

## Від редакційної колегії

Починаючи з січня 2006 року, журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту» буде видаватися з перекладом усіх статей з української (основної мови журналу) на російську та англійську.

Для попереднього ознайомлення науковців-дописувачів журналу зі структурою статті та порядком викладення матеріалу нижче друкуємо наукову статтю, написану й оформлену у відповідності з новими вимогами до рукописів статей.

УДК 621. 317. 73

**М. Й. Бурбело, д. т. н., доц.; О. В. Бабенко, асп.**

**М. И. Бурбело, д. т. н., доц.; А. В. Бабенко, асп.**

**M. J. Burbelo, Dr. Sc. (Eng); O. V. Babenko, Post-Graduate**

### **ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ УСТАНОВОК СИМЕТРУВАННЯ**

### **ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УСТАНОВОК СИММЕТРИРОВАНИЯ**

### **ELABORATION OF MATHEMATICAL MODELS OF BALANCING UNITS MEASURING SYSTEMS**

*Отримано математичні моделі побудови вимірювальних систем установок симетрування для двох підходів симетрування напруги в вузлі приєднання споживача: використання компенсаційних установок симетрування і установок з пофазним керуванням симетрувального трансформатора.*

*Получены математические модели построения измерительных систем установок симметрирования при двух подходах симметрирования напряжения в узле присоединения потребителя: использование компенсационных установок симметрирования и установок с пофазным управлением симметрирующего трансформатора.*

*Mathematical models intended for construction of measuring system of balancing units at two approaches of voltage balancing in consumer connection node have been obtained: usage of compensation balancing units and units with by phase control of balancing transformer.*

## **Вступ**

Несиметрія напруг та струмів істотно впливає на надійність і економічність роботи електротехнічних об'єктів. Ця проблема характерна, зокрема, для систем електропостачання, які отримують живлення від тягових підстанцій та інших несиметричних джерел. Її актуальність зростає головним чином для завантажувально-розвантажувальних пунктів залізниці, основним електричним навантаженням яких є асинхронні двигуни приводів підйомних механізмів. Досвід експлуатування електродвигунів вказує на необхідність регулювання напруги для забезпечення перебування величини її значень в допустимих нормах, визначених ГОСТ 13109-97. Зокрема для асинхронних двигунів коефіцієнт зворотної послідовності напруги не повинен перевищувати 2 % [1], а його збільшення призводить до перегріву останніх і швидкого виходу їх з ладу.

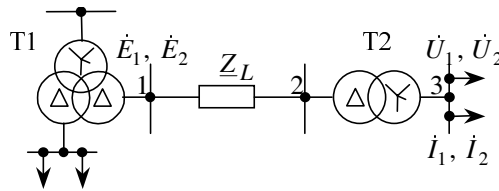


Рис. 1. Схема системи електропостачання

Рис. 1. Схема системы электроснабжения

Fig. 1. Power-supply system scheme

Результатом регулювання напруги повинно бути також і зменшення несиметрії струму в лінії, що суттєво впливає на рівень втрат активної потужності. Останні є важливим економічним показником, а їх збільшення вказує на неефективність побудови системи електропостачання.

Метою статті є формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування, які забезпечують покращення якості напруги і зменшення втрат в лініях електропередачі.

Розглянемо, як приклад, систему електропостачання тягової підстанції (рис. 1), до складу якої входить трансформатор Т1 з напругами обмоток 110/27,5/10 кВ.

Несиметрію напруги створює залізничне навантаження на стороні 27,5 кВ, а сторонні споживачі, що приєднані до сторони з напругою 10 кВ, живляться за допомогою лінії електропередачі з опором  $Z_L$ . Трансформатор споживача Т2 характеризується опором короткого замикання  $Z_T$ .

Існує два підходи для симетрування напруги вузла: використання компенсаційних установок і установок з пофазним керуванням симетрувального трансформатора. Проаналізуємо їх.

