



А. В. Черепанов, В. А. Тихомиров, А. П. Куцкий

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация  
Дата поступления: 30 ноября 2017 г.

## ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

**Аннотация.** Экономический ущерб от пониженного качества электроэнергии состоит из технологической и электромагнитной составляющих. Первая связана с тем, что пониженное качество может приводить к нарушению сложных технологических процессов, снижению качества выпускаемой продукции, уменьшению производительности рабочих механизмов. Электромагнитная составляющая определяется возрастанием потерь электроэнергии, снижением надежности электропитания и уменьшением достоверности учета электроэнергии. Поэтому задача количественного определения влияния показателей качества на энергоэффективность систем электропитания имеет несомненную актуальность.

В статье представлены результаты компьютерного моделирования, направленного на определение влияния несимметрии напряжений трехфазной системы на величину потерь мощности в электрической сети. Приведен анализ негативных эффектов, вызываемых искажениями качества электроэнергии. В отличие от большого числа работ, в которых такой анализ выполнялся на основе упрощенных аналитических соотношений, авторы использовали более адекватный подход, основанный на моделировании несимметричных режимов в фазных координатах.

Показано, что величина дополнительных потерь зависит от способа создания несимметрии и режима узла нагрузки. При наличии внешней несимметрии, создаваемой резистивной нагрузкой, зависимость потерь от коэффициента несимметрии по обратной последовательности близка к линейной. Если несимметрия создается различными нагрузками по фазам, то эта зависимость становится близкой к квадратичной.

Дополнительные потери в трансформаторе при больших уровнях несимметрии могут достигать 15-20 % от величины паспортных потерь в меди. Дополнительные потери обратно пропорциональны напряжению короткого замыкания трансформатора.

**Ключевые слова:** системы электропитания, несимметрия напряжений, энергоэффективность, моделирование на основе фазных координат.

A. V. Cherepanov, V. A. Tikhomirov, A. P. Kutsiy

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation  
Received: November 30, 2017

## INFLUENCE OF THE TENSION ASYMMETRY ON ENERGY EFFICIENCY

**Abstract.** The economic damage from the lowered quality of the electric power includes technological and electromagnetic components. The first one is due to the fact that the lowered quality can lead to violation of complex technological processes, decline in the quality of products, reduction of the productivity of working mechanisms. The electromagnetic component is defined by increase of losses of the electric power, decrease in reliability of power supply and reduction of reliability of the accounting of the electric power. Therefore, the problem of quantitative definition of influence of indicators of quality on energy efficiency of systems of power supply has an undoubted relevance.

Results of the computer modeling aimed to define the influence of asymmetry of tension of the three-phase system on a size of losses of power in electric network are presented in article.

The analysis of the negative effects caused by distortions of quality of the electric power is provided. Unlike many works in which such analysis was made on the basis of the simplified analytical ratios, the authors used the more adequate approach based on the modeling of the asymmetrical modes in phase coordinates.

It is shown that the size of additional losses depends on a way of creating asymmetry and a mode of the loading node. With the external asymmetry created by resistive loading, dependence of losses on asymmetry coefficient on the return sequence is close to linear. If the asymmetry is created by various loadings on phases, then this dependence becomes close to square one.

Additional losses in the transformer at big levels of asymmetry can reach 15 ... 20% of the size of rated losses in copper.

The additional losses are inversely proportional to tension of short circuit of the transformer.

**Keywords:** systems of power supply, asymmetry of tension, energy efficiency, modeling on the basis of phase coordinates.

### Введение

Основная функция системы электропитания (ЭС) состоит в надежном обеспечении потребителей электроэнергией (ЭЭ), показатели качества которой лежат в нормативных пределах. Искажение качества ЭЭ может приводить к снижению надежности электропитания. Экономический

ущерб от пониженного качества ЭЭ состоит из технологической и электромагнитной составляющих [1-3].

Технологическая составляющая связана с тем, что пониженное КЭ может приводить к нарушению сложных технологических процессов, снижению качества выпускаемой продукции,



уменьшению производительности рабочих механизмов. Электромагнитная составляющая определяется следующими факторами:

- возрастанием потерь ЭЭ;
- снижением надежности электроснабжения;
- уменьшением достоверности учета электроэнергии.

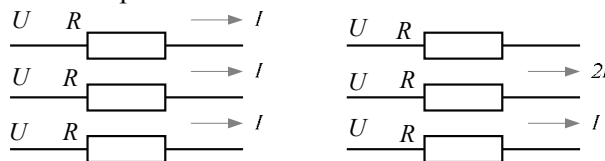
Таким образом, показатели качества электроэнергии непосредственно влияют на энергоэффективность, определяемую в системах электроснабжения уровнем потерь ЭЭ. Поэтому задача количественного определения влияния показателей качества на энергоэффективность систем электроснабжения имеет несомненную актуальность. Наиболее важна сформулированная задача в системах электроснабжения железных дорог, отличающихся значительными уровнями несимметрии и гармонических искажений [4, 5].

Ниже представлены результаты компьютерного моделирования, направленного на определение влияния несимметрии напряжений трехфазной системы на величину потерь мощности в электрической сети. Приведен анализ негативных эффектов, вызываемых искажениями качества электроэнергии. В отличие от большого числа работ, например [6-10], в которых такой анализ выполнялся на основе упрощенных аналитических соотношений, авторы использовали более адекватный подход, основанный на моделировании несимметричных режимов в фазных координатах [11-22].

**Методика и результаты моделирования**

Наличие несимметрии токов и напряжений в

трехфазной системе приводит к появлению дополнительных потерь мощности. Данный факт может быть проиллюстрирован на примере схемы, показанной на рис. 1.

