

DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-12-20

УДК 621.31
ББК 31.27-01

А.И. АНТОНОВ, Д.Ю. РУДИ, А.А. РУППЕЛЬ, Е.Ю. РУППЕЛЬ

УЧЁТ КРИТЕРИЯ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ НА ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ 10 кВ ДЛЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УМЕНЬШЕНИЮ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Ключевые слова: качество электрической энергии, электромагнитная помеха, несимметрия напряжений, электромагнитная обстановка, электротермические установки.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество электрооборудования, являющегося источником несимметричных режимов работы в электрических сетях среднего и низкого напряжения. Данное электрооборудование может создавать в электрических сетях кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности. При изучении методологической базы исследований теории кондуктивных низкочастотных помех выяснено, что при переходе от одной смежной электрической сети в другую (например, от сети 0,4 кВ в сеть 10 кВ и наоборот) уменьшается вероятность появления кондуктивной низкочастотной помехи, т.е. помеха частично подавляется на определенную величину. Эта величина называется коэффициентом, определяющим изменения значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности при переходе кондуктивной низкочастотной ЭМП в смежную сеть. Целью исследования является разработка математической модели для изучения параметров сети, влияющих на несимметрию напряжений по обратной последовательности, которая сводится к методике определения критерия влияния несимметричной нагрузки на искажение напряжения в сети 10 кВ для рекомендаций по уменьшению несимметрии напряжений. В статье подробно описывается способ расчёта данной величины и то, каким образом её можно использовать для формирования рекомендаций по снижению несимметрии напряжения. Получена эмпирическая математическая модель, определяющая критерий влияния несимметричной нагрузки в сети низкого напряжения, воздействие на которую позволяет улучшить электромагнитную обстановку в электрической сети 10 кВ. Данный параметр можно учитывать при проектировании элементов электрических сетей для определения электромагнитной обстановки.

Развитие предпринимательства в России привело к появлению предприятий металлоизделий со своими металлургическими производствами, имеющими электротермические установки 0,4 кВ. Сложившаяся тенденция развития этих предприятий обусловила усиление влияния искажающей нагрузки на сети 6–35 кВ общего назначения: нарушаются требования ГОСТ 32144-2013 к качеству электрической энергии по несимметрии напряжений, появляются электромагнитные помехи (ЭМП), которые переходят из сети 0,4 кВ в сети среднего напряжения. Поэтому существует необходимость в разработке математической модели для исследования параметров сети, влияющих на несимметрию напряжений по обратной последовательности. На объекте исследования источником несимметричных режимов являются 4 двухфазные дуговые сталеплавильные печи мощностью 170 кВ·А каждая, функционирующие в сети 0,4 кВ. Эти электротермические установки являются источниками (акцепторами)

кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП) по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U}(\delta K_{2U})$ [6]. Рецепторами (приёмником помех) являются электрические сети 10 кВ, куда переходит кондуктивная низкочастотная ЭМП из сети низкого напряжения, где расположены акцепторы этих помех. Механизм перехода данной помехи от одной смежной сети в другую на объекте исследования представлен на рис. 1.