### Введение

Несимметрия напряжений и токов существенным образом влияет на надежность и экономичность работы электротехнических объектов. Эта проблема характерна в частности для систем электроснабжения, которые получают питание от тяговых подстанций и других несимметричных источников. Ее актуальность возрастает главным образом для загрузочно-разгрузочных пунктов железной дороги, основной электрической нагрузкой которых есть асинхронные двигатели приводов подъемных механизмов. Опыт эксплуатации электродвигателей указывает на необходимость регулирования напряжения для обеспечения пребывания величины его значений в допустимых нормах, определенных ГОСТом 13109-97. В частности для асинхронных двигателей коэффициент обратной последовательности напряжения не должен превышать 2 % [1], а его увеличение приводит к перегреву последних и сокращению срока эксплуатации.

Результатом регулирования напряжения должно быть также и уменьшение несимметрии тока в линии, которая существенно влияет на уровень потерь активной мощности. Последние являются важным экономическим показателем, а их увеличение указывает на неэффективность построения системы электроснабжения.

Цель статьи – формирование математических моделей измерительных систем установок симметрирования, которые обеспечивают улучшение качества напряжения и уменьшение потерь в линиях электропередачи.

Рассмотрим, в качестве примера, систему электроснабжения тяговой подстанции (рис. 1), в состав которой входит трансформатор Т1 с напряжениями обмоток 110/27,5/10 кВ. Несимметрию напряжения создает железнодорожная нагрузка на стороне 27,5 кВ, а посторонние потребители, которые присоединены на стороне напряжением 10 кВ, питаются с помощью линии электропередачи с сопротивлением  $Z_L$ . Трансформатор потребителя Т2 характеризуется сопротивлением короткого замыкания  $Z_T$ .

Существует два подхода к симметрированию напряжения узла: использование компенсационных установок и установок с пофазным управлением симметрирующего трансформатора. Проанализируем их.

## Introduction

Voltages and currents asymmetry influences the reliability and cost efficiency of electrotechnical objects operations. This problem is typical in particular for power-supply systems supplied from traction substations and other asymmetrical sources. Its actuality rises mainly for cargo handling railway stations where basic electric load are asynchronous motors of lifting mechanisms drives. Electric motors exploitation experience shows the necessity of voltage adjustment to provide its values in permissible standards defined by all-Union State Standard 13109-97. In particular for asynchronous motors reverse sequence voltage factor should not exceed 2 % [1] and its increase results in their overheating and reduction of operation period.

Voltage adjustment must lead to reduction of current asymmetry in the line too, that essentially influences the level of active power loss. Latter is the important economic index and their increase points out the nonefficiency of power-supply system construction.

Let's consider power-supply system of traction substation (fig. 1) with transformer T1 that has winding voltages of 110/27,5/10 kV. Railway load creates voltage asymmetry on the side of 27,5 kV and customers connected to 10 kV side are supplied by means of power line with impedance  $\underline{Z}_L$ . Customer's transformer T2 is characterized by short-circuit resistance  $\underline{Z}_T$ .

There are two approaches to voltage node balancing: usage of balancing units and single-phase control units of balancing transformer. Let's analyse them.

### Симетрування з використанням компенсаційних установок

Зв'язок між струмами і напругами прямої та зворотної послідовності в вузлі електричної мережі може бути відображений за допомогою рівняння [2]

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{U}_1, \dot{U}_2$  — комплекси струмів і напруг прямої та зворотної послідовностей (комплексы токов и напряжений прямой и обратной последовательностей; complex currents and voltages of positive and negative sequences);  $\underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{12}, \underline{Y}_{21}, \underline{Y}_{22}$  — провідності навантаження вузла (проводимости нагрузки узла; admittances of node load).

