

- hozjajstve Sibiri // Vestn. KrasGAU. – 2015. – S. 103–108.
3. *Bastron A.V.* Vozmozhnosti bioenergetiki Krasnojarskogo kraja // Agrotehnologii HHI veka: mat-ly vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvjashh. 85-letiju osnovanija Permskoj GSHA i 150-letiju so dnja rozhdenija akad. D.N. Prjanishnikova / Permskaja gos. s.-h. akad. im. akad. D.N. Prjanishnikova. – Perm', 2015. – S. 8–13.
  4. *Bogachev A.I., Poluhina M.G.* Reshenie problemy utilizacii navoza kak faktor obespechenija jekologicheskoy bezopasnosti i social'no-jekonomicheskogo rosta otrasli svinovodstva // Jefferktivnoe zhivotnovodstvo. – 2015. – № 8 (117).
  5. *Voloshin E.I.* Jefferktivnost' primenenija organicheskikh udobrenij v agropromyshlennom komplekse Krasnojarskogo kraja // Vestn. KrasGAU. – 2016. № 4. – S. 138–146.
  6. Al'ternativnaja jenergija Rossii – biogaz. – URL: [http://belgorodinvest.com/files/Doc\\_for\\_articles/agro\\_10.pdf](http://belgorodinvest.com/files/Doc_for_articles/agro_10.pdf) (data obrashhenija 18.10.2016 g.).
  7. Biogazovye ustanovki // ZORG BIOGAZ AG: oficial'nyj sajt. – URL: <http://www.zorgbiogas.ru/?lang=ru> (data obrashhenija 18.10.2016 g.)
  8. Svin'i dadut teplo i svet / OAO «Slavino» [Oficial'nyj sajt] URL: <http://slavino.net/> (data obrashhenija 18.10.2016 g.).
  9. *Sheudzhen A.H., Kurkaev V.T., Kotljarov N.S.* Agrohimiya: uchebnoe posobie. – Majkop: Afisha, 2006. – 1075 s.
  10. *Semenov V.M., Kogut B.M.* Pochvennoe organicheskoe veshhestvo. – M.: GEOS, 2015. – 233 s.
  11. *Mihajlova L.A.* Agrohimiya: ucheb. posobie. Ch. 1. – Perm', 2015. – 427 s.
  12. *Belous N.M., Shapovalov V.F., Moiseenko F.V.* i dr. Vlijanie razlichnyh sistem udobrenija na nakoplenie tjazhelyh metallov v sel'skohozjajstvennoj produkcii // Vestn. Brjanskoj gos. s.-h. akad. – Brjansk, 2006. – S. 22–29.



УДК 621.311.13

*И.В. Наумов, Е.А. Белоусова*

### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СИММЕТРИРОВАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 кВ

*I.V. Naumov, E.A. Belousova*

### THE CHOICE OF PARAMETERS OF DEVICES OF SYMMETRIZING IN DISTRIBUTIVE ELECTRICAL NETWORKS OF 0.38 KV

**Наумов И.В.** – д-р техн. наук, проф. каф. электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск. E-mail: [professornaumov@list.ru](mailto:professornaumov@list.ru)

**Белоусова Е.А.** – магистрант каф. электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск. E-mail: [belousova\\_ea@kvsu.ru](mailto:belousova_ea@kvsu.ru)

**Naumov I.V.** – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Power Supply and Electric Technique, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk. E-mail: [professornaumov@list.ru](mailto:professornaumov@list.ru)

**Belousova E.A.** – Magistrate Student, Chair of Power Supply and Electric Technique, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk. E-mail: [belousova\\_ea@kvsu.ru](mailto:belousova_ea@kvsu.ru)

*Низковольтные распределительные электрические сети напряжением 0,38 кВ объективно работают в режиме значительной несимметрии токов и напряжений. Целью исследова-*

*ния является определение параметров симметрирующего устройства в зависимости от заданных параметров нагрузки и показателей несимметрии. Задачами исследования*

является определение симметричных составляющих проводимостей прямой (обратной) и нулевой последовательностей СУ, а также пример расчета параметров СУ на основе полученных выражений. В статье представлен метод определения параметров симметрирующих устройств для нормализации качества и снижения дополнительных потерь электрической энергии, обусловленных несимметричным электропотреблением в распределительных сетях 0,38 кВ. Исходными данными для математической модели служат результаты измерений показателей несимметрии токов и напряжений в электрической сети, параметры самой сети 0,38 кВ, а также относительные мощности фазных несимметричных и трехфазной симметричной нагрузок. В качестве основных методологических предпосылок использованы метод симметричных составляющих, а также теоретические основы электротехники. Получены математические выражения для определения симметричных составляющих проводимостей прямой (обратной) и нулевой последовательностей симметрирующего устройства (СУ). В исходных данных для примера расчета использованы материалы научных исследований, произведенных для определения показателей несимметрии при известных значениях параметров электрической сети и параметров СУ. Для определения параметров СУ необходимо предварительно произвести измерение (либо расчет) показателей несимметрии токов и напряжений в исследуемой электрической сети. Зная параметры электрической сети и результаты измерения показателей несимметрии, определяют параметры СУ. Представленный пример расчета коррелирует с данными предыдущих исследований.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, несимметрия токов и напряжений, симметрирующее устройство, симметричные составляющие токов и напряжений, показатели несимметрии токов и напряжений.