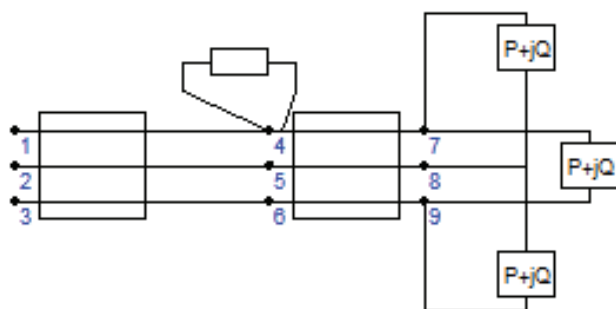


**Рис. 1. Схема простой сети**

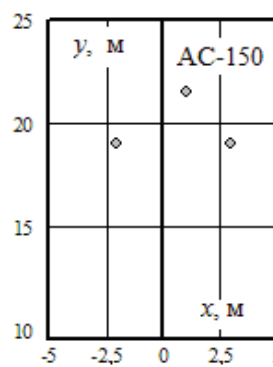
При одинаковой передаваемой мощности потери в симметричном режиме равны  $3I^2R$ , а в несимметричном  $5I^2R$ , т. е. имеет место рост на 67 %. Таким образом, несимметрия токов может приводить к заметному снижению энергоэффективности передачи электроэнергии.

Для оценки влияния несимметрии напряжений на потери мощности в ЛЭП проведено моделирование режимов сети 110 кВ с проводами АС-150, расчетная схема которой показана на рис. 2. Длина левой ЛЭП равнялась 10 км, правой – 50 км. На приемном конце электропередачи подключены одинаковые нагрузки между фазами  $10 + 5j$  МВ·А. Расположение проводов ЛЭП показано на рис. 3. Несимметрия создавалась несимметричной нагрузкой в виде активного сопротивления, подключенного между фазами А и В на передающем конце правой воздушной линии.

Результаты моделирования на основе программного комплекса (ПК) Fazonord представлены в табл. 1 и 2 и проиллюстрированы на рис. 4 и 5.



**Рис. 2. Расчетная схема**



**Рис. 3. Координаты расположения проводов**

Т а б л и ц а 1

**Потери активной мощности**

| $k_{2U}, \%$ | $\Delta P, \text{кВт}$ | $\delta \Delta P, \text{кВт}$ | $\delta \Delta P, \%$ |
|--------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 0            | 1462,11                | 0,00                          | 0,00                  |
| 1,62         | 1487,75                | 25,64                         | 1,75                  |
| 3,21         | 1515,20                | 53,09                         | 3,63                  |
| 4,77         | 1544,34                | 82,23                         | 5,62                  |
| 6,75         | 1583,39                | 121,28                        | 8,30                  |
| 9,33         | 1639,75                | 177,64                        | 12,15                 |

Примечание:  $k_{2U}$  – коэффициент несимметрии по обратной последовательности;  $\Delta P$  – потери мощности;  $\delta \Delta P$  – приращение потерь мощности, вызванное наличием несимметрии.

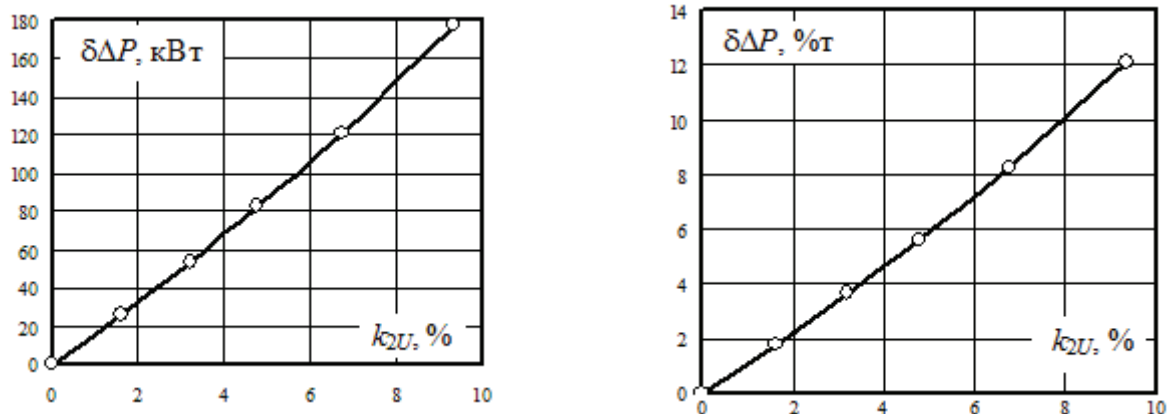


Рис. 4. Зависимость дополнительных потерь от  $k_{2U}$

Т а б л и ц а 2

Токи на приемном конце ЛЭП

| $k_{2U}, \%$           | 0    | 1,62 | 3,21 | 4,77 | 6,75 | 9,33 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $I_A, A$               | 187  | 189  | 191  | 192  | 195  | 199  |
| $I_B, A$               | 187  | 189  | 190  | 192  | 194  | 196  |
| $I_C, A$               | 187  | 189  | 191  | 193  | 195  | 199  |
| $D, A^2$               | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,14 | 0,59 | 2,24 |
| $\sigma, A$            | 0,00 | 0,04 | 0,17 | 0,38 | 0,77 | 1,50 |
| $I_{max} - I_{min}, A$ | 0    | 0,08 | 0,32 | 0,7  | 1,4  | 2,68 |

Примечание:  $I_A, I_B, I_C$  – токи фаз;  $D$  – дисперсия токов;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение.

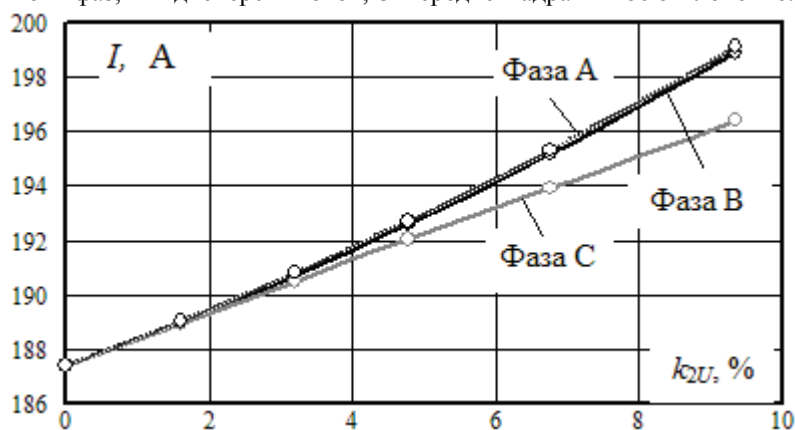


Рис. 5. Зависимость токов фаз от коэффициента несимметрии по обратной последовательности

Величина  $\delta\Delta P$  определялась так:

$$\delta\Delta P = \Delta P^{(as)} - \Delta P^{(s)},$$

где  $\Delta P^{(as)}$  – потери мощности при наличии несимметрии;  $\Delta P^{(s)}$  – потери мощности в симметричном режиме.