У випадку використання серійного трансформатора T2 напруга та струм зворотної послідовності на вторинній стороні трансформатора визначаються з виразів

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

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{E}_{1L}\underline{Y}_{21} - \dot{E}_{2L}\underline{Y}_{22} - \dot{E}_{2L}\underline{Z}(\underline{Y}_{22}\underline{Y}_{11} - \underline{Y}_{12}\underline{Y}_{21})}{[1 + \underline{Y}_{22}\underline{Z}][1 + \underline{Y}_{11}\underline{Z}] - \underline{Z}^2 \underline{Y}_{21}\underline{Y}_{12}}, \quad (3)$$

де  $\dot{E}_{1L} = \dot{E}_1\sqrt{3}e^{j\cdot 30^\circ}$ ,  $\dot{E}_{2L} = \dot{E}_2\sqrt{3}e^{-j\cdot 30^\circ}$  — еквівалентні лінійні ЕРС прямої та зворотної послідовності (эквивалентные линейные ЭДС прямой и обратной последовательности; equivalent line emf of positive and negative sequence);  $\dot{E}_1, \dot{E}_2$  — ЕРС прямої та зворотної послідовностей джерела (ЭДС прямой и обратной последовательности источника; source emf of positive and negative sequence);  $\underline{Z} = \underline{Z}_L + \underline{Z}_T$ . Тут і надалі для зручності прийнято, що всі параметри зведені до напруги високої сторони (здесь и в дальнейшем для удобства принято, что все параметры приведены к напряжению высокой стороны; here and further we accept all parameters to be led to high voltage side). Вирази (2), (3) мають вигляд подібний виразам, отриманим в [2].

У випадку симетричного джерела ( $\dot{E}_{2L} = 0$ ) критерій, у разі застосування якого забезпечується симетрування навантаження, згідно з (2) та (3) буде мати вигляд

$$\underline{Y}_{21} = 0. \quad (4)$$

В цьому випадку  $U_2 = 0$ ,  $I_2 = 0$ .

З використанням критерію (4) розроблені вимірювальні системи установок для симе-

трування навантажень [4, 5]. Їх застосування є ефективним за наявності симетричного джерела ЕРС.

Для несиметричного джерела ЕРС ( $\dot{E}_{2L} \neq 0$ ) у разі застосування критерію (4) відбувається неповне симетрування і залишкові напруга та струм зворотної послідовності у вузлі приєднання навантаження у відповідності з (2) та (1) будуть

$$\dot{U}_2 = \frac{-\dot{E}_{2L}}{1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}}; \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_2 \underline{Y}_{22}, \quad (5)$$

а, оскільки  $\underline{Y}_{22} \approx (0,001 \div 0,01) \frac{1}{\underline{Z}_L}$  [6], та  $\underline{Z}_T \approx (1 \div 10) \underline{Z}_L$  [7] (в залежності від потужності трансформатора, довжини і перерізу лінії електропередачі), то в даному випадку напруга зворотної послідовності  $U_2 \approx (0,8 \div 0,9) E_{2L}$ , що не влаштовує споживачів.

Як впливає з (2), критерій, за яким необхідно здійснювати керування для забезпечення повного симетрування напруги ( $U_2 = 0$ ) у вузлі навантаження, повинен бути сформульований у вигляді

$$\underline{Y}_{21} = \frac{\dot{E}_{2L}}{\dot{E}_{1L}} \left( \underline{Y}_{11} + \frac{1}{\underline{Z}} \right). \quad (6)$$

В разі дотримання цієї умови виникне струм зворотної послідовності

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2L}}{\underline{Z}}. \quad (7)$$

Отже, процес симетрування напруги за критерієм (6) з використанням компенсаційних установок пов'язаний із зміною струму зворотної послідовності, значення якого істотно впливає на рівень втрат активної потужності в системі електропередачі. Тому виникає необхідність аналізу симетрії напруги з урахуванням значень струму, що існує в лінії.

Для наочності наведемо приклади розрахунків для системи електропостачання тягової підстанції (див. рис. 1). Потужність трансформатора Т1 — 25000 кВ А, опір лінії електропередачі —  $\underline{Z}_L = 0,7 + j \cdot 0,3$  Ом, потужність трансформатора Т2 — 250 кВ А, опір короткого замикання трансформатора Т2 —  $\underline{Z}_T = 7 + j \cdot 18$  Ом.

