

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко

**КВАЗІРІВНОВАЖЕНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ КАНАЛИ ДЛЯ
СИМЕТРУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК**

Монографія

Універсум-Вінниця 2009

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/482>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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

УДК 621.316.7 : 621.317.7

Б 91

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №13 від 03.07.2008 р.)

Рецензенти:

П. Д. Лежнюк, д.т.н., професор;

Є. М. Танкевич, д.т.н., старший науковий співробітник.

М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко

Б 91 Квасізрівноважені вимірювальні канали для симетрувальних установок : монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 96 с.

ISBN 978-966-641-300-3

В монографії обґрунтовано можливість зменшення помилок симетрування напруг і струмів вузлів навантажень трифазних електричних мереж шляхом підвищення точності та швидкодії отримання й обробки інформації, розроблено структурні схеми квазізрівноважених вимірювальних каналів для симетрувальних установок.

Монографія розрахована на широке коло інженерно-технічних працівників та аспірантів, які досліджують проблему симетрування напруг і струмів.

УДК 621.316.7:621.317.7

ISBN 978-966-641-300-3

© М. Бурбело, О. Бабенко, 2009

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. АНАЛІЗ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВОК СИМЕТРУВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ, МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ	6
1.1. Параметри, що характеризують несиметричні режими електроспоживання	6
1.2. Методи та засоби визначення параметрів несиметрії режимів електроспоживання	14
Розділ 2. СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНА ОРГАНІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ДЛЯ СИМЕТРУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК	31
2.1. Формування умов симетрування навантажень і напруг	31
2.2. Вимірювання параметрів несиметрії навантажень з використанням адаптивного вибору спектральних провідностей ...	44
2.3. Обґрунтування послідовності вимірювальних перетворень і структурних схем вимірювальних каналів	52
2.4. Квазірівноважені вимірювальні перетворювачі для симетрувальних установок	59
Висновки	63
Розділ 3. ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБОК КВАЗІРІВ- НОВАЖЕНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ДЛЯ СИМЕТРУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК	64
3.2. Похибки визначення параметрів несиметрії, що зумовлені неідеальністю вхідних перетворювачів	70
3.3. Похибки визначення параметрів несиметрії, що зумовлені неідеальністю елементів квазірівноважених вимірювальних перетворювачів	74
3.4. Структурне зменшення похибок, що зумовлені спотворенням синусоїдності кривих напруг	79
3.5. Похибки, що зумовлені невідповідністю схеми заміщення об'єкта вимірювання	82
Висновки	85
ПІДСУМКИ	87
ЛІТЕРАТУРА	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АП – аналоговий помножувач
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
ВТН – вимірювальний трансформатор напруги
ВТС – вимірювальний трансформатор струму
ДН – датчик напруги
ДС – датчик струму
І – інтегратор
ІВС – інформаційно-вимірювальна система
К – ключ
КН – компаратор напруги
КП – квазірівноважений перетворювач
МК – мікроконтролер
П – перемикач
ПВ – пристрій віднімання
ПН – перетворювач напруги
ПС – перетворювач струму в напругу
СУ – симетрувальна установка
ФД – фазочутливий детектор
ФКД – фазочутливий ключовий детектор
ФН – фільтр напруг
ФС – фільтр струмів
ФСД – фазочутливий синхронний детектор
ЦПН – цифровий подільник напруги

ВСТУП

Забезпечення якості електроенергії на належному рівні – одна з головних задач електроенергетики України. Серед показників якості важливе місце займає рівень несиметрії напруг електричних мереж. Несиметричні режими виникають, головним чином, внаслідок впливу несиметричного навантаження: тягового, електродугових печей та ін.

Несиметрія напруг негативно впливає на роботу електричних мереж, оскільки викликає зниження надійності та економічності роботи споживачів (асинхронних двигунів, систем освітлення, конденсаторних установок, пристроїв автоматики та ін.), призводить до збільшення втрат потужності в лініях електропередач і трансформаторах та зменшення їх пропускної здатності.

Серед багатьох заходів і засобів зниження несиметрії навантажень важливе місце займає використання симетрувальних установок (СУ): симетрувальних конденсаторних установок, симетрувальних трансформаторів, статичних тиристорних компенсаторів, важливим компонентом яких є система регулювання. Первинною ланкою інформаційно-керуючих систем СУ є вимірювальні канали, що забезпечують отримання інформації про параметри несиметричного режиму.

Завдяки ряду вітчизняних та зарубіжних вчених А. К. Шидловському, І. В. Жежеленку, О. В. Кириленку, В. Г. Кузнецову, Б. С. Стогнію, В. С. Андрієвському, О. Г. Грибу, Ю. Я. Лямцю, М. Я. Мінцу, А. В. Праховнику, Ю. Л. Саську, Є. М. Танкевичу, С. Г. Таранову, В. М. Чинкову, L. Czarnicki, A. Fetgero відбувся інтенсивний розвиток методів та засобів отримання та попередньої обробки інформації для систем обліку кількості та контролю якості електроенергії, систем релейного захисту та автоматики електричних мереж. Однак особливостям роботи та побудови вимірювальних каналів для СУ було приділено недостатньо уваги. Зокрема, існуючі вимірювальні канали розраховані, як правило, для експлуатації за симетричного та синусоїдного джерела напруг. Використання їх за умов несиметрії та несинусоїдності напруг призводить до похибок вимірювання і, відповідно, помилок симетрування. До того ж, інформація про несиметрію параметрів режиму, отримана з приладів, розроблених відповідно до вимог ГОСТ 13109-97, не забезпечує ефективного керування СУ навантажень вузлів електричних мереж.

Отже, завдання покращення характеристик вимірювальних каналів для СУ, насамперед їх точності й швидкодії, за умов несиметрії та несинусоїдності напруг, є досить актуальним для електроенергетики.

Розділ 1. АНАЛІЗ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВОК СИМЕТРУВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ, МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

1.1. Параметри, що характеризують несиметричні режими електроспоживання

Однією з найважливіших характеристик режимів електроспоживання є несиметрія напруг. Несиметрія напруг є вкрай небажаною. Вона викликає: по-перше, зменшення надійності та ефективності роботи електроприймачів (асинхронних двигунів, освітлювальних установок, конденсаторних батарей, пристроїв автоматики та ін.), а по-друге – призводить до збільшення втрат потужності в лініях електропередач і трансформаторах та зменшення їх пропускної здатності [1–4].