*Low-voltage distributive electric networks of 0.38 kV objectively work in the mode of considerable asymmetry of currents and tension. A research objective was the determination of parameters of the symmetrizing device depending on the set pa-*

*rameters of loading and indicators of asymmetry. The research problems were definition of symmetric components of conducting direct (return) and zero sequences of SU, and also an example of calculation of the SU parameters on the basis of the received expressions. The method of determination of parameters of the symmetrizing devices for normalization of quality and decrease in the additional losses of electric energy caused by asymmetrical power consumption in distributive networks of 0.38 kV was presented in the study. As basic data for mathematical model the results of measurements of indicators of asymmetry of currents and tension serve in an electric network, parameters of the network of 0.38 kV, and also relative capacities phase asymmetrical and three-phase symmetric loadings. As the main methodological prerequisites the method of symmetric components and also theoretical bases of electrical equipment were used. Mathematical expressions for the definition of symmetric components of conducting straight line (return) and zero sequences of the symmetrizing device (SD) are received. In basic data for an example of calculation materials of the scientific researches made for definition of indicators of asymmetry at known values of parameters of electric network and the SU parameters were used. For the determination of the SU parameters it is necessary to perform previously measurement (or calculation) indicators of asymmetry of currents and tension in the studied electric network. Knowing the parameters of electric network and the results of measurement of indicators of asymmetry, determine the SU parameters. The presented example of calculation correlates with data of the previous researches.*

**Keywords:** the quality of electric energy, asymmetry of currents and tension symmetrizing device, symmetric components of currents and tensions, indicators of asymmetry of currents and tensions.

**Введение.** Трехфазная система напряжений считается симметричной, если напряжения на всех фазах одинаковы по величине и фазе. В реальных условиях существуют некоторые отклонения от симметрии: в одних случаях они больше, в других меньше. Причиной несимметрии напряжений и токов обычно является неравномерное распределение однофазных нагрузок по фазам и случайный характер их ком-

мутаций в трехфазной системе. В [1] убедительно доказано, что наиболее эффективным средством снижения несимметрии токов является применение специальных симметрирующих устройств (СУ) с минимальным сопротивлением нулевой последовательности. Существующие методы определения симметричных составляющих основаны на законах изменяющихся параметров несимметричной нагрузки, а также заранее заданных параметров симметрирующего устройства. Во [2] рассмотрен способ определения параметров СУ, но расчет произведен только для частного случая. Общего метода расчета параметров симметрирующего устройства в зависимости от изменяющихся показателей несимметрии токов и напряжений не существует.

**Цель исследования:** определение параметров симметрирующего устройства в зависимости от заданных параметров нагрузки и показателей несимметрии.

**Задачи исследования:** определение симметричных составляющих проводимостей прямой (обратной) и нулевой последовательностей СУ, а также пример расчета параметров СУ на основе полученных выражений.

**Методы и результаты исследования.** На основе метода симметричных составляющих составим систему уравнений для токов:

$$\begin{cases} \underline{I}_A = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0; \\ \underline{I}_B = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_1 + \underline{a} \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_0; \\ \underline{I}_C = \underline{a} \cdot \underline{I}_1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  – токи соответственно фаз А, В и С;  $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$  – токи соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности;  $\underline{a}$  – оператор поворота, или фазный множитель ( $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{-j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ).

Аналогичные соотношения можно получить для симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей напряжений:

$$\begin{cases} \underline{U}_A = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \\ \underline{U}_B = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_1 + \underline{a} \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \\ \underline{U}_C = \underline{a} \cdot \underline{U}_1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0. \end{cases} \quad (2)$$

Для нахождения параметров симметрирующего устройства рассмотрим систему электропитания, представленную на рисунке 1. Узел нагрузки состоит из трехфазных симметричных электроприемников, включенных на междуфазное напряжение, образующих трехфазную симметричную нагрузку, и однофазных электроприемников, включенных на фазное напряжение и образующих трехфазную несимметричную нагрузку. Предположим, что симметрирующее устройство включено непосредственно в узел нагрузки.

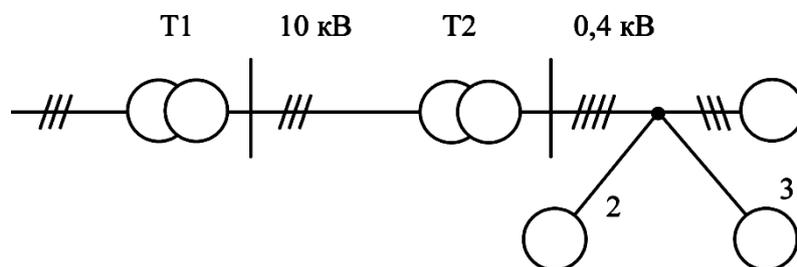


Рис. 1. Схема участка электрической сети с нагрузками и симметрирующим устройством: 1 –  $S_s$  – полная мощность трехфазной симметричной нагрузки; 2 –  $S_{su}$  – полная мощность симметрирующего устройства; 3 –  $S_n$  – полная мощность трехфазной несимметричной нагрузки

Схема замещения для данной сети представлена на рисунке 2.

