

## ВИЗНАЧЕННЯ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ СУБ'ЄКТІВ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА ВИКРИВЛЕННЯ СИНУСОЇДНОСТІ КРИВОЇ НАПРУГИ

Гриб О. Г., Сендерович Г. А., Щербакова П. Г.

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"*

*Запропоновано метод розрахунку часткової участі суб'єктів у відповідальності за порушення синусоїдальності кривої напруги, згідно з яким відповідальність визначається за ту електроенергію, яка розподілена з порушенням її якості.*

**Постановка проблеми.** Підвищення якості електричної енергії (ЯЕ) є складовою частиною дуже важливої для економіки України проблеми енергозбереження. Визначення часткової участі у відповідальності за відхилення показників якості електричної енергії (ПЯЕ) від припустимих значень спрямовано на стимулювання зацікавленості постачальників і споживачів у підвищенні ЯЕ.

При розгляді задачі визначення відповідальності за порушення ЯЕ особливий інтерес представляють ПЯЕ, що пов'язані з тривалими змінами характеристик напруги на межі балансової належності (МБН), бо вони характеризують відхилення від норм експлуатації трифазних електричних мереж, які можуть бути як з боку постачальника, так і з боку споживача. Насамперед це є показники порушень симетрії напруг (коефіцієнти несиметрії напруг по зворотній  $K_{2U}$  і нульовій  $K_{0U}$  послідовностям) і синусоїдності кривої напруги (коефіцієнт викривлення синусоїдності кривої напруги  $K_U$  і коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ ).

**Аналіз досліджень і публікацій.** Відомий метод для визначення часткової участі суб'єктів у порушенні симетрії напруг і синусоїдності кривої напруги використовує напрямок і величину вторинної потужності на їхніх підключеннях до точки загального приєднання [1]. З погляду визначення відповідальності за порушення ЯЕ у методі є два недоліки:

- по-перше, метод не враховує взаємну складову вторинної потужності, яка з'являється при наявності двох і більше джерел її генерації, що може вносити похибку в оцінку часткової участі суб'єктів;

- по-друге, не враховуються зміни ЯЕ і, відповідно з цим, відповідальності за порушення ЯЕ протягом усього терміну моніторингу (тиждень, мінімум доба відповідно до [2] або постійний моніторинг);

Автори знайшли детерміноване рішення для визначення часткової участі суб'єктів у випадку порушення симетрії напруг [3].

При рішенні задачі використано зв'язок між моделями мережі у фазних координатах і в координатах симетричних складових. Перша модель дозволяє відслідковувати поточний режим мережі, друга – забезпечує оцінку симетрії. Подібний зв'язок для синусоїдності кривої напруги між моделями мережі у фазних координатах і в координатах гармонійних складових знайти не вдалося. Для визначення за цією задачею застосовані рішення, що розвивають і представляють в іншій якості відомі підходи [4].

**Метою статті** є представлення розробленого авторами методу визначення часткової участі постачальників і споживачів електроенергії у відповідальності за викривлення синусоїдності кривої напруги.

**Основні матеріали дослідження.** Перший недолік розглянемо на прикладі потужності  $n$ -ї гармонійної складової при порушенні синусоїдності кривої напруги на МБН [4]. У схемі заміщення (рис. 1) показані джерела струму в системі  $\underline{J}_{(n)c}$  і в навантаженні  $\underline{J}_{(n)n}$ , а також опори контурів системи  $\underline{z}_{(n)c}$  і навантаження  $\underline{z}_{(n)n}$ .