Несиметрію напруг найбільш повно характеризують комплексні коефіцієнти несиметрії напруг зворотної та нульової послідовностей

$$\underline{K}_{2U} = k_{2U} \cdot e^{j\psi_{2U}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}; \quad \underline{K}_{0U} = k_{0U} \cdot e^{j\psi_{0U}} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1},$$

де k_{2U} , k_{0U} – модулі комплексних коефіцієнтів несиметрії напруг відповідно зворотної та нульової послідовностей; ψ_{2U} , ψ_{0U} – аргументи комплексних коефіцієнтів несиметрії напруг відповідно зворотної та нульової послідовностей; \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_0 – комплексні напруги відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Водночас в ГОСТ 13109-97 регламентовано лише коефіцієнти несиметрії напруг зворотної та нульової послідовностей K_{2U} , K_{0U} , які визначаються як модулі комплексних коефіцієнтів.

З розвитком промисловості розширюється коло електричних споживачів, які негативно впливають на несиметрію напруг. Особливо це характерно для мереж, що забезпечують живлення несиметричних споживачів, наприклад, тягових залізничних мереж з двофазним навантаженням, які є причиною виникнення несиметрії напруг. Несиметрія навантажень зумовлює виникнення додаткових втрат потужності та електричної енергії в лініях і трансформаторах та призводить до зменшення їх пропускної здатності.

В несиметричних режимах трифазні електричні системи характеризують комплексними повною та пульсуючою потужностями [1–3]

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_0 = 3 \left(\dot{U}_1^* I_1 + \dot{U}_2^* I_2 + \dot{U}_0^* I_0 \right);$$

$$\underline{N} = \underline{N}_1 + \underline{N}_2 + \underline{N}_0 = 3(\dot{U}_2 I_1 + \dot{U}_1 I_2 + \dot{U}_0 I_0),$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0; \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ – комплексні напруги та струми відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей; $\dot{I}_1^*, \dot{I}_2^*, \dot{I}_0^*$ – комплексні спряжені струми відповідних послідовностей.

Комплексна повна потужність \underline{S} відображає споживання електричної енергії, а комплексна пульсуюча потужність \underline{N} інтегрально характеризує несиметрію та незрівноваженість трифазної системи.

Комплексні коефіцієнти несиметрії напруг зворотної та нульової послідовностей можна виразити через комплексні повну та пульсуючу потужності. Наприклад, за симетричного джерела і несиметричного навантаження \underline{K}_{2U} рекомендується визначати через пульсуючу потужність навантаження \underline{N}_2 з урахуванням відхилення напруги [2]

$$\underline{K}_{2U} \approx - \frac{(1 + \delta U) \underline{N}_2}{S_K + S_H},$$

де $\delta U = (U_1 - U_{\text{НОМ}}) / U_{\text{НОМ}}$ – відхилення напруги прямої послідовності; $\underline{N}_2 = 3 \dot{U}_1 \dot{I}_2 = -(S_{BC} + a S_{CA} + a^2 S_{AB})$ – пульсуюча потужність зворотної послідовності, тут S_{BC}, S_{CA}, S_{AB} – комплексні спряжені потужності однофазних навантажень; $a = e^{j120^\circ}$ – фазовий оператор; S_K, S_H – спряжені комплекси потужності короткого замикання мережі та потужності навантаження.

Симетрування навантажень вузлів електричних мереж полягає у використанні заходів і засобів, призначених для зменшення пульсуючої потужності (струму або провідності) зворотної та нульової послідовностей навантаження. Ефективність симетрування навантажень доцільно характеризувати комплексними коефіцієнтами несиметрії струмів зворотної та нульової послідовностей, які можна визначити з формул

$$\underline{K}_{2I} = k_{2I} \cdot e^{j \cdot \varphi_{2I}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}; \quad \underline{K}_{0I} = k_{0I} \cdot e^{j \cdot \varphi_{0I}} = \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_1},$$

де k_{2I} , k_{0I} – модулі комплексних коефіцієнтів несиметрії струмів відповідно зворотної та нульової послідовностей; φ_{2I} , φ_{0I} – аргументи комплексних коефіцієнтів несиметрії струмів відповідно зворотної та нульової послідовностей; \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_0 – комплексні значення струмів відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Симетрування може бути внутрішнім або зовнішнім [1]. Внутрішнє симетрування полягає у перерозподіленні несиметричного навантаження між фазами якнайбільш рівномірно, у використанні асинхронних двигунів і багатофазних схем випрямлення. Перерозподілення навантажень між фазами ефективно за умов, коли характер роботи фазних споживачів не змінюється з часом. Цей метод можна використовувати для симетрування навантажень систем освітлення, комунального господарства та інших навантажень з практично незмінним графіком роботи фазних споживачів.

Використання трифазних асинхронних двигунів, що увімкнені в вузлі несиметричного навантаження, приводить до зменшення напруги зворотної послідовності. Це здійснюється завдяки впливу опору зворотної послідовності асинхронних двигунів, який набагато менший ніж їх опір прямої послідовності. Недоліком такого способу є те, що асинхронні двигуни повинні бути значно недовантажені, інакше виникає їх перегрівання і швидкий вихід з ладу.

Симетрування з використанням багатофазних схем випрямлення струму може бути реалізоване у випадках, коли однофазні навантаження несиметричного споживача можуть житись від джерела постійного струму. Це значно обмежує використання такого способу. До того ж за використання випрямлячів виникають вищі гармоніки, які проникають в мережу, спотворюючи синусоїдну форму напруг та струмів і викликаючи додаткові втрати в її елементах.

Зовнішнє симетрування полягає у використанні спеціальних симетрувальних пристроїв, які приєднані у вузлах трифазного несиметричного навантаження. Одними з найбільш розповсюджених засобів зменшення несиметрії навантажень є використання конденсаторних СУ [3, 4]. Вони складаються із секцій конденсаторних батарей, що з'єднані за схемою «несиметричний трикутник» і приєднані до вузлів електричної мережі з несиметричним навантаженням. Окрім симетрування навантажень, призначенням таких установок є: підтримання рівня напруги у вузлах електричної мережі, компенсація реактивної потужності. Секції конденсаторних установок комутуються за допомо-

гою механічних або тиристорних пристроїв. Особливістю таких установок є можливість виключно дискретного регулювання реактивної потужності, що генерується конденсаторами.

Симетрування напруг може бути здійснене шляхом пофазового регулювання коефіцієнтів трансформації симетрувальних трансформаторів чи стабілізаторів напруги [4–8]. Однак у випадку потужного трансформатора із схемою з'єднання обмоток «трикутник–зірка», пофазове регулювання викликає перевантаження первинної (з'єднаної в «трикутник») обмотки трансформатора струмами нульової послідовності [4]. Враховуючи наслідки впливу пофазового керування потужного трансформатора, викликає зацікавлення дослідження використання пофазового регулювання напруги симетрувальних трансформаторів меншої потужності. Це пояснюється значно меншими струмами, що протікають в первинній обмотці та необхідністю регулювання напруги низьковольтних об'єктів, що отримують живлення від вузлів з несиметричною напругою – таких, як тягові підстанції. Симетрувальні трансформатори випускають серійно. Регулювання напруги трансформаторами виконується шляхом перемикання відпайок первинної обмотки. Можливим також є підмагнічування осердя [5].