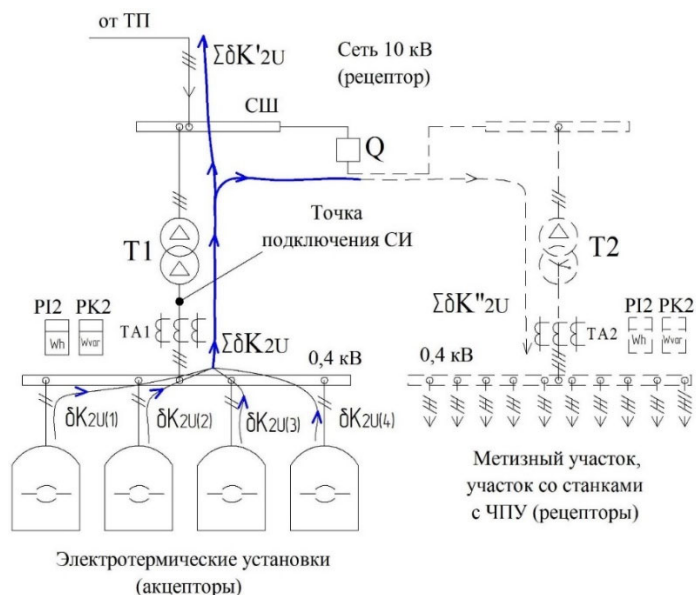


Рис. 1. Механизм влияния источника δK_{2U} на электрическую сеть

Значение кондуктивной низкочастотной ЭМП, распространяющейся по проводам электрической сети, остаётся неизменной величиной (const), однако при переходе через какой-либо элемент электрической сети может менять своё значение [9]. Основным элементом электрической сети, при переходе через который кондуктивная низкочастотная ЭМП по K_{2U} изменяет своё значение, в большей степени является силовой трансформатор [10]. На объекте исследования применяется силовой понижающий трансформатор ТМЗ 1000-10/0,4.

Чтобы понять, как изменяет своё значение кондуктивная низкочастотная ЭМП по K_{2U} , построена имитационная модель объекта исследования (рис. 2).

В ходе исследований определено, что такие параметры, как мощность силового трансформатора и мощность нагрузки, являющейся источником несимметрии, влияют на величину K_{2U} . В общем случае можно записать [1, 8]

$$\left[K_{2U(0,4)}, K_{2U(10)} \right] = f(S_{\text{тр}}, S_{\text{нагр}}),$$

где $K_{2U(10)}$ – значение K_{2U} в сети 10 кВ; $K_{2U(0,4)}$ – значение K_{2U} в сети 0,4 кВ; $S_{\text{тр}}$ – мощность силового понижающего трансформатора; $S_{\text{нагр}}$ – мощность искажающей сеть нагрузки.

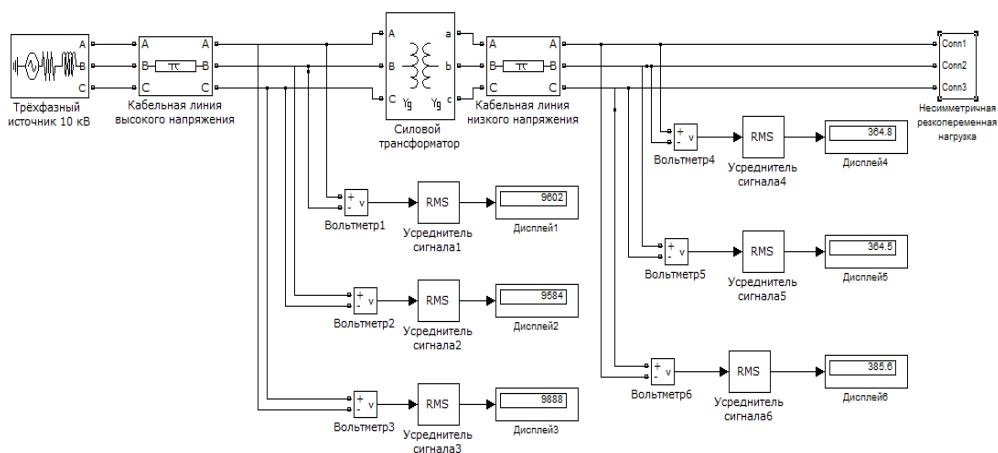


Рис. 2. Имитационная модель исследуемой сети объекта исследования с несимметричной нагрузкой

Иными словами, значения K_{2U} можно снизить, уменьшив мощность нагрузки или изменив мощность силового понижающего трансформатора. Однако уменьшать мощность нагрузки с технологической и эксплуатационной точки зрения нецелесообразно, так как это приведёт к снижению производительности. Поэтому в имитационной модели исследования изменяли мощность силового трансформатора [2]. Исходная мощность трансформатора составляет $1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, поэтому в имитационной модели вместо данного блока поочерёдно вводились блоки, имитирующие силовые трансформаторы мощностью $250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $630 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ и $2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ [5, 7]. При этом параметры остальных элементов электрической сети остались неизменными.

При запуске в работу имитационной модели при каждом силовом трансформаторе получены действующие значения линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{AC} , зная которые, можно вычислить значения K_{2U} (табл. 1).