За наявності допустимої несиметрії напруги (2 %) і використання критерію (4) у разі приєднання симетричного навантаження (вузол 3) встановиться таке діюче значення струму зворотної послідовності:  $I_2 \approx U_2 Y_{22} \approx 0,2 \div 4$  А, що складає (1,5...15) % від номінального струму трансформатора споживача. За наявності компенсаційної установки і виконання критерію (6)  $U_2 = 0$ , а значення струму зворотної послідовності зросте:  $I_2 \approx 10$  А, що складає 70 % від номінального струму трансформатора. Отже, виконання умови (6) зумовлює великі втрати потужності в лінії електропередачі, що вказує на неекономічність такого підходу.

Проаналізовані випадки несиметричного джерела живлення дозволяють зробити висновок про допустимість застосування компенсаційних установок симетрування за умови, коли величина  $\dot{E}_{2L}$  не перевищує норми, встановленої ГОСТом 13109-97, і струм зворотної послідовності не перевищує величини, допустимої для даної системи за економічними показниками.

### Симетрування з пофазним регулюванням коефіцієнтів трансформації

Реальний стан в мережах тягових підстанцій зумовлений наявністю несиметрії напруг на виводах обмоток трансформатора, більшої від допустимих значень. В такому випадку викликає інтерес дослідження економічніших і ефективніших способів симетрування. Серед таких способів дослідимо ефективність застосування симетрувального трансформатора.

Зв'язок між струмами прямої, зворотної та нульової послідовностей у первинній та вторинній обмотках симетрувального трансформатора може бути описаний за допомогою рівняння

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{1f} \\ \dot{I}_{2f} \\ \dot{I}_{0f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{K}_1 & \underline{K}_2 & \underline{K}_3 \\ \underline{K}_3 & \underline{K}_1 & \underline{K}_2 \\ \underline{K}_2 & \underline{K}_3 & \underline{K}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де  $\dot{I}_{1f}$ ,  $\dot{I}_{2f}$ ,  $\dot{I}_{0f}$  – струми відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей в первинній обмотці трансформатора (токи, соответственно, прямой, обратной и нулевой последовательностей в первичной обмотке трансформатора; positive, negative and zero sequences currents in primary winding of transformer);

$\underline{K}_1 = -\frac{1}{3}(k_A + k_B + k_C)$ ,  $\underline{K}_2 = -\frac{1}{3}(k_A + a^2 k_B + a k_C)$ ,  $\underline{K}_3 = -\frac{1}{3}(k_A + a k_B + a^2 k_C)$  – коефіцієнти передавання відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей трансформатора із схемою з'єднання обмоток  $\Delta/\Upsilon$  з пофазним регулюванням напруги (коэффициенты передачи соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформатора со схемой соединения обмоток  $\Delta/\Upsilon$  с пофазным регулированием напряжения; transmission gains accordingly positive, negative and zero sequences of transformer with winding scheme of delta/ye with single-phase voltage control);  $a = e^{j \cdot 120^\circ}$  – фазовий оператор (фазный оператор; phase operator). В цих виразах (В этих выражениях; In these expressions)  $k_A = \frac{1}{1+n_A}$ ,  $k_B = \frac{1}{1+n_B}$ ,  $k_C = \frac{1}{1+n_C}$ , де  $n_A$ ,  $n_B$ ,  $n_C$  – відносні прирости кількості витків обмоток відповідних фаз (относительные приросты количества витков обмоток соответствующих фаз; relative increments of quantity of winding coils of respective phases).

Вирази для напруг у вузлі приєднання навантаження в даному випадку набудуть вигляду

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{K}_1 & \underline{K}_2 & \underline{K}_3 \\ \underline{K}_3 & \underline{K}_1 & \underline{K}_2 \\ \underline{K}_2 & \underline{K}_3 & \underline{K}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\dot{E}_1 - \dot{I}_{1L} \underline{Z}) \sqrt{3} \cdot e^{j \cdot 30^\circ} \\ (\dot{E}_2 - \dot{I}_{2L} \underline{Z}) \sqrt{3} \cdot e^{-j \cdot 30^\circ} \\ \dot{I}_{0f} 3 \underline{Z}_T \end{bmatrix}. \quad (9)$$

З (9) можна отримати умову симетрування напруг ( $\dot{U}_2 = 0$ ) за відсутності незрівноваженості навантаження

$$\frac{\underline{K}_3}{\underline{K}_1} \cdot e^{j \cdot 60^\circ} = -\frac{\dot{U}_2'}{\dot{U}_1'}. \quad (10)$$

де  $\dot{U}_1' = (\dot{E}_2 - \dot{I}_{2L} \underline{Z})$ ,  $\dot{U}_2' = (\dot{E}_1 - \dot{I}_{1L} \underline{Z})$  – напруги прямої та зворотної послідовності на високій стороні трансформатора (напряжения прямой и обратной последовательности на высокой стороне трансформатора; positive and negative sequence voltages on high side of transformer).