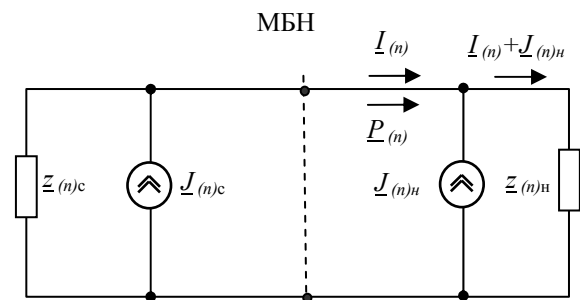


Рисунок 1 – Схема заміщення  $n$ -ої гармонійної складової

Виведене вираження активної потужності  $n$ -ї гармонійної складової на МБН:

$$P_{(n)} = J_{(n)c}^2 \cdot z_{(n)z1} - J_{(n)n}^2 \cdot z_{(n)z2} + J_{(n)c} \cdot J_{(n)n} \cdot (z_{(n)z2} \cdot \cos \delta_{(n)} + z_{(n)z4} \cdot \sin \delta_{(n)}), \quad (1)$$

де  $J_{(n)c} \cdot J_{(n)n}$  – струми  $n$ -ї гармоніки, які генерують система і навантаження;  $\delta_{(n)}$  – кут між векторами струмів  $n$ -ї гармоніки  $\underline{I}_{(n)c}$  та  $\underline{I}_{(n)n}$ ;  $z_{(n)z1}$  та  $z_{(n)z2}$  – еквівалентні опори, обумовлені схемою мережі й устаткуванням, використовуваним у навантаженні.

Потужність  $n$ -ї гармонійної складової на МБН має три складових:

- потужність, яку генерує джерело струму  $n$ -ї гармонійної складової, розташоване у системі

$$P_{(n)1} = J_{(n)c}^2 \cdot z_{(n)z1};$$

- потужність, яку генерує джерело струму  $n$ -ї гармонійної складової, розташоване у навантаженні

$$P_{(n)2} = -I_{(n)н}^2 \cdot z_{(n)32};$$

– взаємна потужність, яка існує при наявності джерел струму  $n$ -ї гармонійної складової в системі й у навантаженні

$$P_{(n)3} = I_{(n)с} \cdot I_{(n)н} \cdot (z_{(n)33} \cdot \cos \delta_{(n)} + z_{(n)34} \cdot \sin \delta_{(n)}).$$

Якщо джерело струму  $n$ -ї гармонійної складової знаходиться в системі, то рівняння (1) містить тільки складову  $P_{(n)1}$ , обумовлену генерацією активної потужності в системі. Напрямок вторинної активної потужності по  $n$ -ї гармоніці збігається з напрямком активної потужності за основною частотою. При перебуванні джерела струму  $n$ -ї гармонійної складової у навантаженні рівняння (1) містить тільки складову  $P_{(n)2}$ , обумовлену генерацією активної потужності в навантаженні. Напрямок вторинної активної потужності по  $n$ -ї гармоніці протилежен напрямкові активної потужності за основною частотою.

У разі знаходження джерел струму  $n$ -ї гармонійної складової в системі й у навантаженні рівняння активної потужності (1) містять усі три складові. Причому, величина і напрямок взаємної складової  $P_{(n)3}$  при вимірах, проведених у різні інтервали часу усереднення, є величина невизначена, тому що є функцією від кута  $\delta(n)$ , якій носить випадковий характер. Наявність взаємної складової не дозволяє визначити однозначну залежність величини або напрямку активної потужності від співвідношення величин струмів джерел генерації вторинної потужності.

По-друге, такий підхід не дає можливість враховувати зміни ЯЕ, та й самого факту порушення вимог до ПЯЕ, протягом часу моніторингу ЯЕ, тому що в процесі експлуатації міняються режими роботи електричних мереж, відбуваються зміни потужності і складу навантаження споживачів.

Авторами виявлена ознака розташування джерел струмів вищих гармонік по одну сторону МБН у разі порушення синусоїдності напруг [4]. Визначення такого режиму засноване на тому, що розкладання в ряд Фур'є несинусоїдної кривої приводить до появи пакету кривих вищих гармонік. Якщо джерело струмів вищих гармонік одне, то потужності гармонійних складових усього пакета кривих мають однаковий напрямок:

$$\text{sign } P(n) = \text{const.} \quad (2)$$

При виконанні умови (2) рівняння (1) має одну складову,  $P_{(n)1}$  або  $P_{(n)2}$ , часткову участь суб'єктів можливо однозначно визначити в рамках інтервалу усереднення. У разі невиконання умови (2) рівняння (1) буде містити усі три складові, що означає розташування джерел струмів вищих гармонік по обидві сторони МБН. При невиконанні умови (2) не можна в рамках одного інтервалу усереднення однозначно визначити часткову участь суб'єктів у порушенні синусоїдності кривої напруги.