Несиметричні режими часто супроводжуються несинусоїдністю. Причиною виникнення вищих гармонік напруг та струмів є нелінійні навантаження, які генерують вищі гармоніки струму в мережу. Вищі гармоніки в електричних мережах негативно впливають як на надійність, так і на економічність систем електропостачання. Вони прискорюють темпи старіння ізоляції електричних машин та елементів електропередач, знижують ефективність регульованих і вимірюваних пристроїв [9–18]. Наявність спотворень синусоїдної форми напруг та струмів призводить до зниження коефіцієнта потужності споживачів, негативного впливу на трифазні електричні машини через виникнення електричних полів, що обертаються проти руху ротора, викликаючи додаткові втрати електричної енергії в них. За умов несинусоїдності відбувається підвищення активного опору елементів електропередач (ліній електропередач, трансформаторів), що, в свою чергу, впливає на рівень втрат активної потужності в останніх.

В [1] підкреслено, що на підвищення рівня вищих гармонік в електричній мережі впливають несиметричні режими, тому задачу симетрування навантажень необхідно розглядати з урахуванням впливу несинусоїдності. Взаємопов'язаність впливу несиметрії та несинусоїдності вказує на необхідність застосування комплексного підходу для вирішення задач покращення якості електроенергії. Серед технічних засобів найбільш поширеними є статичні тиристорні компенсатори та фільтри вищих гармонік [19–25]. Одними з головних сфер засто-

сування статичних тиристорних компенсаторів (СТК) є: регулювання напруги, компенсація реактивної потужності, фільтрація вищих гармонік, симетрування напруги та струму вузла електричної мережі, послаблення флікера напруги, забезпечення умов гасіння дуги струму в паузі автоматичного повторного ввімкнення.

Важливим структурним елементом СУ є вимірювальні канали, функцією яких є отримання інформації та реалізація заданих законів керування. Такі системи можуть працювати в режимі розімкнутого, замкнутого або комбінованого регулювання [21]. Найбільш швидкодійним є розімкнуте регулювання, яке ґрунтується на вимірюванні параметрів несиметричного режиму (струмів, провідностей несиметричного навантаження, напруг вузла приєднання навантаження) і здійсненні необхідних комутацій СУ для встановлення параметрів останньої відповідно до потрібного закону керування. Таке регулювання найбільш ефективне для систем, що застосовуються за умов дії швидкозмінних навантажень (електродугові печі та ін.), де необхідно підтримувати допустимий рівень коливання і несиметрії напруг. Закриття регулювання полягає в зменшенні різниці між виміряним параметром несиметричного режиму і заданим. Воно більш повільне і застосовується для підтримання рівня напруги в вузлі електричної мережі.

Для виявлення інформативних параметрів, вимірювання яких необхідно забезпечити для керування симетрувальними установками, необхідно дослідити зв'язок між струмами і напругами прямої та зворотної послідовностей на джерелі та у вузлі навантаження електричної мережі (рис. 1.1).

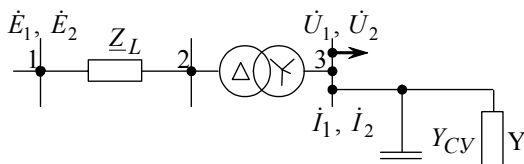


Рис. 1.1. Схема живлення споживачів електроенергії

Зв'язок між струмами і напругами прямої та зворотної послідовностей у вузлі навантаження згідно з [26] описується за допомогою виразу

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

де \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{12} , \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{22} – комплексні провідності навантаження, які зв'язують напруги і струми прямої та зворотної послідовностей; \dot{U}_1 , \dot{U}_2 – комплексні напруги відповідно прямої та зворотної послідовностей; \dot{I}_1 , \dot{I}_2 – комплексні струми відповідно прямої та зворотної послідовностей.

За відсутності електричних машин комплексні провідності навантаження визначаються з формул

$$\begin{aligned}\underline{Y}_{11} &= \underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB}; \\ \underline{Y}_{12} &= -\left(\underline{Y}_{BC} + a^2 \underline{Y}_{CA} + a \underline{Y}_{AB}\right); \\ \underline{Y}_{21} &= -\left(\underline{Y}_{BC} + a \underline{Y}_{CA} + a^2 \underline{Y}_{AB}\right); \\ \underline{Y}_{22} &= \underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB},\end{aligned}$$

де \underline{Y}_{BC} , \underline{Y}_{CA} , \underline{Y}_{AB} – комплексні провідності фаз навантаження; $a = e^{j120^\circ}$ – оператор повороту трифазної системи.

У випадку наявності електричних машин вказані співвідношення порушуються, зокрема, $\underline{Y}_{22} \neq \underline{Y}_{11}$.

За наявності несиметрії ЕРС джерела у випадку використання серійного трансформатора зі схемою з'єднання обмоток Δ/Υ («трикутник-зірка з нульовим проводом») напруга та струм зворотної послідовності на навантаженні, приєднаному до вторинної обмотки трансформатора, визначаються з виразів [27]

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_2[1 + \underline{Y}_{11}\underline{Z}] - \dot{E}_1\underline{Y}_{21}\underline{Z}}{[1 + \underline{Y}_{22}\underline{Z}][1 + \underline{Y}_{11}\underline{Z}] - \underline{Z}^2\underline{Y}_{21}\underline{Y}_{12}}; \quad (1.2)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1\underline{Y}_{21} + \dot{E}_2\underline{Y}_{22} + \dot{E}_2\underline{Z}(\underline{Y}_{22}\underline{Y}_{11} - \underline{Y}_{12}\underline{Y}_{21})}{[1 + \underline{Y}_{22}\underline{Z}][1 + \underline{Y}_{11}\underline{Z}] - \underline{Z}^2\underline{Y}_{21}\underline{Y}_{12}}, \quad (1.3)$$

де \dot{E}_1 , \dot{E}_2 – фазні комплексні ЕРС прямої та зворотної послідовностей джерела; $\underline{Z} = \underline{Z}_L + \underline{Z}_T$ – комплексний опір лінії електропередачі і трансформатора (тут і в подальшому для зручності прийнято, що всі параметри приведені до напруги високої сторони трансформатора).

У випадку симетричного джерела ($\dot{E}_2 = 0$) вирази (1.2) та (1.3) набудуть вигляду

$$\dot{U}_2 = \frac{-\dot{E}_1 \underline{Y}_{21} \underline{Z}}{[1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}][1 + \underline{Y}_{11} \underline{Z}] - \underline{Z}^2 \underline{Y}_{21} \underline{Y}_{12}};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1 \underline{Y}_{21}}{[1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}][1 + \underline{Y}_{11} \underline{Z}] - \underline{Z}^2 \underline{Y}_{21} \underline{Y}_{12}},$$

звідки випливає, що критерій забезпечення повного симетрування навантаження буде мати такий вигляд:

$$\underline{Y}_{21} = 0. \quad (1.4)$$

У цьому випадку $U_2 = 0$, $I_2 = 0$.