В загальному випадку за наявності несиметрії навантаження критеріальну функцію алгоритму розв'язування рівнянь (9) та (8) можна подати у вигляді

$$\dot{U}_2 \rightarrow \min \quad (11)$$

з обмеженнями

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &\leq \dot{I}_{2giv}; \\ \dot{U}_0 &\leq \dot{U}_{0per}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\dot{I}_{2giv}$  – заданий струм зворотної послідовності, визначений за умови економічності втрат потужності (заданный ток обратной последовательности, определенный при условии экономичности потерь мощности; given negative sequence current defined under economy of power losses condition);  $\dot{U}_{0per}$  – допустиме значення напруги зворотної послідовності, яке визначається ГОСТ 13109-97 (допустимое значение напряжения обратной последовательности, которое

определяется ГОСТ 13109-97; permissible meaning of negative sequence voltage which is determined by all-Union State Standard 131019-97) (2 %).

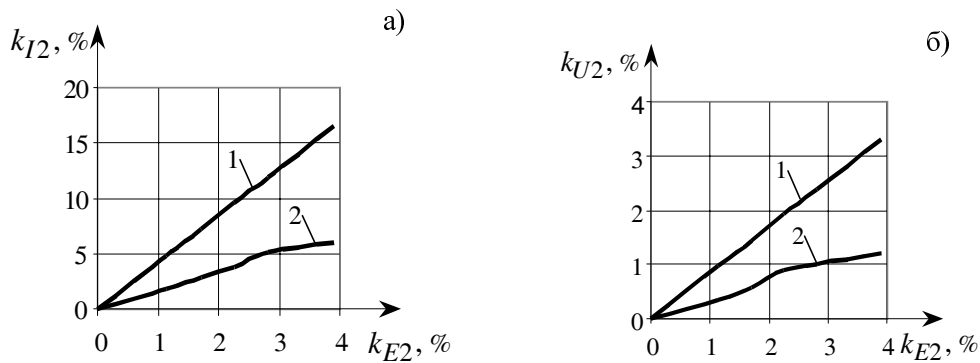


Рис. 2. Графіки залежностей струму (а) та напруги (б) зворотної послідовності до і після застосування пофазного регулювання

Рис. 2. Графики зависимостей тока (а) и напряжения (б) обратной последовательности до и после применения пофазного регулирования

Fig. 2. Plots of dependence of the current (a) and the voltage (b) of negative sequence before and after single-phase control

Результати аналізу закону керування (10) з урахуванням обмежень (12) показано на рис. 2. Графіки 1 коефіцієнтів зворотної послідовності струму  $k_{I2}$  (рис. 2а) та напруги  $k_{U2}$  (рис. 2б) побудовані як функції коефіцієнта зворотної послідовності ЕРС  $k_{E2}$  за відсутності регулювання напруги, а графіки 2 — після виконання регулювання в двох фазах трансформатора Т2.

Наведені залежності свідчать про можливість одночасного істотного зниження значень напруги та струму зворотної послідовності у разі використання пофазного регулювання.

### Симметрирование с использованием компенсационных установок

Связь между токами и напряжениями прямой и обратной последовательности в узле электрической сети может быть отображена с помощью уравнения (1) [2].

В случае использования серийного трансформатора Т2 напряжение и ток обратной последовательности на вторичной стороне трансформатора определяются из выражений (2, 3). Выражения (2), (3) имеют вид подобный выражениям, полученным в [2].

В случае симметричного источника ( $\dot{E}_{2L} = 0$ ) критерий, применение которого обеспечивает симметрирование нагрузки, в соответствии с (2) и (3) будет иметь вид (4).