Приняв фазу А за основную и заменив трехфазную несимметричную нагрузку тремя источниками неизвестных напряжений  $\underline{U}_{нА}$ ,  $\underline{U}_{нВ}$  и  $\underline{U}_{нС}$ , разложим эти напряжения на симметричные

составляющие напряжений прямой  $\underline{U}_{н1}$ , обратной  $\underline{U}_{н2}$  и нулевой  $\underline{U}_{н0}$  последовательностей. В результате получим симметричную трехфазную сеть, схема которой изображена на рисунке 3.

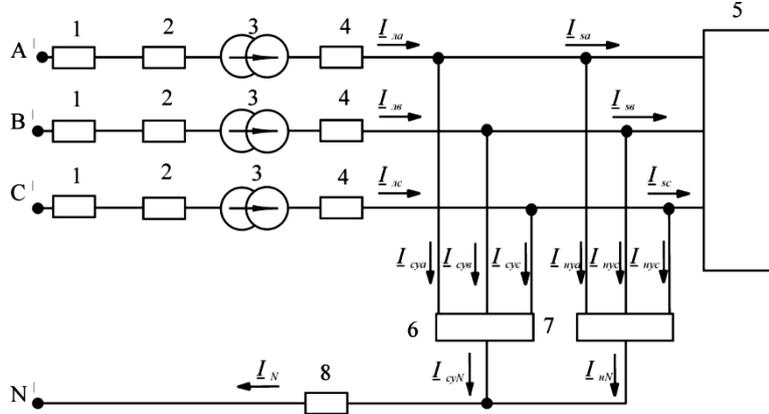


Рис. 2. Схема замещения участка электрической сети с нагрузками и симметрирующим устройством: 1 –  $\underline{Z}_{лв1}$ ; 2 –  $\underline{Z}_{Т1} = \underline{Z}_{Т2}, \underline{Z}_{Т0}$ ; 3 –  $\underline{n}$ ; 4 –  $\underline{Z}_{лн1} = \underline{Z}_{лн2}, \underline{Z}_{лн0}$ ; 5 –  $\underline{Z}_{с1}, \underline{Z}_{с2}, \underline{Z}_{с0} = \infty$ ; 6 –  $\underline{Z}_{сн1} = \underline{Z}_{сн2}, \underline{Z}_{сн0}$ ; 7 –  $\underline{Z}_{н1} = \underline{Z}_{н2}, \underline{Z}_{н0}$ ; 8 –  $\underline{Z}_N$

Проводимости СУ в фазах А, В и С определяются следующими выражениями:

$$\underline{Y}_{снА} = \frac{I_{снА}}{\underline{U}_{нА}}; \underline{Y}_{снВ} = \frac{I_{снВ}}{\underline{U}_{нВ}}; \underline{Y}_{снС} = \frac{I_{снС}}{\underline{U}_{нС}},$$

где  $I_{снА}$ ,  $I_{снВ}$  и  $I_{снС}$  – ток в фазах А, В и С соответственно симметрирующего устройства;  $\underline{U}_{нА}$ ,  $\underline{U}_{нВ}$  и  $\underline{U}_{нС}$  – напряжения фаз А, В и С соответственно.

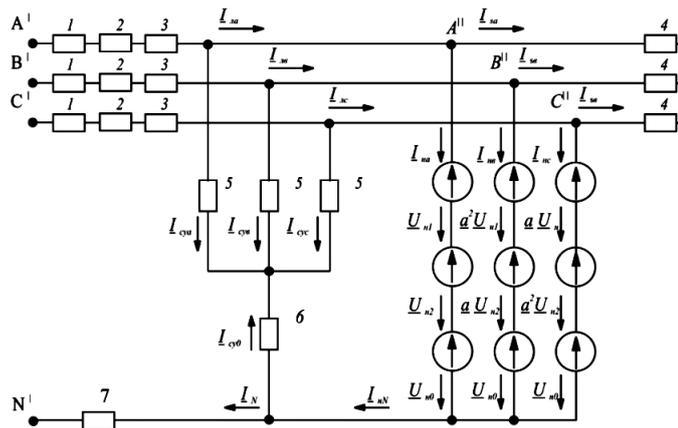


Рис. 3. Схема замещения участка электрической сети с трехфазным несимметричным источником напряжения и приведенными параметрами к сети напряжению 0,38 кВ:

$$1 - \underline{Z}_{лв1} = \underline{Z}_{лв2}; 2 - \underline{Z}_{Т1} = \underline{Z}_{Т2}, \underline{Z}_{Т0}; 3 - \underline{Z}_{лн1} = \underline{Z}_{лн2}, \underline{Z}_{лн0}; 4 - \underline{Z}_{с1}, \underline{Z}_{с2}; 5 - \underline{Z}_{сн1} = \underline{Z}_{сн2}; 6 - \underline{Z}_{сн0}; 7 - \underline{Z}_N$$