Таблица 1

Значения K_{2U} в электрической сети при силовых трансформаторах различной мощности

Мощность трансформатора S , $\text{кВ} \cdot \text{А}$	0,4 кВ				10 кВ			
	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{AC} , В	K_{2U} , %	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{AC} , В	K_{2U} , %
2500	374	394	372	3,7	9642	9997	9556	2,8
1600	372	393	371	3,9	9655	9991	9588	2,6
1000	373	391	365	4,2	9668	9965	9614	2,3
630	365	389	362	4,7	9697	9947	9638	1,9
400	358	385	355	5,2	9727	9931	9671	1,6
250	345	377	342	6,3	9745	9894	9657	1,4

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что значения коэффициентов K_{2U} в сети 10 кВ меньше, чем в сети 0,4 кВ при трансформаторе любой мощности. Значит, кондуктивная низкочастотная ЭМП по K_{2U} при переходе

от сети 0,4 кВ в сеть 10 кВ уменьшает свои значения, т.е. в трансформаторе помеха частично подавляется на определённую величину [10]. Обозначим эту величину λ . Она является критерием перехода кондуктивной низкочастотной ЭМП по K_{2U} от сети 0,4 кВ в сеть 10 кВ и называется критерием влияния несимметричной нагрузки в низковольтной сети на искажение напряжения в сети среднего напряжения.

Поскольку величина λ по своей сути является некоторым коэффициентом, определяющим изменения значений K_{2U} при переходе кондуктивной низкочастотной ЭМП в смежную сеть, то справедливо записать следующее выражение [8]:

$$\lambda = \frac{K_{2U(10)}}{K_{2U(0,4)}}. \quad (1)$$

Согласно формуле (1) значение λ увеличивается при повышении мощности трансформатора: $\lambda = 0,222$ для трансформатора мощностью 250 кВ·А; $\lambda = 0,308$ для трансформатора мощностью 400 кВ·А; $\lambda = 0,404$ для трансформатора мощностью 630 кВ·А; $\lambda = 0,518$ для трансформатора мощностью 1000 кВ·А; $\lambda = 0,667$ для трансформатора мощностью 1600 кВ·А; $\lambda = 0,757$ при мощности 2500 кВ·А. Объяснить это можно тем, что у трансформаторов большей мощности меньше полное сопротивление Z [5]. На основе вычисления полного сопротивления каждого трансформатора построена зависимость величины λ от полного сопротивления Z (рис. 3).

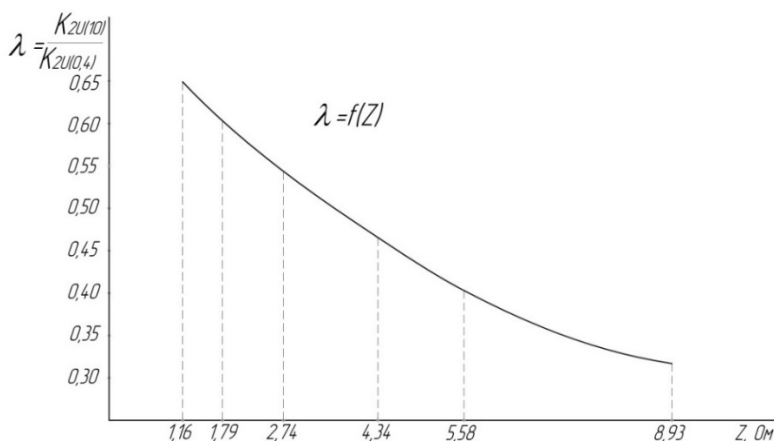


Рис. 3. Зависимость величины λ от полного сопротивления силового трансформатора

Данная зависимость $\lambda = f(Z)$ является нелинейной и, согласно теории определения эмпирических формул [3], описывается выражением

$$\lambda = ae^{bZ}.$$

Используя метод выравнивания эмпирических значений, получаем [3]

$$\lg \lambda = \lg a + \frac{b}{2,303} Z.$$

Зная величины λ и Z для каждого трансформатора мощностью 2500 кВ·А, 1600 кВ·А, 1000 кВ·А, 630 кВ·А, 400 кВ·А и 250 кВ·А, можно составить следующую систему уравнений

$$\begin{cases} -0,654 = \lg a + 3,878b; \\ -0,511 = \lg a + 2,423b; \\ -0,394 = \lg a + 1,884b; \\ -0,261 = \lg a + 1,189b; \\ -0,176 = \lg a + 0,777b; \\ -0,121 = \lg a + 0,504b. \end{cases} \quad (2)$$