В реальных сетях изменение потерь активной мощности при вариациях уровня несимметрии может иметь более сложный характер. Для количественного анализа данного эффекта проведено моделирование режимов применительно к расчетной схеме сети 110 кВ, показанной на рис. 6, с параметрами, аналогичными схеме, приведенной на рис. 2. Отличие состоит в моделях нагрузки. В схеме, показанной на рис. 6, используются узловые нагрузки, что позволяет применять в расчетах

модели как в виде отборов мощности, так и в виде статических характеристик по напряжению.

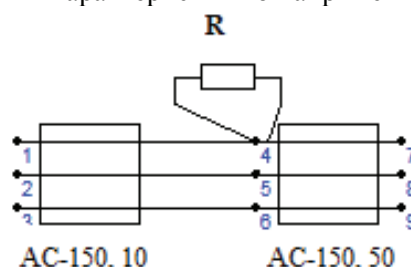


Рис. 6. Расчетная схема

Расчеты проводились для четырех вариантов. В первых двух создавалась внешняя несимметрия путем включения несимметричной активной нагрузки на отправном конце правой ЛЭП.



Нагрузка на приемном конце задавалась в виде неизменных отборов мощности и статических характеристик нагрузки (СХН). Результаты представлены в табл. 5 и 6. Во втором варианте резистор  $R$  отключался и несимметрия создавалась различными нагрузками по фазам на приемном конце электропередачи; при этом суммарная мощность нагрузок не изменялась. Результаты моделирования приведены в табл. 7 и 8. Сводка результатов выполнена в табл. 9.

Данные, представленные в табл. 3, проиллюстрированы на рис. 7–10. На основе этих результатов можно сделать вывод о том, что величина дополнительных потерь  $\delta\Delta P$  и характер зависимостей  $\delta\Delta P = \delta\Delta P(k_{2U})$  зависит от способа создания несимметрии и режима узла нагрузки. При наличии внешней несимметрии, создаваемой резистором  $R$ , зависимость  $\delta\Delta P = \delta\Delta P(k_{2U})$  близка к линейной. Если несимметрия создается различными нагрузками по фазам, то данная зависимость становится близкой к квадратичной. Наблюдается рост потерь при увеличении уровня несимметрии во всех вариантах, кроме второго, в котором нагрузка задавалась статическими характеристи-

ками, а несимметрия создавалась резистором, включенным между фазами А и В на отправном конце правой ЛЭП.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- при нагрузках, заданных неизменными отборами мощности, наличие несимметрии напряжений приводит к возникновению несимметрии токов (рис. 5), что, в свою очередь, вызывает увеличение потерь активной мощности;
- зависимость  $\delta\Delta P = \delta\Delta P(k_{2U})$  имеет характер, близкий к линейному.

Для более строгого выявления характера зависимостей дополнительных потерь от коэффициента несимметрии  $k_{2U}$  проведен регрессионный анализ, результаты которого представлены на рис. 11. Для случаев внешней несимметрии, создаваемой сопротивлением  $R$ , анализ проводился применительно к зависимостям  $\delta\Delta P = \delta\Delta P(k_{2U})$ , а для случаев несимметрии, возникающей из-за различных нагрузок по фазам, – применительно к зависимостям  $\delta\Delta P = \delta\Delta P(k_{2U}^2)$ .

Т а б л и ц а 3

Сводка результатов

| Внешняя несимметрия |                        |                              |                 |                        |                              | Несимметричная нагрузка |                        |                              |                 |                        |                              |
|---------------------|------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|
| СХН                 |                        |                              | Отборы мощности |                        |                              | СХН                     |                        |                              | Отборы мощности |                        |                              |
| $k_{2U}, \%$        | $\Delta P, \text{кВт}$ | $\delta\Delta P, \text{кВт}$ | $k_{2U}, \%$    | $\Delta P, \text{кВт}$ | $\Delta P_{(2)}, \text{кВт}$ | $k_{2U}, \%$            | $\Delta P, \text{кВт}$ | $\delta\Delta P, \text{кВт}$ | $k_{2U}, \%$    | $\Delta P, \text{кВт}$ | $\delta\Delta P, \text{кВт}$ |
| 0                   | 830                    | 0                            | 0               | 999                    | 0                            | 0                       | 830                    | 0                            | 0               | 1002                   | 0                            |
| 1,96                | 814,4                  | -15,6                        | 2,19            | 1027                   | 28                           | 0,84                    | 850                    | 20                           | 1,15            | 1063                   | 61                           |
| 4,27                | 797,2                  | -32,8                        | 4,8             | 1062                   | 63                           | 1,68                    | 910,6                  | 80,6                         | 2,3             | 1254                   | 252                          |
| 8,37                | 768,1                  | -61,9                        | 6,82            | 1097                   | 98                           | 4,18                    | 1330                   | 500                          | 6,32            | 3190                   | 2188                         |
| –                   | –                      | –                            | 9,48            | 1150                   | 151                          | –                       | –                      | –                            | –               | –                      | –                            |

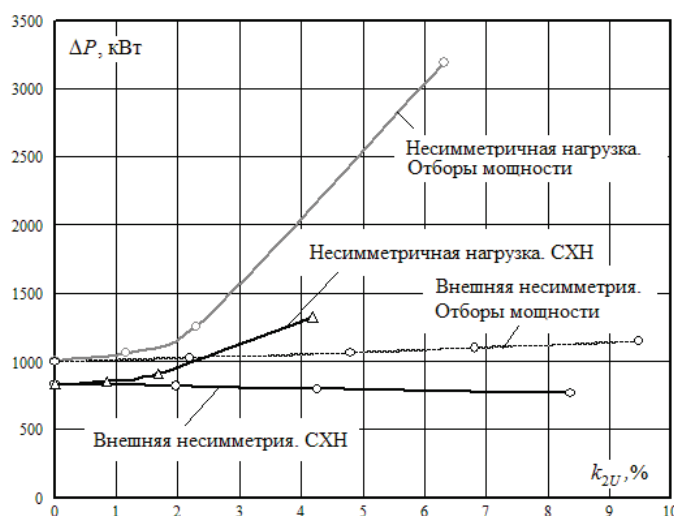


Рис. 7. Зависимости  $\Delta P = \Delta P(k_{2U})$  для различных условий моделирования