В этом случае  $U_2 = 0, I_2 = 0$ .

С использованием критерия (4) разработаны измерительные системы установок для симметрирования нагрузок [4, 5]. Их применение является эффективным при наличии симметричного источника ЭДС.

При несимметричном источнике ЭДС ( $\dot{E}_{2L} \neq 0$ ) в случае применения критерия (4) происходит неполное симметрирование и остаточные напряжение и ток обратной последовательности в узле присоединения нагрузки в соответствии с (2) и (1) будут определяться выражениями (5), а поскольку  $Y_{22} \approx (0,001 \div 0,01) \frac{1}{Z_L}$  [6], а  $Z_T \approx (1 \div 10) Z_L$  [7] (в зависимости от мощности трансформатора, длины и сечения линии электропередачи), то в данном случае напряжение обратной последовательности  $U_2 \approx (0,8 \div 0,9) E_{2L}$ , что не устраивает потребителей.

Как следует из (2), критерий, с помощью которого необходимо осуществлять управление для обеспечения полного симметрирования напряжения ( $U_2 = 0$ ) в узле нагрузки должен быть сформирован в виде (6).

При соблюдении этого условия возникнет ток обратной последовательности, определяемый выражением (7).

Итак, процесс симметрирования напряжения по критерию (6) с использованием компенсационных установок связан с изменением тока обратной последовательности, значение которого су-

щественным образом влияет на уровень потерь активной мощности в системе электропередачи. Поэтому возникает необходимость анализа симметрии напряжения с учетом значений тока, существующего в линии.

В качестве иллюстрации приведём примеры расчетов для системы электроснабжения тяговой подстанции (см. рис. 1). Мощность трансформатора Т1 – 25000 кВ·А, сопротивление линии электропередачи —  $\underline{Z}_L = 0,7 + j \cdot 0,3$  Ом, мощность трансформатора Т2 — 250 кВ·А, сопротивление короткого замыкания трансформатора Т2 —  $\underline{Z}_T = 7 + j \cdot 18$  Ом.

При наличии допустимой несимметрии напряжения (2 %) и использование критерия (4) в случае присоединения симметричной нагрузки (узел 3) установится следующее действующее значение тока обратной последовательности:  $I_2 \approx U_2 Y_{22} \approx 0,2 \div 4$  А, что составляет (1,5...15) % от номинального тока трансформатора потребителя. При наличии компенсирующей установки и выполнении критерия (6)  $U_2 = 0$ , а значение тока обратной последовательности возрастет:  $I_2 \approx 10$  А, что составляет 70 % от номинального тока трансформатора. Следовательно, выполнение условия (6) предопределяет большие потери мощности в линии электропередачи, что указывает на неэкономичность такого подхода.

Проанализированные случаи несимметричного источника питания разрешают сделать вывод о допустимости применения компенсационных установок симметрирования при условии, если величина  $\dot{E}_{2L}$  не превышает нормы, установленной ГОСТом 13109-97, и ток обратной последовательности не превышает величины, допустимой для данной системы по экономическим показателям.

### Симметрирование с пофазным регулированием коэффициентов трансформации

Реальное состояние в сетях тяговых подстанций обусловлено наличием несимметрии напряжений на выводах обмоток трансформатора, большей чем допустимые значения. В таком случае вызовет интерес исследование более экономичных и эффективных способов симметрирования. Среди таких способов исследуем эффективность применения симметрирующего трансформатора.

Связь между токами прямой, обратной и нулевой последовательностей в первичной и вторичной обмотках симметрирующего трансформатора может быть описан с помощью уравнения (8).

Выражения для напряжений в узле присоединения нагрузки в данном случае примут вид (9).

Из (9) можно получить условие симметрирования напряжений ( $U_2 = 0$ ) при отсутствии неуровновешенности нагрузки в виде (10).

В общем случае при наличии несимметрии нагрузки критериальную функцию алгоритма решения уравнений (9) и (8) можно представить в виде (11) при ограничениях (12).