Така задача може вирішуватися, як інтегральна по великій кількості інтервалів усереднення, за час, три-

валість якого визначається терміном моніторингу. Інтегральний підхід до оцінки потужності є перехід до оцінки енергії.

Якщо взяти простий інтеграл за час моніторингу  $T$  по рівнянню (1), то, при випадкових значеннях кута  $\delta_{(n)}$  в окремих інтервалах усереднення, варто очікувати, що активна енергія, яка відповідає взаємній складовій потужності  $n$ -ї гармоніки, буде прагнути до нуля, а значення активної енергії  $n$ -ї гармонійної складової - до збереження тільки постійних складових:

$$W_{(n)} = \int_0^T P_{(n)} dt \rightarrow \rightarrow I_{(n)с}^2 \cdot z_{(n)31} \cdot T - I_{(n)н}^2 \cdot z_{(n)32} \cdot T. \quad (3)$$

Чим більше час моніторингу  $T$ , тим менший вплив буде мати взаємна складова потужності  $n$ -ї гармоніки на загальну величину вторинної енергії і тим у більшому ступені знак  $W_{(n)}$  буде характеризувати превалювання одного з джерел струму  $n$ -ї гармоніки. Але при будь-якому часі моніторингу при порушенні умови (2) строга детермінованість розрахунку часткової участі порушується, рішення здобуває статистичний характер.

Інтегральний підхід дозволяє сполучити з рішенням цієї задачі виправлення другого недоліку відомого методу, зазначеного вище, а саме, враховувати зміни ПЯЕ протягом часу моніторингу ЯЕ. Фінансові розрахунки між суб'єктами розподілу і споживання електроенергії проводяться не за потужністю, а за кількістю електроенергії. *Задачею є визначення тієї частини електроенергії, що отримана з порушенням вимог до ПЯЕ, і визначення відповідальності суб'єктів за це порушення.*

Авторами розроблені методики розрахунку часткової участі суб'єктів у відповідальності за порушення вимог до ПЯЕ, що припускають визначення відповідальності тільки за ту частину електроенергії, що отримана з порушенням вимог до ЯЕ [4].

Для виявлення відповідальності споживача за порушення синусоїдності кривої напруги контрольно-вимірювальний комплекс, наприклад "АНТЕС АК-3Ф", встановлюється на його фідері. Прилад здійснює контроль ЯЕ і зберігає в пам'яті інформацію про параметри режиму за кожним інтервалом усереднення (3 с згідно [2]), у якому було виявлене будь-яке порушення вимог до ПЯЕ протягом проведення моніторингу.

Добір тих інтервалів усереднення, за якими розраховується кількість неякісної електроенергії, здійснюється за фактом виходу  $K_{U(n)}$  за нормально припустиме значення. Для кожної  $n$ -ї гармоніки визначається напрямок активної потужності за ознакою його збігання по напрямку з потужністю основної гармонійної складової:

$$P_{(n)} \cdot P_{(1)} \geq 0. \quad (4)$$

Якщо умови (4) виконуються в усіх виявлених гармоніках, то джерело порушення синусоїдності знаходиться у системі, коефіцієнт відповідальності споживача  $K_{\text{відп}} = -1$ . При невиконанні умови (4) в усіх

виявлених гармоніках джерело порушення знаходиться у споживача,  $K_{\text{відп}} = 1$ . В обох випадках має місце виконання умови (2), що дає детерміноване рішення в розглянутому інтервалі усереднення.

У випадку невиконання умови (2) задача розподілу відповідальності не вирішується в рамках одного інтервалу усереднення.