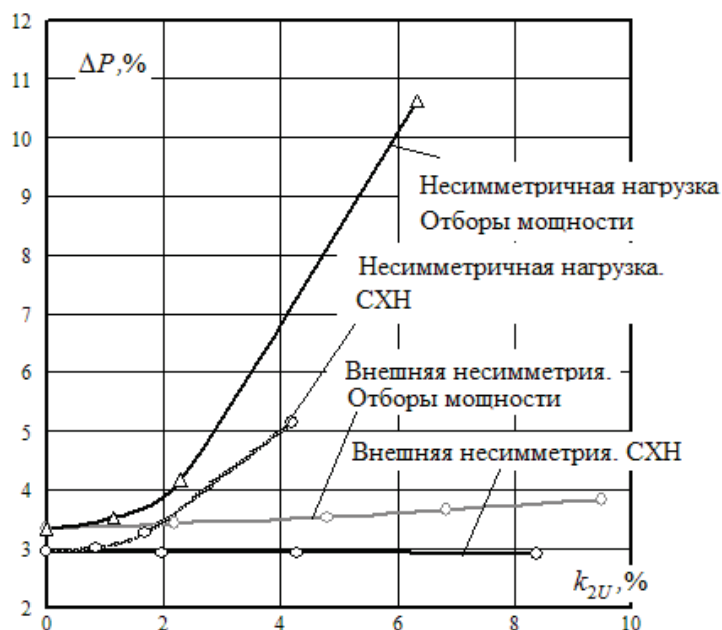


Рис. 8. Зависимости  $\Delta P = \Delta P(k_{2U})$  для различных условий моделирования

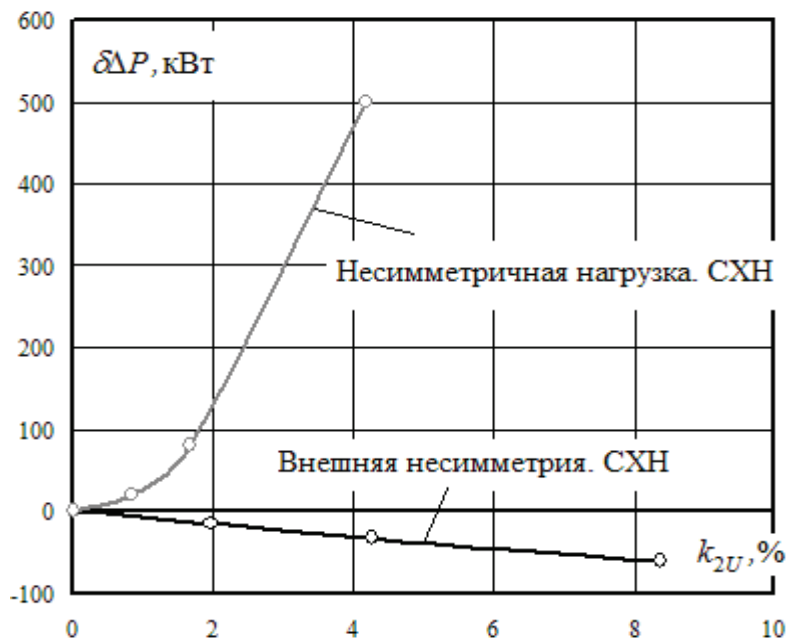


Рис. 9. Зависимость дополнительных потерь, вызванных несимметрией, от  $k_{2U}$



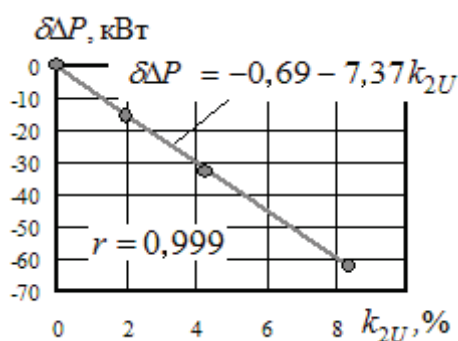
Рис. 10. Зависимость дополнительных потерь, вызванных несимметрией, от  $k_{2U}$



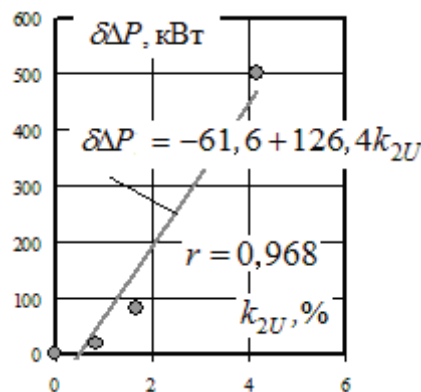
Нелинейные зависимости дополнительных потерь от коэффициента несимметрии представлены на рис. 12, 13.

Проверка адекватности регрессионного анализа проведена по критерию Фишера на основании условия  $F > F_{(0,05)}^T$ , где  $F$  – расчетное значение

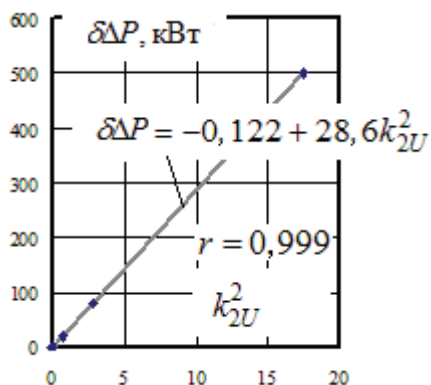
критерия;  $F_{(0,05)}^T$  – табличное значение при уровне значимости 5 %;  $\alpha_F$  – расчетное значение уровня значимости.



