] Ю. О. Варецький, та Т. І. Наконечний, «Спосіб моніторингу вищих гармонік в розподільчій електричній мережі,» МПК (2006) G 01 R 23/16, №35180, Бюл. № 17, Вер. 09, 2008.

*Наукове електронне видання комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Михайло Йосипович Бурбело,
Олександр Васильович Степура**

**ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ
СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Видання здійснене в авторській редакції

Підписано до друку 10.12.2021 р. Зам. № P2021-045
Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,
Інформаційний редакційно-видавничий центр.
Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,
м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.
press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/630>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>