Результаты анализа закона управления (10) с учетом ограничений (12) представлены на рис. 2. Графики 1 коэффициентов обратной последовательности тока  $k_{I2}$  (см. рис. 2а) и напряжения  $k_{U2}$  (рис. 2б) построены как функции коэффициента обратной последовательности ЭДС  $k_{E2}$  при отсутствии регулирования напряжения, а графики 2 — после выполнения регулирования в двух фазах трансформатора Т2.

Приведенные зависимости свидетельствуют о возможности одновременного существенного снижения значений напряжения и тока обратной последовательности в случае использования пофазного регулирования.

### Balancing using compensation units

Relation between currents and voltages of positive and negative sequence in electric mains node can be represented by means of equation (1) [2]:

In case of serial transformer T2 usual voltage and current of negative sequence on the second transformer side are determined from expressions (2, 3). Expressions (2), (3) are similar to expressions obtained in [2].

In the case of the symmetrical source ( $\dot{E}_{2L} = 0$ ) criterion, at which load balancing is provided, according to (2) and (3) will be of form (4).

In this case  $U_2 = 0$ ,  $I_2 = 0$ .

Measuring systems of plants for loads balancing are elaborated using criterion (4) [4, 5]. Their application is effective when the emf source is balanced.

Under unbalanced emf source condition ( $\dot{E}_{2L} \neq 0$ ) when using of criterion (4) the incomplete balancing is carried out and residuary voltage and current of negative sequence in the node of load connection in accordance with (2) and (1) are defined by expressions (5), and since  $Y_{22} \approx (0.001 \div 0.01) \frac{1}{Z_L}$  [6], and  $Z_T \approx (1 \div 10) Z_L$  [7] (depending on transformer power and length and section of power line), than negative sequence voltage in this case is  $U_2 \approx (0.8 \div 0.9) E_{2L}$ , that doesn't satisfy customers.

As it follows from (2), criterion necessary to realize control to provide complete voltage balancing ( $U_2 = 0$ ) in the load node should be formed as (6).

At observance of this condition negative sequence current will arise which is defined by expression (7).

Hence voltage balancing process by means of criterion (6) using compensation units is connected with change of negative sequence current whose meaning essentially influences the active power loss level in power system. Therefore necessity of analysis of voltage asymmetry taking into account line current values arises.

Let's cite calculation examples for power-supply system of traction substation for clearness (fig. 1). Power of transformer T1 – 25000 kV A, power line impedance –  $Z_L = 0.7 + j \cdot 0.3$  Om, power of transformer T2 – 250 kV A, short-circuit resistance of transformer T2 –  $Z_T = 7 + j \cdot 18$  Om.

In the presence of permissible voltage asymmetry (2 %) and use of criterion (4) when connection of symmetrical load (node 3) such effective meaning of negative sequence current will be established  $I_2 \approx U_2 Y_{22} \approx 0.2 \div 4$  A, that is (1.5...15) % from nominal current of customer's transformer. In the presence of compensative plant and carrying-out the criterion (6)  $U_2 = 0$  and the meaning of negative sequence current will increase:  $I_2 \approx 10$  A, that is 70 % from transformer nominal current. Therefore, carrying out the condition (6) determines heavy power losses in power line, that points out the diseconomy of such approach.

Analysed cases of unsymmetrical source allows to draw a conclusion about permissibility of application of compensation of balancing units on conditions that value  $\dot{E}_{2L}$  doesn't exceed the standard defined by all-Union State Standard 131019-97 and negative sequence current doesn't exceed a value permissible for the present system in accordance with economic parameters.

### Balancing using by-phase control of transformation ratios

Real condition in the circuits of traction substations is determined by presence of voltage asymmetry on the top of transformer windings greater than allowable meaning. In this case investigation of more economical and effective balancing methods causes an interest. Among such methods let's investigate effectiveness of balancing transformer usage.

Relationship between positive, negative and zero sequences currents in primary and secondary windings of balancing transformer can be described by means of equation (8).

Expressions for voltages in the node of connected load in this case will be (9).