Система (2) состоит из шести уравнений. Поэтому, согласно методике, описанной в [3. С. 710], можно разбить её на две отдельные системы уравнений (по три уравнения) и алгебраически просуммировать все слагаемые левых и правых частей данных трёх уравнений в каждой из полученных систем. После выполненных действий системы уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} -1,559 = 3\lg a + 8,185b; \\ -0,558 = 3\lg a + 2,47b. \end{cases} \quad (3)$$

Решая полученную систему уравнений (3) с двумя неизвестными, можно получить следующие значения коэффициентов a и b : $a = 0,908$; $b = -0,175$. При этом известно, что порядок группирования опытных данных лишь незначительно влияет на результаты вычислений [3. С. 712].

С учётом полученных коэффициентов эмпирическая математическая модель (3) примет вид

$$\lambda = 0,908e^{\frac{1}{0,175Z}}. \quad (4)$$

Для оценки погрешности полученной модели вычислим относительную погрешность Δ по следующей формуле [4]:

$$\Delta = \frac{|\lambda_{\text{э}} - \lambda_{\text{р}}|}{\lambda_{\text{э}}} \cdot 100\%,$$

где $\lambda_{\text{э}}$ – значения величины λ , полученные имитационной моделью в ходе экспериментальных исследований (эмпирически); $\lambda_{\text{р}}$ – значения величины λ , рассчитанные с помощью эмпирической математической модели (4).

Все полученные значения сведены в табл. 2.

Таким образом, среднее значение относительной погрешности, полученной эмпирической математической модели, составляет 4,5%.

Резюмируя вышеизложенное, можно заметить, что величина λ зависит от мощности силового понижающего трансформатора. Чем больше мощность силового трансформатора, тем больше величина критерия λ . И наоборот, при уменьшении мощности силового трансформатора (полное сопротивление его при этом увеличивается) значение величины λ снижается.

Таблица 2

Результаты вычислений относительной погрешности Δ
эмпирической математической модели

Величина λ , полученная эмпирически ($\lambda_э$)	Величина λ , полу- ченная по эмпири- ческой математи- ческой модели ($\lambda_р$)	Относительная погрешность эмпи- рической математи- ческой модели (Δ), %	Среднее значение относительной погрешности ($\Delta_{ср}$), %
0,222	0,191	13,5	4,5
0,308	0,325	5,5	
0,404	0,417	3,2	
0,548	0,556	1,4	
0,667	0,659	1,1	
0,757	0,739	2,3	

Таким образом, можно выделить важный аспект системного анализа процесса перехода кондуктивных низкочастотных ЭМП по K_{2U} из сети низкого напряжения в сеть среднего напряжения, согласно которому помеха, переходящая из одной смежной сети в другую (в нашем случае от сети 0,4 кВ в сеть 10 кВ), снижает своё значение в силовом трансформаторе на величину, соответствующую значению величины λ . Поэтому чем меньше величина λ , тем меньшее значение искажающей нагрузки передаётся в смежную сеть.

Критерий λ можно учитывать при составлении рекомендаций по уменьшении несимметрии напряжений. Это направление является наиболее целесообразным с практической точки зрения по сравнению с уменьшением нагрузки. Устранение источника δK_{2U} является достаточно затруднительным процессом, ведь для этого необходимо либо уменьшить мощность несимметричной нагрузки (электротермических установок, которые являются акцепторами помех), либо изменить их способ подключения (например, подключить каждую электротермическую установку на 3 фазы). Однако и первое, и второе техническое решение влечёт за собой снижение производительности, а изменение конструкции данных установок для изменения способа подключения приведёт ещё и к дополнительным экономическим затратам. Поэтому, если нет возможности устранения источника появления δK_{2U} , с помощью критерия λ можно управлять значениями δK_{2U} .