Таким чином, за симетричного джерела напруги інформативним параметром установок симетрування навантажень є комплексна провідність зворотної послідовності навантаження \underline{Y}_{21} .

Вимірювання провідності \underline{Y}_{21} є досить складним, тому як інформативний параметр симетрувальних установок використовують умовну провідність зворотної послідовності $\underline{Y}_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$ [28].

Водночас з (1.1) видно, що комплексна провідність зворотної послідовності навантаження

$$\underline{Y}_{21} = \underline{Y}_2 - \underline{Y}_{22} \underline{K}_{2U}. \quad (1.5)$$

У випадку незначної несиметрії напруги в вузлі навантаження, що виникає внаслідок несиметрії навантаження за симетричного джерела живлення і малого опору живильної мережі, можна прийняти, що $\underline{K}_{2U} \approx 0$, а інформативна провідність $\underline{Y}_{21} \approx \underline{Y}_2$.

За несиметричного джерела ЕРС ($\dot{E}_2 \neq 0$) у разі застосування критерію (1.4) відбувається неповне симетрування і залишкові напруга та струм зворотної послідовності у вузлі приєднання навантаження згідно з (1.2) та (1.3) будуть

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_2}{1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}}; \quad (1.6)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_2 \underline{Y}_{22}, \quad (1.7)$$

а оскільки $\underline{Y}_{22} \approx (0,001 \div 0,01) \frac{1}{Z_L}$ [29], а $Z_T \approx (1 \div 10) Z_L$ (в залежності від потужності трансформатора, довжини і поперечного перерізу про-

водів лінії електропередачі), то напруга зворотної послідовності в результаті симетрування $U_2 \approx (0,8 \div 0,9)E_2$.

Як впливає з (1.2), критерій, за яким необхідно здійснювати керування для забезпечення повного симетрування напруги ($U_2 = 0$) у вузлі навантаження, повинен бути сформований у вигляді

$$\underline{Y}_{21} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \left(\underline{Y}_{11} + \frac{1}{\underline{Z}} \right). \quad (1.8)$$

В разі дотримання цієї умови, в лінії живлення споживача виникне струм зворотної послідовності

$$I_2 = \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}} + \dot{U}_2 \underline{Y}_{22}, \quad (1.9)$$

який значно перевищує значення струму, що виникає внаслідок симетрування за критерієм $\underline{Y}_{21} = 0$ (1.7), і викликає значні втрати електроенергії.

Щоб зменшити втрати електричної енергії в лінії живлення для симетрування одночасно навантажень і напруги можна використати такий вираз

$$\underline{Y}_{21} = k_1 \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \left(\underline{Y}_{11} + \frac{1}{\underline{Z}} \right), \quad (1.10)$$

де k_1 – коефіцієнт, що характеризує ступінь симетрування напруги.

Після підстановки (1.10) в (1.3) і нехтування величинами другого порядку малості, отримано вираз для визначення струму зворотної послідовності, що встановлюється у випадку симетрування напруги за критерієм (1.10), у вигляді

$$I_2 = k_1 \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}} + \dot{U}_2 \underline{Y}_{22}. \quad (1.11)$$

З (1.11) випливає, що чим менше значення коефіцієнта k_1 , тим менший струм зворотної послідовності встановиться в лінії. Водночас, цей коефіцієнт не може бути меншим від деякого заданого значення, за якого у вузлі навантаження встановиться гранично допустиме значення напруги зворотної послідовності. Після підстановки виразу (1.10) у вираз (1.2), отримано наближений вираз для допустимого значення коефіцієнта k_1

$$k_{1\partial on} = 1 - \frac{\dot{U}_{2\partial on}}{\dot{E}_2}, \quad (1.12)$$

де \dot{E}_2 – напруга зворотної послідовності джерела; $\dot{U}_{2\partial on}$ – допустима напруга зворотної послідовності у вузлі навантаження після симетрування.

Однак проведене математичне моделювання [30] показало, що застосування компенсаційних симетрувальних установок для симетрування напруги за істотної несиметрії напруги джерела призводить до значних втрат потужності в елементах електропередачі (лініях і трансформаторах). Рекомендовано такі заходи:

- а) якщо $\dot{U}_2 < \dot{U}_{2\partial on}$ – симетрування за допомогою компенсаційних СУ з використанням критерію (1.4);
- б) якщо $\dot{U}_2 \geq \dot{U}_{2\partial on}$ – симетрування за допомогою компенсаційних СУ з використанням виразу (1.10);
- в) якщо $\dot{U}_2 > \dot{U}_{2\partial on}$ – використання симетрувального трансформатора для симетрування напруги.

1.2. Методи та засоби визначення параметрів несиметрії режимів електроспоживання

Найбільш простими є методи, які базуються на вимірюванні діючих значень напруг та струмів з наступним опосередкованим обчисленням параметрів несиметрії [31, 32]. Недоліком цих методів є низька швидкодія. Задача ж підвищення швидкодії вимірювальних каналів симетрувальних установок є достатньо важливою. Особливо це стосується вимірювальних каналів статичних тиристорних компенсаторів, що призначені для симетрування струмів та напруг у вузлах приєднання швидкозмінних навантажень, коли на характеристики струмів та напруг необхідно здійснювати вплив протягом півперіоду напруги живлення [20].

Огляд методів вимірювання параметрів навантаження (активної та реактивної складових провідностей або потужностей) за умов несинусоїдності виконано в праці [33]. Класифікацію методів вимірювання активної та реактивної складових комплексних величин представлено на рис. 1.2.

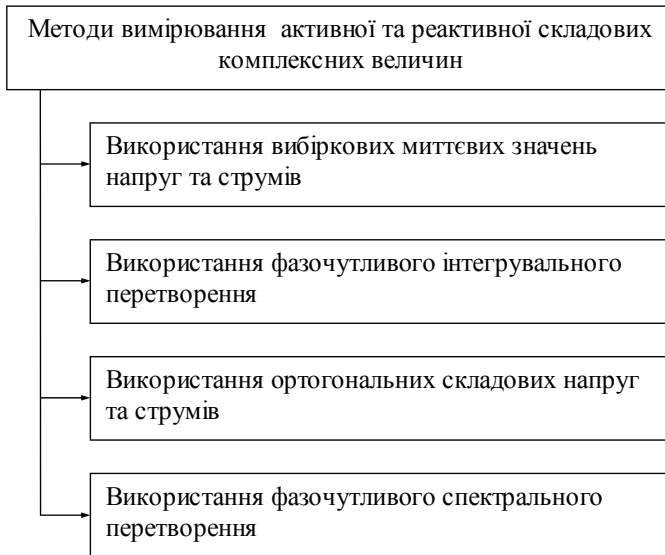


Рис. 1.2. Методи вимірювання складових комплексних величин

В [34] обґрунтовано методи роздільного перетворення параметрів відносних комплексних величин з використанням миттєвих значень струмів та напруг – метод стробування та метод розгортувального зрівноваження, які можуть бути покладені в основу побудови вимірювальних каналів СУ. Згідно з методом стробування величин синфазні та квадратурні складові відносних комплексних величин визначають в моменти максимуму та переходу через нуль опорної напруги. За допомогою цього методу можна отримати точні результати лише за синусоїдних форм кривих сигналів.