A condition for voltage balancing ( $\dot{U}_2 = 0$ ) at the absence unbalanced state of load can be obtained from (9) (10)

In the general case criterial function of solution algorithm of equations (9) and (8) can be presented in form (11) at limitations (12).

Results of analysis of control law (10) are presented in Fig. 2 taking into account limitations (12). Plots 1 of factors of negative sequence currents  $k_{I2}$  (Fig. 2a) and voltage  $k_{U2}$  (Fig. 2b) built as the functions of factors of negative sequence emf  $k_{E2}$  in the absence of voltage adjustment and the plots 2 – after performance of adjustment in two phases of transformer T2.



## Висновки

Отримано математичні моделі побудови вимірювальних систем установок симетрування для двох підходів симетрування напруги в вузлі приєднання споживача: використання компенсаційних установок симетрування і установок з пофазним керуванням симетрувального трансформатора. Показано, що використання першого підходу малоефективне через виникнення великих втрат активної потужності в лінії електропередачі. За умов невеликої несиметрії джерела напруги (до 4 %), що властиво для тягових підстанцій, доцільно використовувати установки з пофазним керуванням симетрувального трансформатора. Результати проведеного моделювання вимірювальних систем у складі установок симетрування свідчать, що струм та напруга зворотної послідовності зменшуються в 3...4 рази, причому значення  $U_2$  не перевищує допустимих норм.

## Выводы

Получены математические модели построения измерительных систем установок симметрирования при двух подходах симметрирования напряжения в узле присоединения потребителя: использование компенсационных установок симметрирования и установок с пофазным управлением симметрирующего трансформатора. Показано, что использование первого подхода малозэффективно за счет возникновения больших потерь активной мощности в линии электропередачи. При условиях небольшой несимметрии источника напряжения (до 4 %), что свойственно тяговым подстанциям, целесообразно использовать установки с пофазным управлением симметрирующего трансформатора. Результаты проведенного моделирования измерительных систем в составе установок симметрирования свидетельствуют, что ток и напряжение обратной последовательности уменьшаются в 3...4 раза, причем значение  $U_2$  не превышает допустимых норм.

## Conclusions

Mathematical models of balancing units measuring system construction are obtained at two approaches of voltage balancing in consumer's node: using of balancing plants and by-phase control units of balancing transformer. It is shown, that application of first approach is noneffective due to appearance of great active power losses in power line.

Under small voltage source asymmetry condition (under 4 %) that ispeculiar to traction substations is worth using plants with by-phase control of balancing transformer. Modelling results of measuring systems of balancing units prove that current and voltage of negative sequence decrease 3...4 times, value of  $U_2$  does not exceed allowable standards.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### REFERENCES

1. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. — К.: Наукова думка, 1985. — 268 с.
2. Кузнецов В. Г. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками // Электричество. — 1983. — № 2. — С. 64—67.
3. Сергеевков Б. Н., Киселёв В. М., Акимова Н. А. Электрические машины. Трансформаторы. — М.: Высшая школа, 1989. — 352 с.
4. Бурбело М. Й., Бірюков О. О., Бабенко О. В. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2002. — № 2. — С. 92—95.
5. Бурбело М., Бабенко О. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування швидкозмінних навантажень трифазних споживачів // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2003. — № 5. — С. 25—27.
6. Жуков В. В., Неклепаев Б. Н. Эквивалентное сопротивление обратной последовательности узлов комплексной нагрузки // Электричество. — 1975. — № 10. — С. 57—60.
7. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю. Г. Барыбина и др. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження

Надійшла до редакції 05.09.05  
Рекомендована до друку 16.09.05

**Бурбело Михайло Йосипович** — завідувач кафедри, **Бабенко Олексій Вікторович** — аспірант

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження, Вінницький національний технічний університет

**Бурбело Михаил Иосифович** — заведующий кафедрой, **Бабенко Алексей Викторович** — аспирант.

Кафедра электротехнических систем электропотребления и энергосбережения, Винницкий национальный технический университет

**Burbelo Myhajlo** — Head of Chair, **Babenko Oleksiy** — Post-Graduate Student.

Department of electrotechnical electro-consumption systems and energy-saving, Vinnytsia National Technical University