Токи в фазах симметрирующего устройства можно представить с помощью симметричных составляющих:

$$\begin{cases} \underline{I}_{cyA} = \underline{I}_{cy1} + \underline{I}_{cy2} + \underline{I}_{cy0}; \\ \underline{I}_{cyB} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{cy1} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{cy2} + \underline{I}_{cy0}; \\ \underline{I}_{cyC} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{cy1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{cy2} + \underline{I}_{cy0}, \end{cases} \quad (3)$$

где токи  $\underline{I}_{cy1}, \underline{I}_{cy2}, \underline{I}_{cy0}$  – токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, вычисляемые по следующим выражениям:

$$\begin{cases} \underline{I}_{cy1} = \underline{U}_{cy1} \cdot \underline{Y}_{cy1}; \\ \underline{I}_{cy2} = \underline{U}_{cy2} \cdot \underline{Y}_{cy2}; \\ \underline{I}_{cy0} = \underline{U}_{cy0} \cdot \underline{Y}_{cy0}. \end{cases} \quad (4)$$

На исходной схеме  $\underline{U}_{cyA} = \underline{U}_{нА}; \underline{U}_{cyB} = \underline{U}_{нВ}; \underline{U}_{cyC} = \underline{U}_{нС}$ , поэтому симметричные составляющие этих напряжений также должны быть равны.

На основе представленных выше выражений составим формулы для расчета токов симметрирующего устройства фаз А, В и С соответственно:

$$\begin{cases} \underline{I}_{cyA} = \underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{cy0}; \\ \underline{I}_{cyB} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{cy0}; \\ \underline{I}_{cyC} = \underline{a} \cdot \underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{cy0}. \end{cases} \quad (5)$$

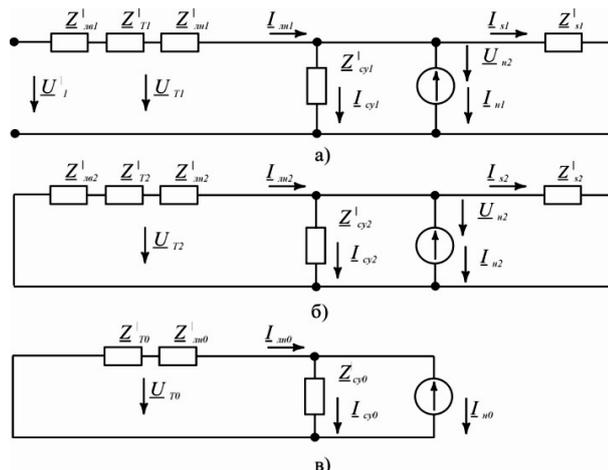


Рис. 4. Схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей для основной фазы трехфазной симметричной цепи с симметрирующим устройством

Полученные формулы подставим в выражения для определения проводимостей симметрирующего устройства в фазах А, В и С.

$$\begin{cases} \underline{Y}_{cyA} = \frac{\underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{cy0}}{\underline{U}_{н1} + \underline{U}_{н2} + \underline{U}_{н0}}; \\ \underline{Y}_{cyB} = \frac{\underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{cy0}}{\underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н1} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{н2} + \underline{U}_{н0}}; \\ \underline{Y}_{cyC} = \frac{\underline{a} \cdot \underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{cy0}}{\underline{a} \cdot \underline{U}_{н1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н2} + \underline{U}_{н0}}. \end{cases} \quad (6)$$

В данном выражении неизвестными величинами являются проводимости СУ в фазах А, В и С, для их нахождения произведем дальнейшие преобразования исследуемой схемы электроснабжения. В схеме прямой последовательности заменим активную и две пассивные параллельные ветви одной эквивалентной ветвью с источником напряжения  $\underline{U}_{Э1}$  и проводимостью  $\underline{Y}_{Э1}$ :

$$\underline{U}_{Э1} = \frac{\underline{Y}_1 \cdot \underline{U}'_1}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_{p1}}; \quad \underline{Y}_{Э1} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_{p1}, \quad (7)$$

где  $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}$ ;  $\underline{Z}_1 = \underline{Z}'_{лв1} + \underline{Z}'_{Т1} + \underline{Z}'_{лн1}$ ;

$\underline{Y}_{p1} = \underline{Y}_{cy1} + \underline{Y}_{s1}$  – суммарная комплексная проводимость прямой последовательности симметрирующего устройства и трехфазной симметричной нагрузки.

В схеме обратной последовательности заменим три пассивные параллельные ветви одной эквивалентной ветвью с проводимостью

$$\underline{Y}_{\varepsilon 2} = \underline{Y}_2 + \underline{Y}_{p2}; \quad \underline{Z}_{\varepsilon 2} = \frac{1}{\underline{Y}_{\varepsilon 2}}, \quad (8)$$

где  $\underline{Z}_2 = \underline{Z}'_{л\theta 2} + \underline{Z}'_{T2} + \underline{Z}'_{лн2}$ ;  $\underline{Y}_{p2} = \underline{Y}_{cy2} + \underline{Y}_{s2}$  – суммарная комплексная проводимость обратной последовательности симметрирующего устройства и трехфазной симметричной нагрузки.