Дослідження показали, що похибка вимірювання складових струму методом стробування перевищує 5%. У разі вимірювання ортогональних складових відношення напруг $u_1(t)$ до $u_2(t)$ з застосуванням методу розгортувального зрівноваження, напруга $u_1(t)$ протягом кожного півперіоду компенсується опорною напругою, швидкість наростання якої змінюється, поки час від початку розгортки до моменту компенсації не стане рівним чверті періоду напруги $u_2(t)$. Час наростання опорної напруги визначає вимірювану величину. Недоліком методу є складність його технічної реалізації, обумовлена необхідністю формування опорної напруги спеціальної форми.

В [34] досліджено також метод фазочутливого інтегрувального перетворення. Відповідно до цього методу для визначення синфазної

або квадратурної складових відношення напруги $u_1(t)$ до опорної напруги $u_2(t)$ необхідно реалізувати два такти інтегрування. У випадку вимірювання синфазної складової, в першому такті інтегруються напруги $u_1(t)$ та $u_2(t)$ протягом півперіоду опорної напруги $u_2(t)$ (рис. 1.3а)

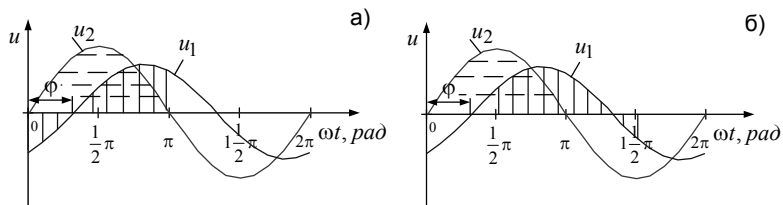


Рис. 1.3. Інтегрування напруг $u_1(t)$ та $u_2(t)$ для отримання синфазної (а) та квадратурної (б) складових їх відношення

Значення напруг, що отримані в результаті інтегрування, будуть

$$U_{1c\phi} = \frac{1}{\tau} \int_0^{T/2} u_1(t) dt = \frac{2 \cdot U_{m1} \cos \psi_1}{\omega \tau}; \quad U_2 = \frac{1}{\tau} \int_0^{T/2} u_2(t) dt = \frac{2 \cdot U_{m2}}{\omega \tau}, \quad (1.13)$$

де T – період опорної напруги; τ – постійна часу інтегратора; ψ_1 – аргумент напруги $u_1(t)$; U_{m1} , U_{m2} – амплітудні значення напруг відповідно $u_1(t)$ та $u_2(t)$.

Під час другого такту відбувається розрядження першого інтегратора шляхом інтегрування постійної напруги зворотної полярності на виході другого інтегратора. В такому випадку напруга на виході першого інтегратора

$$U_1 = U_{1c\phi} - \frac{1}{\tau} \int_0^{t_{c\phi}} U_2 dt = U_{1c\phi} - \frac{U_2 t_{c\phi}}{\tau}, \quad (1.14)$$

де $t_{c\phi}$ – час повного розрядження першого інтегратора.

В момент розрядження першого інтегратора $U_1 = 0$, а час розрядження пропорційний синфазній складовій відношення напруг

$$t_{c\phi} = \tau \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \cos \psi_1.$$

Для визначення квадратурної складової відношення напруг необхідно в першому такті зсунути інтервал інтегрування напруги $u_1(t)$ на кут $\frac{1}{2}\pi$ (рис. 1.3б). При цьому напруга першого інтегратора в кінці першого такту буде мати значення

$$U_{1кв} = \frac{1}{\tau} \int_{T/4}^{3T/4} u_1(t) dt = \frac{2U_{m1} \sin \psi_1}{\omega \tau}.$$

У наступному такті, аналогічно як і у випадку визначення синфазної складової, відбувається розрядження першого інтегратора, тривалість якого визначає квадратурну складову вимірюваної напруги і дорівнює

$$t_{кв} = \tau \frac{U_{m1} \sin \psi_1}{U_{m2}}.$$

Розглянутий метод вказує на можливість створення вимірювальних каналів синфазної та квадратурної складових відношення напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей, які є інформативними параметрами вимірювальних каналів установок симетрування напруг.

В [35, 36] розглянуто спосіб визначення складових комплексних напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей, пов'язаний з вимірюванням миттєвих значень фазних напруг в певні моменти часу. Він передбачає визначення синфазних та квадратурних складових цих напруг з виразів:

$$\begin{aligned} U_{1сф} &= \frac{1}{3} \left(u_A \left(\frac{T}{4} \right) + u_B \left(\frac{T}{3} + \frac{T}{4} \right) + u_C \left(-\frac{T}{3} + \frac{T}{4} \right) \right); U_{1кв} = \frac{1}{3} \left(u_A(0) + u_B \left(\frac{T}{3} \right) + u_C \left(-\frac{T}{3} \right) \right); \\ U_{2сф} &= \frac{1}{3} \left(u_A \left(\frac{T}{4} \right) + u_B \left(-\frac{T}{3} + \frac{T}{4} \right) + u_C \left(\frac{T}{3} + \frac{T}{4} \right) \right); U_{2кв} = \frac{1}{3} \left(u_A(0) + u_B \left(-\frac{T}{3} \right) + u_C \left(\frac{T}{3} \right) \right); \\ U_{0сф} &= \frac{1}{3} \left(u_A \left(\frac{T}{4} \right) + u_B \left(\frac{T}{4} \right) + u_C \left(\frac{T}{4} \right) \right); U_{0кв} = \frac{1}{3} (u_A(0) + u_B(0) + u_C(0)), \end{aligned} \quad (1.15)$$

де $U_{1сф}$, $U_{2сф}$, $U_{0сф}$ – синфазні складові симетричних складових напруг; $U_{1кв}$, $U_{2кв}$, $U_{0кв}$ – квадратурні складові симетричних складових напруг.

На рис. 1.4а подано результати моделювання процесу отримання квадратурної складової напруги зворотної послідовності, сформованої на основі виразу (1.15), за умов несинусоїдності з використанням ме-

тоду стробування. Графік є залежністю відносної похибки вимірювання квадратурної складової напруги $U_{2кв}$ від зміни вмісту напруги сьомої гармоніки $v_7, \%$. Оскільки вимірювання кожної з фазних напруг здійснюється тільки в одній точці, то через неточність визначення моменту стробування цей спосіб є неефективним навіть за синусоїдної форми кривих вимірюваних напруг. Це ілюструє рис. 1.4б на якому подано залежність відносної похибки вимірювання квадратурної складової напруги $U_{2кв}$ від зміщення моментів стробування $\varphi_{зміщ}$.