При підсумовуванні результатів за час моніторингу відповідно до (3) можна чекати наближеного рішення статистичного характеру. Для інтервалу усереднення коефіцієнт відповідальності розраховується по формулі

$$K_{\text{відп}} = \frac{\sum_{n=2}^{40} K_{\text{відп}(n)}}{k_n}, \quad (5)$$

де  $K_{\text{відп}(n)}$  – коефіцієнт відповідальності у  $n$ -й гармоніці, визначений за напрямком її активної потужності;  $k_n$  – кількість гармонік, у яких порушені вимоги до  $K_{U(n)}$ .

Коефіцієнти відповідальності, визначені для порушення нормально припустимих значень  $K_{U(n)}$ , поширюються на порушення гранично припустимих значень, а також на порушення нормально і гранично припустимих значень коефіцієнтом скривлення синусоїдності кривої напруги  $K_U$ .

У кожному  $j$ -м інтервалі усереднення визначається кількість електроенергії, за яку споживач повинний одержати компенсацію, або понести штрафні санкції. Енергія, отримана споживачем з порушеннями синусоїдності і, тим самим, потребує визначення відповідальності, складається за усіма інтервалами усереднення:

$$W_{\text{відп}} = \sum_{j=1}^{T_{\text{відп}}/\Delta t} \left[ \sum_{i=1}^f W(j, i) \cdot K_{\text{відп}}(j, i) \right], \quad (6)$$

де  $T_{\text{відп}}$  – час, протягом якого контрольно-вимірний прилад фіксує перевищення припустимих значень кожним із ПЯЕ;

$\Delta t$  – тривалість інтервалу усереднення;

$f$  – кількість фаз електричної мережі.

Результат розрахунку по формулі (6) може бути позитивним або негативним у залежності від знака коефіцієнтів відповідальності і кількості розподіленої електроенергії в інтервалах усереднення. Виконання розрахунків відповідальності варто супроводжувати оцінкою їхньої вірогідності відповідно до умови (2).

**Висновки.** Основні особливості представленого методу полягають у наступному:

- можливість застосування детермінованого розрахунку до визначення часткової участі суб'єктів у відповідальності за порушення синусоїдності кривої напруги;

- оцінка часткової участі у відповідальності здійснюється для кількості електроенергії, отриманої споживачем з порушенням якості.

Саме ці особливості роблять запропонований метод перспективним для застосування при постійному

моніторингу в лічильниках з контролем якості електроенергії.

## Список використаних джерел

1. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии РД 153-34.0-15.501-01. Разработано научно-методическим центром 000 "Научный центр ЛИНВИТ". – М.: Энергосервис, 2001. – 23 с.
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине 01.01.2000]. – Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт стран СНГ).
3. Сендерович Г. А. Анализ влияния потребителей на несимметрию по обратной последовательности в точке общего присоединения / Г. А. Сендерович // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 1/2 (13). – С. 89 – 94.
4. Контроль потребления электроэнергии с учётом её качества / [Гриб О. Г., Васильченко В. И., Сендерович Г. А., Щербакова П. Г. и др.]; под. ред. О. Г. Гриба. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 444 с.

## Аннотация

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ СУБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЗА ИСКАЖЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Гриб О. Г., Сендерович Г. А.,  
Щербакова П. Г.

*Предложен метод расчета долевого участия субъектов в ответственности за нарушение синусоидальности кривой напряжения, согласно которому ответственность определяется за ту электроэнергию, которая распределена с нарушением ее качества.*

## Abstract

### DETERMINATION OF LIABILITY OF ELECTRICITY DISTRIBUTION OF SUBJECTS FOR VOLTAGE SINUSOIDALITY DISTORTION

O. Grib, G. Senderovych,  
P. Shcherbakova

*A method for calculating of share participation subjects in the responsibility for violation of sinusoidal voltage waveform, according to which the responsibility is determined for the electric power, which is distributed with the violation of its quality.*