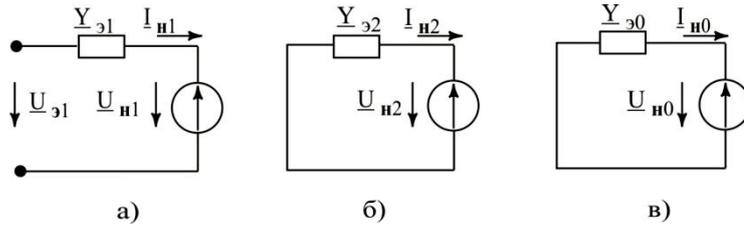


Рис. 5. Эквивалентные схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Для полученных схем составим уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\frac{I_{н1}}{\underline{Y}_{\varepsilon 1}} + U_{н1} = U_{\varepsilon 1}; \quad \frac{I_{н2}}{\underline{Y}_{\varepsilon 2}} + U_{н2} = 0; \quad \frac{I_{н0}}{\underline{Y}_{\varepsilon 0}} + U_{н0} = 0. \quad (10)$$

С учетом исходной схемы и параметров трехфазной сети:

$$\begin{cases} \underline{U}_A = \frac{1}{\underline{Y}_A} (I_{н1} + I_{н2} + I_{н0}); \\ \underline{U}_B = \frac{1}{\underline{Y}_B} (a^2 \cdot I_{н1} + a \cdot I_{н2} + I_{н0}); \\ \underline{U}_C = \frac{1}{\underline{Y}_C} (a \cdot I_{н1} + a^2 \cdot I_{н2} + I_{н0}), \end{cases} \quad (11)$$

Подставим в выражения нахождения напряжений фаз А,В и С уравнения, составленные нами по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \frac{1}{\underline{Y}_A} ((U_{\varepsilon 1} - U_{н1}) \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - U_{н2} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - U_{н0} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0}) = \underline{U}_A; \\ \frac{1}{\underline{Y}_B} (a^2 \cdot (U_{\varepsilon 1} - U_{н1}) \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - a \cdot U_{н2} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - U_{н0} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0}) = \underline{U}_B; \\ \frac{1}{\underline{Y}_C} (a \cdot (U_{\varepsilon 1} - U_{н1}) \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - a^2 \cdot U_{н2} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - U_{н0} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0}) = \underline{U}_C. \end{cases} \quad (12)$$

В схеме нулевой последовательности заменим две пассивные параллельные ветви одной эквивалентной с проводимостью

$$\underline{Y}_{\varepsilon 0} = \underline{Y}_{cy0} + \underline{Y}_0; \quad \underline{Z}_0 = \frac{1}{\underline{Y}_0}, \quad (9)$$

где  $\underline{Z}_0 = \underline{Z}'_{T0} + \underline{Z}'_{лн0}$ .

После проведенных преобразований получим одноконтурные расчетные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 5).

После преобразований получим следующее выражение:

$$\begin{cases} \frac{(U_{\varepsilon 1} - U_{н1})}{\underline{Y}_A} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - \frac{U_{н2}}{\underline{Y}_A} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - \frac{U_{н0}}{\underline{Y}_A} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0} = \underline{U}_A; \\ \frac{a^2 \cdot (U_{\varepsilon 1} - U_{н1})}{\underline{Y}_B} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - \frac{a \cdot U_{н2}}{\underline{Y}_B} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - \frac{U_{н0}}{\underline{Y}_B} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0} = \underline{U}_B; \\ \frac{a \cdot (U_{\varepsilon 1} - U_{н1})}{\underline{Y}_C} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - \frac{a^2 \cdot U_{н2}}{\underline{Y}_C} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - \frac{U_{н0}}{\underline{Y}_C} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0} = \underline{U}_C. \end{cases} \quad (13)$$

Для нахождения параметров симметрирующего устройства необходимо вычислить эквивалентные проводимости прямой, обратной и нулевой последовательностей  $\underline{Y}_{\varepsilon 1}$ ,  $\underline{Y}_{\varepsilon 2}$  и  $\underline{Y}_{\varepsilon 0}$ , для этого решим составленную систему уравнений методом Крамера.

Вычислим главный определитель  $\Delta$  системы уравнений:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{(U_{\varepsilon 1} - U_{н1})}{\underline{Y}_A} & -\frac{U_{н2}}{\underline{Y}_A} & -\frac{U_{н0}}{\underline{Y}_A} \\ \frac{a^2 \cdot (U_{\varepsilon 1} - U_{н1})}{\underline{Y}_B} & -\frac{a \cdot U_{н2}}{\underline{Y}_B} & -\frac{U_{н0}}{\underline{Y}_B} \\ \frac{a \cdot (U_{\varepsilon 1} - U_{н1})}{\underline{Y}_C} & -\frac{a^2 \cdot U_{н2}}{\underline{Y}_C} & -\frac{U_{н0}}{\underline{Y}_C} \end{vmatrix} = \frac{(U_{\varepsilon 1} - U_{н1}) \cdot U_{н2} \cdot U_{н0}}{\underline{Y}_A \cdot \underline{Y}_B \cdot \underline{Y}_C} \cdot (2a + a^4 - 3a^2) \quad (14)$$