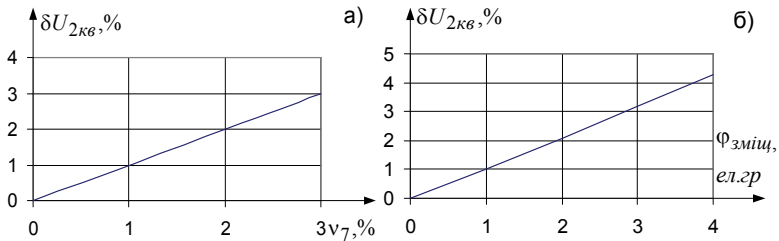


Рис. 1.4. Похибки вимірювання квадратурної складової напруги зворотної послідовності за використання (1.15)

Більш високу точність забезпечує метод інтегрування. Проаналізуємо трифазну несиметричну систему напруг для вимірювання синфазних та квадратурних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей. На рис. 1.5 подано графіки кривих несиметричних фазних напруг $u_A(\omega t)$, $u_B(\omega t)$, $u_C(\omega t)$, а також напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей $u_1(\omega t)$, $u_2(\omega t)$ та $u_0(\omega t)$, які аналітично можуть бути записані у вигляді

$$u_1(\omega t) = \frac{1}{3} \left(u_A(\omega t) + u_B \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) + u_C \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \right); \quad (1.16)$$

$$u_2(\omega t) = \frac{1}{3} \left(u_A(\omega t) + u_B \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + u_C \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \right); \quad (1.17)$$

$$u_0(\omega t) = \frac{1}{3} (u_A(\omega t) + u_B(\omega t) + u_C(\omega t)). \quad (1.18)$$

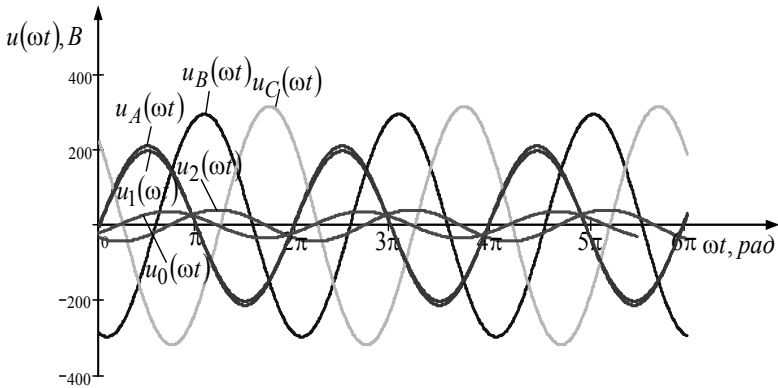


Рис. 1.5. Графік напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей

Як впливає з виразу (1.16), для одержання синфазної складової напруги $u_1(\omega t)$ необхідно виконати її інтегрування протягом півперіоду опорної напруги, за яку можна прийняти, наприклад, напругу $u_A(\omega t)$. Синфазна складова напруги прямої послідовності визначається з виразу

$$u_{1cf} = \frac{k_{np}}{3} \left(\begin{array}{ccc} \int_0^{\pi} u_A(\omega t) d\omega t + \int_{\frac{2}{3}\pi}^{\frac{1}{3}\pi} u_B(\omega t) d\omega t + \int_{\frac{1}{3}\pi}^{-\frac{2}{3}\pi} u_C(\omega t) d\omega t \end{array} \right),$$

а квадратурна складова – з виразу

$$u_{1кв} = \frac{k_{np}}{3} \left(\begin{array}{ccc} \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{1}{2}\pi} u_A(\omega t) d\omega t + \int_{\frac{2}{6}\pi}^{\frac{1}{6}\pi} u_B(\omega t) d\omega t + \int_{\frac{5}{6}\pi}^{-\frac{1}{6}\pi} u_C(\omega t) d\omega t \end{array} \right).$$

Межі інтегрування фазних напруг $u_A(\omega t)$, $u_B(\omega t)$ та $u_C(\omega t)$ при визначенні синфазної та квадратурної складових напруги прямої послідовності проілюстровані на рис. 1.6а та рис. 1.6б відповідно.

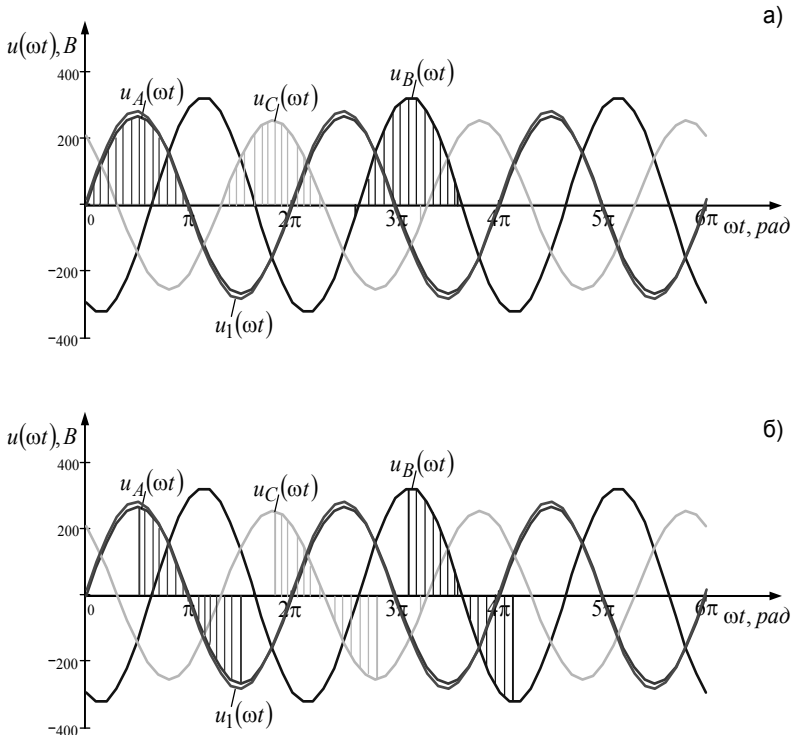


Рис. 1.6. Визначення складових напруги прямої послідовності за методом інтегрування

З (1.17) випливає, що синфазна складова напруги зворотної послідовності визначається як сума інтегралів трьох фазних напруг (рис. 1.7а), моменти яких зсунуті по фазі на кут $\frac{2}{3}\pi$

$$u_{2cf} = \frac{k_{np}}{3} \left(\int_0^{\pi} u_A(\omega t) d\omega t + \int_{-\frac{2}{3}\pi}^{\frac{1}{3}\pi} u_B(\omega t) d\omega t + \int_{\frac{2}{3}\pi}^{\frac{5}{3}\pi} u_C(\omega t) d\omega t \right),$$

де $k_{np} = \frac{1}{2\sqrt{2}}$ – коефіцієнт приведення результату інтегрування до діючого значення складової напруги.