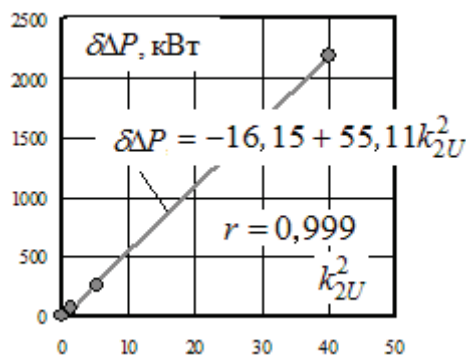
$F = 3174 > F_{(0,05)}^T = 19,1; \alpha_F = 0,0003$



$F = 29,9 > F_{(0,05)}^T = 19,1; \alpha_F = 0,0003$



$F = 13\,591\,935 > F_{(0,05)}^T = 19,1; \alpha_F = 7,36 \cdot 10^{-8}$



$F = 7886 > F_{(0,05)}^T = 19,1; \alpha_F = 0,00013$

Рис. 11. Линейный регрессионный анализ

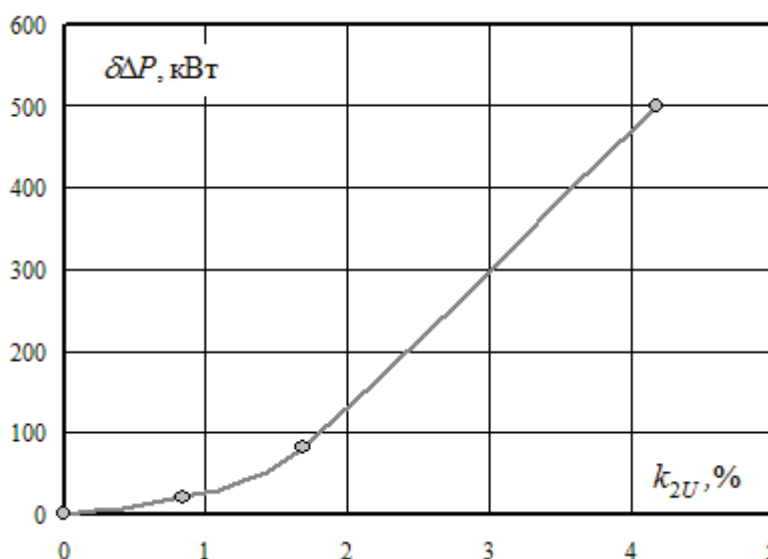


Рис. 12. Зависимость дополнительных потерь от коэффициента несимметрии по обратной последовательности. Несимметричная нагрузка, учет СХН

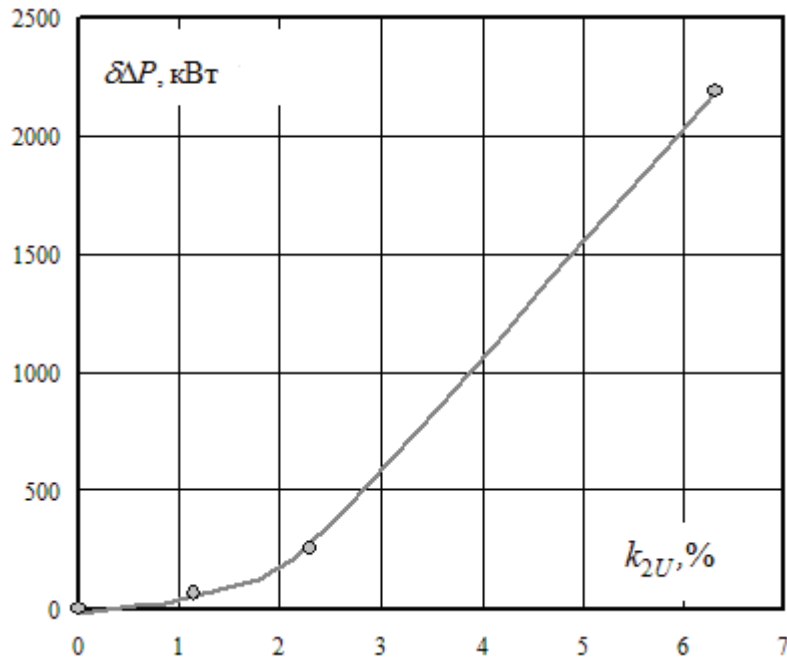


Рис. 13. Зависимость дополнительных потерь от коэффициента несимметрии по обратной последовательности. Несимметричная нагрузка, отборы мощности

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при наличии внешней несимметрии зависимость  $\delta\Delta P = \delta\Delta P(k_{2U})$  имеет линейный характер, а при несимметрии, создаваемой различными нагрузками по фазам, – квадратичный.

Представляет интерес получение аналитического выражения, связывающего дополнительные потери  $\delta\Delta P$  с коэффициентом несимметрии  $k_{2U}$ . Анализ проводится применительно к ЛЭП, подключенной к источнику симметричного напряжения. Несимметрия создается нагрузками на приемном конце.

Дополнительные потери от несимметрии можно определить так:

$$\Delta P_{(2)} = \Delta P_{(1)} k_{2U}^2 = \Delta P_{(1)} \frac{I_2^2}{I_1^2}.$$

Модуль тока обратной последовательности можно найти из приближенного соотношения

$$U_2 \approx I_2 Z,$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ , модуль сопротивления прямой последовательности ЛЭП.

Тогда

$$\Delta P_{(2)} \approx \Delta P_{(1)} \frac{U_1^2 U_2^2}{U_1^2 Z^2 I_1^2} = \Delta P_{(1)} \frac{U_1^2 k_{2U}^2}{Z^2 I_1^2}.$$

Потери от токов прямой последовательности можно записать следующей формулой:

$$\Delta P_{(1)} = 3I_1^2 R.$$

Тогда

$$\Delta P_{(2)} \approx 3I_1^2 R \frac{U_1^2 k_{2U}^2}{Z^2 I_1^2} = \frac{3U_1^2 k_{2U}^2 R}{Z^2} \approx \frac{3U_{F.HOM}^2 k_{2U}^2 R}{Z^2}.$$

Окончательно

$$\Delta P_{(2)} \approx \frac{3U_{F.HOM}^2 k_{2U}^2 R}{Z^2}. \quad (1)$$

Проверка проведена на основе сопоставительных расчетов с помощью ПК Fazonord. Результаты показаны в табл. 4 и проиллюстрированы на рис. 14.