Далее найдем дополнительные определители системы  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  и  $\Delta_0$ :

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \underline{U}_A & -\frac{\underline{U}_{n2}}{\underline{Y}_A} & -\frac{\underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_A} \\ \underline{U}_B & -\frac{a \cdot \underline{U}_{n2}}{\underline{Y}_B} & -\frac{\underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_B} \\ \underline{U}_C & -\frac{a^2 \cdot \underline{U}_{n2}}{\underline{Y}_C} & -\frac{\underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_C} \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{\underline{U}_{n2} \cdot \underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_A \cdot \underline{Y}_B \cdot \underline{Y}_C} \cdot (\underline{U}_A \underline{Y}_A (a - a^2) + \underline{U}_B \underline{Y}_B (a^2 - 1) + \underline{U}_C \underline{Y}_C (1 - a)), \quad (15)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \frac{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1})}{\underline{Y}_A} & \underline{U}_A & -\frac{\underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_A} \\ a^2 \cdot \frac{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1})}{\underline{Y}_B} & \underline{U}_B & -\frac{\underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_B} \\ a \cdot \frac{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1})}{\underline{Y}_C} & \underline{U}_C & -\frac{\underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_C} \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1}) \cdot \underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_A \cdot \underline{Y}_B \cdot \underline{Y}_C} \cdot (\underline{U}_A \underline{Y}_A (a^2 - a) + \underline{U}_B \underline{Y}_B (a - 1) + \underline{U}_C \underline{Y}_C (1 - a^2)), \quad (16)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} \frac{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1})}{\underline{Y}_A} & -\frac{\underline{U}_{n2}}{\underline{Y}_A} & \underline{U}_A \\ a^2 \cdot \frac{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1})}{\underline{Y}_B} & -\frac{a \cdot \underline{U}_{n2}}{\underline{Y}_B} & \underline{U}_A \\ a \cdot \frac{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1})}{\underline{Y}_C} & -\frac{a^2 \cdot \underline{U}_{n2}}{\underline{Y}_C} & \underline{U}_A \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1}) \cdot \underline{U}_{n0}}{\underline{Y}_A \cdot \underline{Y}_B \cdot \underline{Y}_C} \cdot (\underline{U}_A \underline{Y}_A (a^2 - a^4) + \underline{U}_B \underline{Y}_B (a^2 - a) + \underline{U}_C \underline{Y}_C (a^2 - a)). \quad (17)$$

Далее определяем эквивалентные проводимости прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\underline{Y}_{s1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A (a - a^2) + \underline{U}_B \underline{Y}_B (a^2 - 1) + \underline{U}_C \underline{Y}_C (1 - a)}{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1}) \cdot (2a + a^4 - 3a^2)}, \quad (18)$$

$$\underline{Y}_{s2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A (a^2 - a) + \underline{U}_B \underline{Y}_B (a - 1) + \underline{U}_C \underline{Y}_C (1 - a^2)}{\underline{U}_{n2} \cdot (2a + a^4 - 3a^2)},$$

$$\underline{Y}_{s0} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A (a^2 - a^4) + \underline{U}_B \underline{Y}_B (a^2 - a) + \underline{U}_C \underline{Y}_C (a^2 - a)}{\underline{U}_{n0} \cdot (2a + a^4 - 3a^2)}.$$

После нахождения эквивалентных проводимостей прямой, обратной и нулевой последовательностей можно вычислить:

– требуемые проводимости симметрирующего устройства

$$\begin{cases} \underline{Y}_{cy1} = \underline{Y}_{s1} - \underline{Y}_1 - \underline{Y}_{s1}; \\ \underline{Y}_{cy2} = \underline{Y}_{s2} - \underline{Y}_2 - \underline{Y}_{s2}; \\ \underline{Y}_{cy0} = \underline{Y}_{s0} - \underline{Y}_0; \end{cases} \quad (19)$$

$$\underline{U}_{n1} = \frac{\underline{U}_a}{1 + \underline{K}_{2ин} + \underline{K}_{0ин}}; \quad (20)$$

– напряжение обратной последовательности:

$$\underline{U}_{n2} = \underline{U}_{n1} \cdot \underline{K}_{2ин}; \quad (21)$$

– напряжение нулевой последовательности

$$\underline{U}_{n0} = \underline{U}_{n1} \cdot \underline{K}_{0ин}; \quad (22)$$

– ток прямой последовательности

$$\underline{I}_{n1} = \frac{\underline{I}_a}{1 + \underline{K}_{2ин} + \underline{K}_{0ин}}; \quad (23)$$

– ток обратной последовательности

$$\underline{I}_{n2} = \underline{I}_{n1} \cdot \underline{K}_{2ин}; \quad (24)$$

– ток нулевой последовательности

$$\underline{I}_{n0} = \underline{I}_{n1} \cdot \underline{K}_{0ин}, \quad (25)$$

где  $\underline{K}_{2ин}, \underline{K}_{0ин}, \underline{K}_{2ин}, \underline{K}_{0ин}$  – коэффициенты несимметрии напряжений и токов по обратной и нулевой последовательностям.