Квадратурну складову напруги зворотної послідовності отримують шляхом її інтегрування протягом півперіоду в межах, зсунутих на $\frac{\pi}{2}$ відносно опорної напруги $u_A(\omega t)$. Вираз для визначення цієї складової за значеннями фазних напруг (рис. 1.7б) запишеться таким чином:

$$u_{2кв} = \frac{k_{np}}{3} \left(\begin{array}{ccc} \frac{1}{2}\pi & \frac{5}{6}\pi & \frac{2}{6}\pi \\ \int u_A(\omega t) d\omega t + & \int u_B(\omega t) d\omega t + & \int u_C(\omega t) d\omega t \\ \frac{1}{2}\pi & -\frac{1}{6}\pi & \frac{1}{6}\pi \end{array} \right).$$

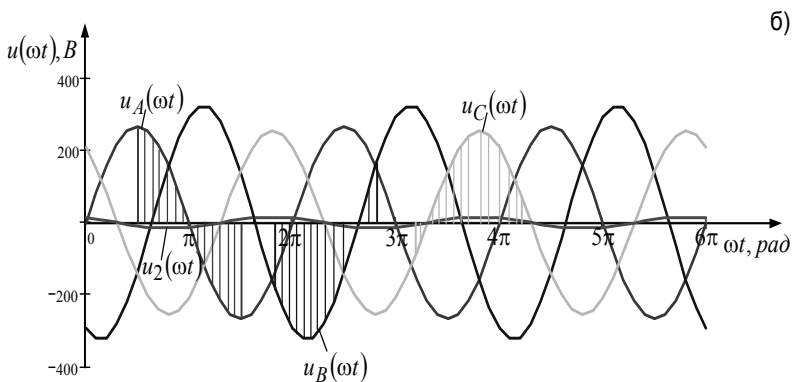
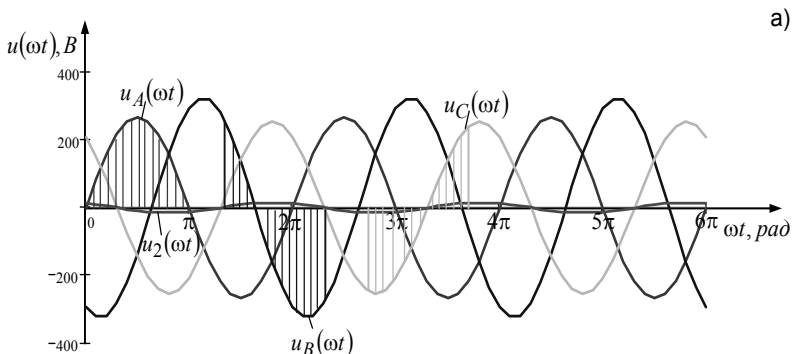


Рис. 1.7. Визначення синфазної та квадратурної складових напруги зворотної послідовності за методом інтегрування

Для більшої наочності на рис. 1.6 та рис. 1.7 моменти інтегрування напруг $u_B(\omega t)$ та $u_C(\omega t)$ зсунуті на кут 2π . Здійснення такого зсуву також необхідне через неможливість одночасного інтегрування напруг трьох фаз.

Вказані вище вирази для визначення складових u_{1cf} , $u_{1кв}$, u_{2cf} , $u_{2кв}$ можуть бути основою для фазочутливих інтегровальних перетворювачів, призначених для визначення синфазних та квадратурних складових відносних комплексних величин зворотної та нульової послідовностей.

Як видно з рис. 1.6 та рис. 1.7, визначення синфазних і квадратурних складових напруг відбувається протягом двох-трьох періодів напруги живлення.

Швидкодія може бути підвищена, якщо для вимірювання складових напруг прямої та зворотної послідовностей використати напруги u_α та u_β . Синфазна та квадратурна складові напруги зворотної послідовності визначаються відповідно як

$$u_{2cf} = \frac{k_{np}}{2} \left(\int_0^{\pi} u_\alpha(\omega t) d\omega t - \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} u_\beta(\omega t) d\omega t \right); \quad u_{2кв} = -\frac{k_{np}}{2} \int_0^{\pi} u_\beta(\omega t) d\omega t.$$

Вирази для визначення синфазної та квадратурної складових напруги прямої послідовності запишуться у вигляді

$$u_{1cf} = \frac{k_{np}}{2} \left(\int_0^{\pi} u_\alpha(\omega t) d\omega t + \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} u_\beta(\omega t) d\omega t \right); \quad u_{1кв} = \frac{k_{np}}{2} \int_0^{\pi} u_\beta(\omega t) d\omega t.$$

Межі інтегрувань для визначення синфазної складової напруг $u_2(\omega t)$ та $u_1(\omega t)$ представлено на рис. 1.8а, а квадратурної складової цих напруг – на рис. 1.8б.

Як впливає з рис. 1.8, використовуючи двоканальне інтегрування, швидкодія вимірювання складових напруг прямої та зворотної послідовності з використанням напруг в системі координат α , β , підвищилась вдвічі і є в межах часу, що не перевищує одного періоду опорної напруги.

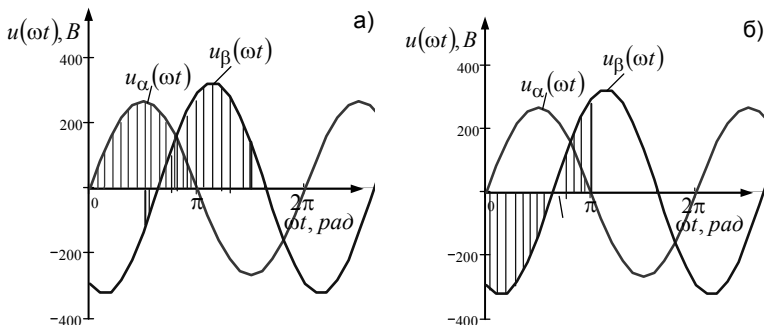


Рис. 1.8. До визначення синфазної та квадратурної складових напруг зворотної та прямої послідовностей з використанням напруг u_α та u_β