Т а б л и ц а 4

Результаты расчета дополнительных потерь активной мощности

| $k_{2U}, \%$ | $\delta\Delta P, \text{кВт}$ |                       | Различие, % |
|--------------|------------------------------|-----------------------|-------------|
|              | ПК Fazonord                  | Расчет по формуле (1) |             |
| 0,00         | 0,00                         | 0,00                  | 0,00        |
| 2,32         | 138,0                        | 131,4                 | 4,82        |
| 3,92         | 395,0                        | 375,0                 | 5,07        |
| 7,08         | 1281                         | 1223                  | 4,51        |



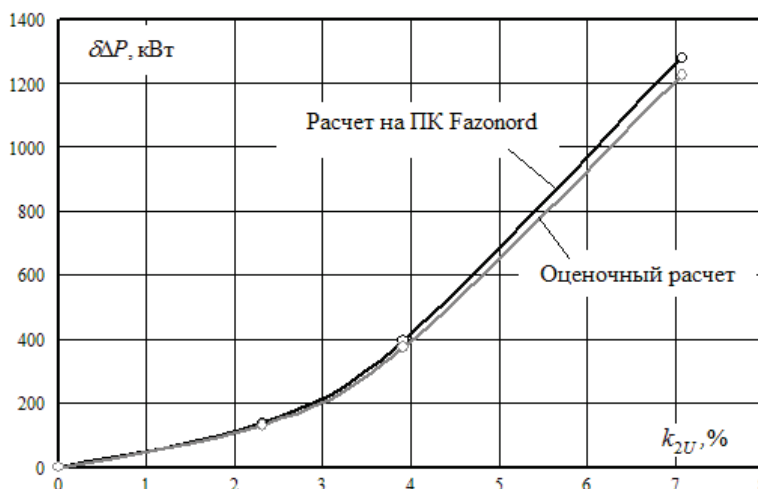


Рис. 14. Зависимость дополнительных потерь от коэффициента несимметрии по обратной последовательности

Дополнительные потери активной мощности в трансформаторах при несимметрии режима можно определить по следующей формуле [1]:

$$\Delta P_{(2)} = \frac{\Delta P_k}{U_k^2} k_{2U}^2, \quad (2)$$

где  $\Delta P_k$  – потери короткого замыкания;  $k_{2U}$  – ко-

эффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %;  $U_k$  – напряжение короткого замыкания, %; дополнительные потери XX, обусловленные несимметрией, в практических расчетах можно не учитывать.

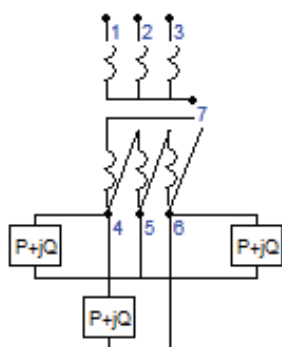


Рис. 15. Расчетная схема

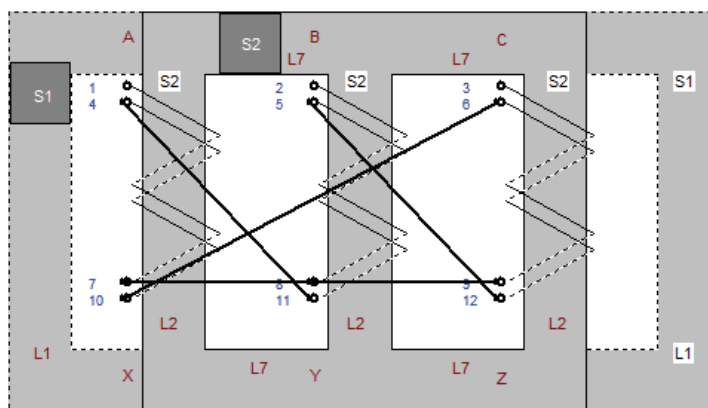


Рис. 16. Схема модели трансформатора

Для проверки точности формулы (2) проведено моделирование режимов работы трансформатора на основе ПК Fazonord применительно к схеме, представленной на рис. 15. Схема модели трансформатора, сформированная средствами редактора элементов ПК Fazonord, показана на рис. 16. Моделировался трансформатор ТДН-10 000-115/10 с параметрами:  $S_H = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_k = 10,5 \%$ ;  $\Delta P_k = 60 \text{ кВт}$ ;  $\Delta P_x = 15,5 \text{ кВт}$ ;  $I_x = 0,7 \%$ . Результаты моделирования и расчета по формуле (1) приведены в табл. 5 и на рис. 17.

Таблица 5  
Дополнительные потери в трансформаторе от несимметрии

| $k_{2U}, \%$ | Расчет в ПК Fazonord |                       | Аналитический расчет |
|--------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
|              | Суммарные потери     | Дополнительные потери |                      |
| 0,00         | 44,31                | 0,00                  | 0,00                 |
| 2,25         | 47,07                | 2,76                  | 2,76                 |
| 4,61         | 55,88                | 11,57                 | 11,57                |

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- дополнительные потери, вызываемые





несимметрией с  $k_{2U} = 4 \%$ , составляют 15 % от паспортных потерь в меди;

– для предварительной оценки дополнительных потерь в трансформаторе от несимметрии можно использовать формулу (1).

В сложной СЭС дополнительные потери в трансформаторах от несимметрии, так же как и аналогичный параметр в ЛЭП, определяются целым рядом факторов, что ограничивает применение формулы (2).

При расчете дополнительных потерь активной мощности в асинхронных электродвигателях, П, обусловленных несимметрией напряжений, принимают допущение о том, что они пропорциональны потерям в обмотке статора при номинальном токе и не зависят от нагрузки двигателя [1]:

$$\Delta P_{AED} = 2.41 k_p^2 k_{2U}^2 \Delta P_1, \quad (3)$$

где  $k_p$  – кратность пускового тока при номинальном напряжении;  $\Delta P_1$  – потери в обмотке статора при номинальном токе. На рис. 18 показана зависимость  $\delta \Delta P_{AED} = 2,41 k_p^2 k_{2U}^2$ , построенная для  $k_p = 7$  и показывающая актуальность учета  $\delta \Delta P_{AED}$ .