Для наглядного примера выполним расчет, взяв параметры реальной системы электроснабжения [3]. Длина ВЛ 10 кВ взята по нормам надежности электроснабжения, равна 16,7 км. Комплексное сопротивление прямой (обратной) последовательности этой линии, выполненной проводом марки АС-35, приведенное к напряжению 0,4 кВ:

$$\underline{Z}_{лa1} = \underline{Z}_{лa2} = 0,0243 + i0,01 = 0,0263 \cdot e^{i22,45} \text{ Ом.}$$

Питание нагрузки осуществляется от потребительской подстанции ТП 10/0,4 кВ с трансформатором со схемой соединения обмоток «звезда – звезда с нулем» мощностью  $S_{ном} = 40$  кВА. Сопротивление прямой (обратной) последовательности трансформатора

$$\underline{Z}_{T1} = \underline{Z}_{T2} = 0,09 + i0,156 = 0,18 \cdot e^{i60,02} \text{ Ом.}$$

Комплексное сопротивление нулевой последовательности трансформатора:

$$\underline{Z}_{T0} = 1,133 + i1,73 = 2,068 \cdot e^{i56,78} \text{ Ом.}$$

Линия выполнена проводом марки 4А-50. Сечение фазных и нулевого проводов приняты одинаковыми. Комплексные сопротивления прямой (обратной) последовательностей каждого из участков линии 0,38 кВ равны следующему:

$$\underline{Z}_{лн1} = \underline{Z}_{лн2} = 0,315 + i0,148 = 0,348 \cdot e^{i25,24} \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_{лн0} = 1,26 + i0,47 = 1,345 \cdot e^{i20,46} \text{ Ом.}$$

Для принятого примера выполним расчет параметров СУ для из вариантов различных соот-

**Данные, в соответствии с которыми изменяются относительные значения мощностей симметричной и несимметричной нагрузок в каждом из узлов:**

$P_a$	$P_b$	$P_c$	$P_s$
0,0177	0,00425	0,0030	0,225

Углы сдвига фаз трехфазной симметричной и несимметричной нагрузок приняты в соответствии со среднестатистическими данными несимметрии токов в сетях и соответственно равны следующему [1]:

$$\varphi_s = 36,87^0; \quad \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = 25,84^0.$$

Значение коэффициентов несимметрии напряжений и токов определяются по результатам измерений. Для нашего примера эти значения примем в соответствии с [1]:

$$\underline{K}_{2ин} = 0,00237 \cdot e^{i217,9745} = -0,0019 - i0,0015;$$

$$\underline{K}_{0ин} = 0,03329 \cdot e^{i254,5942} = -0,0088 - i0,0321;$$

$$\underline{K}_{2ин} = 0,03065 \cdot e^{i27,3581} = 0,0272 + i0,0141;$$

$$\underline{K}_{0ин} = 0,05192 \cdot e^{i20,8342} = 0,0485 + i0,0185.$$

Для начала найдем значения напряжений фаз А, В и С через их составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, полученные через имеющиеся коэффициенты несимметрии:

ношений мощностей  $S_s$  и  $S_H$  при номинальной мощности трансформатора, т. е. соблюдено следующее условие [3]:

$$p_s + p_H = 1,0 = \text{const},$$

$$\text{где } p_H = P_a + P_b + P_c = \frac{S_a}{S_{\text{НОМ}}} + \frac{S_b}{S_{\text{НОМ}}} + \frac{S_c}{S_{\text{НОМ}}}.$$

Полные мощности и комплексы проводимостей отдельных фаз трехфазной симметричной и несимметричной нагрузок определены на основании статистических характеристик несимметрии токов в сельской сети по аналитическим выражениям в соответствии с [1, 3].

$$\begin{aligned} \underline{U}_{н1} &= \frac{\underline{U}_a}{1 + \underline{K}_{2ин} + \underline{K}_{0ин}} = 222,2447 \cdot e^{i1,9476} = 222,1166 + i7,543; \\ \underline{U}_{н2} &= \underline{U}_{н1} \cdot \underline{K}_{2ин} = 0,5266 \cdot e^{i219,92} = -0,4039 - i0,3379; \\ \underline{U}_{н0} &= \underline{U}_{н1} \cdot \underline{K}_{0ин} = 7,3973 \cdot e^{i256,54} = -1,7223 - i7,1953. \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, фазные напряжения будут равны:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 219,9904 + i0,0098 = 219,9904 \cdot e^{i0,0026}; \\ \underline{U}_B &= a^2 \cdot \underline{U}_1 + a \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = -105,7535 - i203,5063 = 229,4336 \cdot e^{-i117,4993}; \\ \underline{U}_C &= a \cdot \underline{U}_1 + a^2 \cdot \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = -119,4038 + i181,9107 = 217,5977 \cdot e^{i123,2804}. \end{aligned} \quad (27)$$