Розглянемо використання методів обробки, що передбачають перемноження миттєвих значень вимірюваної величини на миттєві значення синусоїдної напруги. Синфазна та квадратурна складові напруги зворотної послідовності, що визначається з використанням множення вимірюваних напруг на нормовані гармоніки, які зсунуті на кут $2\pi/3$, описуються виразами [35]

$$U_{2c\phi} = \frac{2}{\sqrt{2} \cdot 3k} \left(\sum_{n=1}^k u_A(\omega t_n) \sin(\omega t_n) + \sum_{n=1}^k u_B(\omega t_n) \sin\left(\omega t_n + \frac{2}{3}\pi\right) + \sum_{n=1}^k u_C(\omega t_n) \sin\left(\omega t_n + \frac{4}{3}\pi\right) \right);$$

$$U_{2кв} = \frac{2}{\sqrt{2} \cdot 3k} \left(\sum_{n=1}^k u_A(\omega t_n) \cos(\omega t_n) + \sum_{n=1}^k u_B(\omega t_n) \cos\left(\omega t_n + \frac{2}{3}\pi\right) + \sum_{n=1}^k u_C(\omega t_n) \cos\left(\omega t_n + \frac{4}{3}\pi\right) \right).$$

З метою дослідження цих виразів було проведено комп'ютерне моделювання. Несиметричний режим мережі характеризувався коефіцієнтами несиметрії напруг $k_{2U} = 18,5\%$ і $k_{0U} = 19,6\%$. Напряга кожної з фаз містила 3, 5 та 7 гармоніки з амплітудами в межах 10–40 % від амплітуди основної гармоніки. Результати моделювання подано на рис. 1.9 у вигляді залежності абсолютної похибки вимірювання коефіцієнта зворотної послідовності напруги від частоти напруги мережі.

Як видно з рис. 1.9, методична абсолютна похибка вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг зворотної послідовності суттєво залежить від частоти і перевищує допустиму ГОСТ 13109-97 норму (0,3 %) за відхилень частоти більших ніж 0,2 Гц.

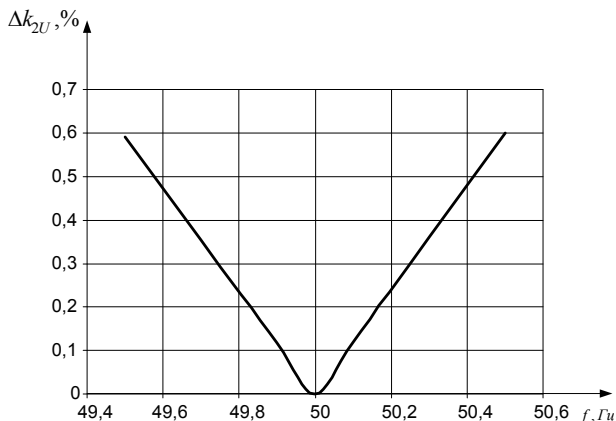


Рис. 1.9. Залежність похибки вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг зворотної послідовності від частоти напруги мережі

У працях [37–39] розглянуто адаптивні нерекурсивні фільтри, які призначені для визначення ортогональних складових основної гармоніки струму або напруги за час, менший чверті періоду. Однак результати комп'ютерного моделювання показали, що використання таких фільтрів за умов нестабільності частоти напруги мережі призводить до виникнення значних похибок.

Метод вимірювання напруг прямої та зворотної послідовності за умов несинусоїдності з використанням зрівноважувальної обробки фазних напруг описано в [40]. На основі вимірних миттєвих значень кривих напруг кожної з фаз розраховуються коефіцієнти ряду Фур'є для основної гармоніки (на прикладі напруги фази А)

$$U_{Ax} = \frac{2}{n} \sum_{n=1}^k U_{mA} \sin(\omega t_n + \psi_A) \sin(\omega t_n + \psi'_A); \quad (1.19)$$

$$U_{Ay} = \frac{2}{n} \sum_{n=1}^k U_{mA} \sin(\omega t_n + \psi_A) \cos(\omega t_n + \psi'_A), \quad (1.20)$$

де ψ'_A – початкова фаза нормованих гармонік; n – порядковий номер моменту дискретизації.

Регулюванням початкової фази ψ'_A необхідно добитися виконання рівності початкових фаз напруги $u_A = U_{mA} \sin(\omega t_n + \psi_A)$ і нормованих гармонік $\sin(\omega t_n + \psi'_A)$, тобто $\psi'_A = \psi_A$. В такому випадку, як впливає з (1.19) та (1.20) $U_{Ax} = U_{mA}$, а $U_{Ay} = 0$. При мінімальному значенні складових U_{Ay} або при максимальному U_{Ax} визначають амплітуди фазних напруг та їх аргументи, що дорівнюють початковим фазам нормованих гармонік, і розраховують значення напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей.

В результаті проведеного комп'ютерного моделювання даного методу помічено суттєву залежність результатів вимірювання від зміни частоти напруги мережі. Графік залежності абсолютної похибки вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг зворотної послідовності від частоти ідентичний графіку, показаному на рис. 1.9. Отже, недоліком методу вимірювання симетричних складових напруг з використанням зрівноважувальної обробки є те, що у разі зміни частоти напруги живлення виникає похибка, яка не може бути скомпенсована регулюванням кута нормованої гармоніки.

Пряма обробка інформації в багатьох вимірювальних каналах передбачає використання розвинення вимірних миттєвих значень фазних напруг (струмів) в ряд Фур'є [41–43]. У цьому випадку в пам'яті мікроконтролера повинна міститись таблиця синусів кутів гармонічних складових, що відповідають моментам дискретизації вимірюваних напруг. В [44] відмічено, що в такому разі мікроконтролер використовує час, що еквівалентний часу майже двох періодів напруги промислової частоти.

Для забезпечення високої швидкодії вимірювання синфазної та квадратурної складових комплексних величин в приладах фірми Жемон-Шнейдер використано вираз [33]

$$UI \sin \varphi = U \sin(\omega t) I \sin \left[\frac{\pi}{2} - (\omega t - \varphi) \right] - U \sin \left[\frac{\pi}{2} - \omega t \right] I \sin(\omega t - \varphi), \quad (1.21)$$

що забезпечує неперервний відлік вимірюваної величини протягом періоду без використання інтегрування. Можливість неперервного отримання значення реактивної потужності вказує на високу швидкість цього методу.

Недоліком методу є низька точність в умовах несинусоїдності напруги або струму. На рис. 1.10 наведені результати комп'ютерного моделювання алгоритму, описаного виразом (1.21), у вигляді графіків абсолютної похибки визначення реактивної потужності основної гармоніки ΔQ за умов несинусоїдності струму. Під час моделювання до-

Наукове видання

**Бурбело Михайло Йосипович
Бабенко Олексій Вікторович**

КВАЗІРІВНОВАЖЕНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ КАНАЛИ ДЛЯ СИМЕТРУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

Монографія

Оригінал-макет підготував О. В. Бабенко

Редактор С. А. Малішевська

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 09.04.2009 р.
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний Ум. др. арк. 5,54
Наклад 100 прим. Зам № 2009-084

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-81-59

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/482>

Видавництво Вінницького національного технічного університету
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>