Для проверки точности определения  $\delta \Delta P_{AED}$  с помощью формулы (2) проведено моделирование режима АЭД на основе комплекса программ Fazonord, результаты которого приведены в табл. 6 и на рис. 18. Полученные результаты показывают, что формула (3) вполне применима для предварительной оценки величины  $\delta \Delta P_{AED}$ .

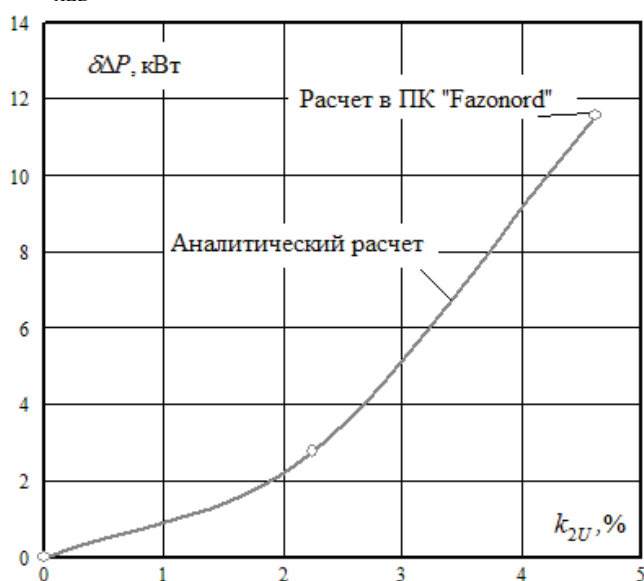


Рис. 17. Дополнительные потери в трансформаторе от несимметрии

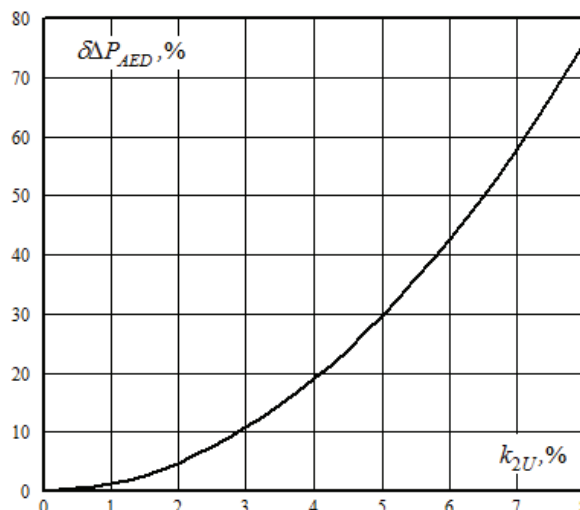


Рис. 18. Зависимость  $\delta \Delta P_{AED} = f(k_{2U})$

Т а б л и ц а 6  
Сравнение результатов моделирования и расчета по формуле (18)

| $k_{2U}, \%$ | $\Delta P, \text{кВт}$ |                       | Различие, % |
|--------------|------------------------|-----------------------|-------------|
|              | Fazonord               | Расчет по формуле (2) |             |
| 0            | 2,40                   | 2,40                  | 0,00        |
| 1,58         | 2,54                   | 2,47                  | 2,57        |
| 1,97         | 2,58                   | 2,51                  | 2,83        |
| 3,13         | 2,75                   | 2,68                  | 2,60        |
| 7,59         | 3,75                   | 4,03                  | 7,42        |

**Выводы**

1. Экономический ущерб от пониженного качества электроэнергии состоит из технологической и электромагнитной составляющих. Первая связана с тем, что пониженное КЭ может привести к нарушению сложных технологических процессов, снижению качества выпускаемой продукции, уменьшению производительности рабочих механизмов. Электромагнитная составляющая определяется возрастанием потерь электроэнергии, снижением надежности электроснабжения и уменьшением достоверности учета электроэнергии.

2. Величина дополнительных потерь мощности зависит от способа создания несимметрии и режима узла нагрузки. При наличии внешней несимметрии, создаваемой резистивной нагрузкой, зависимость потерь от коэффициента несимметрии по обратной последовательности близка к линейной. Если несимметрия создается различными нагрузками по фазам, то эта зависимость становится близкой к квадратичной.

3. Дополнительные потери в трансформаторе при больших уровнях несимметрии могут достигать 15...20 % от величины паспортных потерь в меди. Дополнительные потери обратно пропорциональны напряжению КЗ трансформатора.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В. Влияние качества электроэнергии на сокращение срока службы и снижение надежности электрооборудования // *Электрика*. № 3. 2008. С. 14–20.
2. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: Издательство ИрННТУ, 2015. 218 с. ISBN 978-5-8038-1011-7.
3. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Управление качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: Ир-ГУПС, 2015, 180 с.
4. Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Принципы построения систем электроснабжения железных дорог. М.: Теплотехник, 2014. 166 с.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения 2х25 кВ с коаксиальными кабелями и трансформаторами Вудбриджа // *Известия Транссиба*. 2016. № 2(26). С. 70–78.
6. Карташов И.И., Зуев Э.Н. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. М.: МЭИ, 2000. 120 с.
7. Кузнецов В.Г., Куренной Э.Г., Лютый А.П. Электро-магнитная совместимость: несимметрия и несинусоидальность напряжения. Донецк: Донбасс, 2005. 249 с.
8. Курбацкий В.Г. Качество электроэнергии и электро-магнитная совместимость в электрических сетях. Братск: БрГУ, 1999. 220 с.
9. Савина Н.В. Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях. Новосибирск.: Наука, 2008. 228 с.
10. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев: Наукова думка, 1985. 268 с.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 с.
12. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 170 с.
13. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения железных дорог / Е.А. Алексеенко, Ю.Н. Булатов, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков / Под ред. А.В. Крюкова. Иркутск: ИрГУПС, 2016. 170 с.
14. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Системный подход к моделированию многоамперных шинопроводов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2008. № 4 (20). С. 68–73.
15. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Соколов В.Ю. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами. Иркутск: ИрГУПС, 2010. 80 с.
16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование многопроводных систем с одножильными экранированными кабелями // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2007. № 16. С. 63–66.
17. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Литвинцев А.И. Интервальный метод расчета режимов электроэнергетических систем в фазных координатах // *Системы. Методы. Технологии*. 2011. № 9. С. 54–61.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Моделирование многоамперных шинопроводов // *Проблемы энергетики*. 2009. № 3–4. С. 65.
19. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Токораспределение в проводах линий электропередачи с расщепленными проводами // *Проблемы энергетики*. 2010. № 1–2. С. 54.
20. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Моделирование и параметрическая идентификация узлов нагрузки электроэнергетических систем. Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2016. 158 с.
21. Алексеенко Е.А., Булатов Ю.Н., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения железных дорог / Под ред. А.В. Крюкова: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2016. 170 с.
22. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2016. 164 с.