Далее рассчитаем комплексные проводимости трехфазной несимметричной и симметричной нагрузок:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_A &= \frac{S_{\text{нон}} \cdot P_a}{U_{\text{ф.ном}}^2 \cdot e^{i\varphi_a}} = \frac{40000 \cdot 0,0177}{220^2 \cdot e^{i25,84}} = 0,0146 \cdot e^{-i25,84}, \\ \underline{Y}_b &= \frac{S_{\text{нон}} \cdot P_b}{U_{\text{ф.ном}}^2 \cdot e^{i\varphi_b}} = \frac{40000 \cdot 0,00425}{220^2 \cdot e^{i25,84}} = 0,0035 \cdot e^{-i25,84}, \\ \underline{Y}_c &= \frac{S_{\text{нон}} \cdot P_c}{U_{\text{ф.ном}}^2 \cdot e^{i\varphi_c}} = \frac{40000 \cdot 0,003}{220^2 \cdot e^{i25,84}} = 0,0025 \cdot e^{-i25,84}, \\ \underline{Y}_{s1} &= \underline{Y}_{s1} = \frac{S_{\text{нон}} \cdot P_s}{U_{\text{ф.ном}}^2 \cdot e^{i\varphi_s}} = \frac{40000 \cdot 0,225}{220^2 \cdot e^{i36,87}} = 0,0623 \cdot e^{-i36,87}. \end{aligned} \quad (28)$$

Подставляя полученные значения в выражение (19), получим эквивалентные проводимости

прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\underline{Y}_{s1} = \underline{Y}_{s2} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A (a - a^2) + \underline{U}_B \underline{Y}_B (a^2 - 1) + \underline{U}_C \underline{Y}_C (1 - a)}{(\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{n1}) \cdot (2a + a^4 - 3a^2)} = 1,415 \cdot e^{-i79,15}, \quad (29)$$

$$\underline{Y}_{s0} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A (a^2 - a^4) + \underline{U}_B \underline{Y}_B (a^2 - a) + \underline{U}_C \underline{Y}_C (a^2 - a)}{\underline{U}_{n0} \cdot (2a + a^4 - 3a^2)} = 0,12 \cdot e^{-i107,93}.$$

И далее определяем параметры СУ, то есть его проводимости соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{\underline{Z}'_{s1} + \underline{Z}'_{T1} + \underline{Z}_{s1}} = 1,1152 \cdot e^{-i36,1826} = 1,5175 - i1,1099, \quad (30)$$

$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2$$

$$\underline{Y}_0 = \frac{1}{\underline{Z}_0} = \frac{1}{\underline{Z}'_{T0} + \underline{Z}_{s0}} = 0,3076 \cdot e^{-i42,5938} = 0,2264 - i0,2082;$$

$$\underline{Y}_{cy1} = \underline{Y}_{cy2} = \underline{Y}_{s1} - \underline{Y}_1 - \underline{Y}_{s1} = 1,352 \cdot e^{-i164,22} \text{ Ом};$$

$$\underline{Y}_{cy0} = \underline{Y}_{s0} - \underline{Y}_0 = 0,28 \cdot e^{i160,40} \text{ Ом}. \quad (31)$$

### Выводы

1. Для определения параметров СУ необходимо предварительно произвести измерение (либо расчет) показателей несимметрии токов и напряжений в исследуемой электрической сети.

2. Зная параметры электрической сети и результаты измерения показателей несимметрии, по выражениям (19) определяют параметры СУ.

3. Представленный пример расчёта коррелирует с данными предыдущих исследований [1].

### Литература

1. Наумов И.В. Способы и технические средства снижения несимметрии токов и потерь электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ: дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛСХИ, 1989. – 277 с.
2. Наумов И.В., Пруткина А.В. Выбор параметров симметрирующего устройства в зависимости от изменяющихся показателей несимметрии в распределительных сетях 0,38 кВ с сосредоточенной нагрузкой // Вестн. КрасГАУ. – 2014. – № 11. – С. 186–195.
3. Наумов И.В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств: дис. ... д-ра техн. наук. – Иркутск, 2002. – 387 с.

### Literatura

1. Naumov I.V. Spособы i tehicheskie sredstva snizhenija nesimmetrii tokov i poter' jelektricheskoi jenergii v sel'skih raspredelitel'nyh setjah 0,38 kV: dis. ... kand. tehn. nauk. – L.: Izd-vo LSHI, 1989. – 277 s.
2. Naumov I.V., Prutkina A.V. Vybora parametrov simmetrirujushhego ustrojstva v zavisimosti ot izmenjajushhihsja pokazatelej nesimmetrii v raspredelitel'nyh setjah 0,38 kV s sosredotochennoj nagruzkoi // Vestn. KrasGAU. – 2014. – № 11. – S. 186–195.
3. Naumov I.V. Snizhenie poter' i povyshenie kachestva jelektricheskoi jenergii v sel'skih raspredelitel'nyh setjah 0,38 kV s pomoshh'ju simmetrirujushhih ustrojstv: dis. ... d-ra tehn. nauk. – Irkutsk, 2002. – 387 s.