## REFERENCES

1. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L., Gorpnich A.V. Vliyanie kachestva elektroenergii na sokrashchenie sroka sluzhby i snizhenie nadezhnosti elektrooborudovaniya [Influence of quality of the electric power on reduction of service life and decrease in reliability of an electric equipment]. *Elektrika [Electrical engineering]*, No. 3, 2008, pp. 14–20.
2. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intellectual'nye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii [Intelligent technologies of power quality management]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2015, 218 p. ISBN 978-5-8038-1011-7.
3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Upravlenie kachestvom elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Electricity quality management in power supply systems of railways]. Irkutsk: ISTU Publ., 2015, 180 p.
4. Bardushko V.D., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Printsipy postroeniya sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Principles of construction of power supply systems for railways]. Moscow: Teplotekhnik Publ., 2014, 166 p.
5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya 2kh25 kV s koaksial'nymi kabelyami i transformatorami Vudbridzha [Modeling of 2x25 kV traction power systems with coaxial cables and Woodbridge transformers]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2016, No. 2(26), p. 70–78.
6. Kartashov I.I., Zuev E.N. Kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya. Spособы ego kontrolya i obespecheniya [The quality of electricity in power supply systems. The methods of its control and maintenance]. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 2000, 120 p.
7. Kuznetsov V.G., Kurennoi E.G., Lyutyi A.P. Elektro-magnitnaya sovmestimost': nesimmetriya i nesinusoidal'nost' napryazheniya [Electromagnetic compatibility: asymmetry and nonsinusoidal tension]. Donetsk: Donbass Publ., 2005, 249 p.



8. Kurbatskii V.G. Kachestvo elektroenergii i elektro-magnitnaya sovmestimost' v elektricheskikh setyakh [The quality of electricity and electro-magnetic compatibility in electrical networks]. Bratsk: BrSU Publ., 1999, 220 p.
9. Savina N.V. Sistemnyi analiz poter' elektroenergii v elektricheskikh raspredelitel'nykh setyakh [System analysis of power losses in electrical distribution networks]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2008, 228 p.
10. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh [Improving the quality of energy in electrical networks]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1985, 268 p.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkut. un-ty Publ., 2005, 273 p.
12. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods of joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: ISTU Publ., 2011, 170 p.
13. Alekseenko E.A., Bulatov Yu.N., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie avariinykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Modeling of emergency modes in power supply systems of railways]. In: A.V. Kryukov (ed.). Irkutsk: ISTU Publ., 2016, 170 p.
14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. Sistemnyi podkhod k modelirovaniyu mnogoampemykh shinoprovodov [The system approach to the modeling of multi-ampere busbars]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2008, No. 4 (20), pp. 68–73.
15. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Sokolov V.Yu. Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya s moshchnymi tokoprovodami [Modeling of power supply systems with high-power current leads]. Irkutsk: ISTU Publ., 2010, 80 p.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie mnogoprovodnykh sistem s odnozhil'nymi ekranirovannymi kabelyami [Modeling of multi-wire systems with single-core shielded cables]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2007, No. 16, pp. 63-66.
17. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Litvintsev A.I. Interval'nyi metod rascheta rezhimov elektroenergeticheskikh sistem v faznykh koordinatakh [Interval method for calculating the regimes of electric power systems in phase coordinates]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2011, No. 9, pp. 54-61.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. Modelirovanie mnogoampemykh shinoprovodov [Modeling of multi-ampere busbars]. *Problemy energetiki [Issues of power engineering]*, 2009, No. 3-4, p. 65.
19. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Tokoraspredelenie v provodakh linii elektroperedachi s rasshcheplyennymi provodami [Current distribution in wires of power transmission lines with split wires]. *Problemy energetiki [Issues of power engineering]*, 2010, No. 1-2, pp. 54.
20. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Le Kong Zan'. Modelirovanie i parametricheskaya identifikatsiya uzlov nagruzki elektroenergeticheskikh sistem [Modeling and parametric identification of load nodes of electric energy systems]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2016, 158 p.
21. Alekseenko E.A., Bulatov Yu.N., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie avariinykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog / Pod red. A.V. Kryukova: monografiya [Modeling of emergency modes in electrical supply systems of railways. In: A.V. Kryukov (ed.): a monograph]. Irkutsk: ISTU Publ., 2016, 170 p.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh simmetriyushchimi transformatorami: monografiya [Modeling of traction power supply systems equipped with symmetrizing transformers: a monograph]. Irkutsk: ISTU Publ., 2016, 164 p.

### Информация об авторах

Черепанов Александр Валерьевич - к. т. н., Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: santela89@mail.ru

Тихомиров Владимир Александрович - к. т. н., Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: svat\_irk@mail.ru

Куцый Антон Павлович - аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tosha1993irc@yandex.ru

### Authors

Alexander Valerievich Cherepanov – Ph.D. in Engineering Science, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sante-la89@mail.ru

Vladimir Alexandrovich Tikhomirov – Ph.D. in Engineering Science, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: svat\_irk@mail.ru

Anton Pavlovich Kutsiy – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tosha1993irc@yandex.ru

### Для цитирования

Черепанов А. В. Влияние несимметрии напряжений на энергоэффективность / А. В. Черепанов, В. А. Тихомиров, А. П. Куцый // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2017. — Т. 56, № 4. — С. 207–217. — DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).207-217.

### For citation

Cherepanov A.V. Tikhomirov V.A., Kutsiy A.P. Vliyanie nesimmetrii napryazhenii na energoeffektivnost' [Influence of the tension asymmetry on energy efficiency]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2017, Vol. 56, No. 4, pp. 207-217. DOI: 10.26731 / 1813-9108.2017.4 (56) .207-217.