Снизить величину λ можно путем изменения параметров элементов электрической сети. В данном случае этим элементом является силовой понижающий трансформатор. Анализируя эмпирическую математическую моделью (4), можно предположить, что для уменьшения величины δK_{2U} при её переходе из сети 0,4 кВ в сеть 10 кВ необходимо снизить мощность трансформатора. При снижении мощности трансформатора со значения 1000 кВ·А до значения 630 кВ·А согласно шкале типовой мощности увеличивается значение полного сопротивления трансформатора Z в 1,6 раз (с 2,74 Ом до 4,34 Ом), а значение величины λ согласно эмпирической математической модели (4) уменьшается в 1,4 раза (со значения 0,548 до значения 0,404). Используя формулу (1), получаем значения $K_{2U(10)}$ при трансформаторе ТМЗ-1000 кВ·А

$$K_{2U(10)} = \lambda K_{2U(0,4)} = 0,548 \cdot 4,2 = 2,3\%$$

и при трансформаторе ТМЗ-630 кВ·А

$$K_{2U(10)} = \lambda K_{2U(0,4)} = 0,404 \cdot 4,2 = 1,7\%.$$

Выводы. Изменяя сопротивление элемента сети в обоснованных пределах, можно добиться снижения помехи δK_{2U} в сети 10 кВ до устранения искажения напряжений в этой сети, что влечёт за собой улучшение электромагнитной обстановки. Однако замена силового понижающего трансформатора на действующем предприятии является весьма трудоёмким процессом, техническая реализация данного мероприятия требует достаточно больших физических, экономических и эксплуатационных затрат. Поэтому учитывать критерий влияния несимметричной нагрузки в низковольтной сети на искажение напряжения в сети среднего напряжения наиболее целесообразно на стадии проектирования электрических сетей.

Литература

1. Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности / *А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, Д.А. Зубанов, Н.В. Зубанова и др.* // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 177–182.
2. *Антонов А.И.* Исследование уровня электромагнитных помех в сети 10/0,4 кВ с силовыми трансформаторами различной мощности при несимметричном характере нагрузки // Проблемы энергетики. 2017. № 9-10. С. 65–76.
3. *Батунер Л.М., Позин М.Е.* Математические методы в химической технике. Л.: Химия, 1971. 824 с.
4. *Борисов Р.К., Смирнов М.Н., Петров С.Р., Балашов В.В., Колечитский Е.С.* Методы и средства решения практических проблем электромагнитной совместимости на электростанциях и подстанциях // Электро. 2002. № 2. С. 44–52.
5. *Вишнягов М.Г., Иванова Ю.М., Сальников В.Г.* Параметры электромагнитной обстановки в сети с искажающей нагрузкой // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 2. С. 242–247.
6. *Иванова Е.В.* Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека. Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. транспорта, 2006. 432 с.
7. *Иванова Е.В., Рунпель, А.А.* Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях 6–10 кВ / под ред. В.П. Горелова. Омск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2004. 284 с.
8. Критерий влияния несимметричной нагрузки в низковольтной сети на искажение напряжения в сети среднего напряжения / *А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Е.В. Иванова и др.* // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 2. С. 249–253.
9. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения / *К.В. Хацевский, Ю.М. Денчик, В.И. Клеутин, Д.А. Зубанов и др.* // Омский научный вестник. 2012. № 2(110). С. 212–214.
10. *Сидоренко А.А.* Подавление кондуктивных электромагнитных помех в электрических сетях предприятий водного транспорта: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2006. 125 с.

АНТОНОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования, Омский институт водного транспорта, Россия, Омск (aleksandr_antonov_85@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0482-5080>).

РУДИ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ – аспирант кафедры электроэнергетических систем и электротехники, Сибирский государственный университет водного транспорта, Россия, Новосибирск (dima_rudi@mail.ru).

РУППЕЛЬ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования, Омский институт водного транспорта, Россия, Омск (ruppelsan@mail.ru).

РУППЕЛЬ ЕЛЕНА ЮРЬЕВНА – доцент кафедры физики и математики, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Россия, Омск.

Alexander I. ANTONOV, Dmitry Yu. RUDY,
Alexander A. RUPPEL, ELENA Yu. RUPPEL

CONSIDERATION OF THE CRITERION OF THE INFLUENCE
OF ASYMMETRIC LOAD ON VOLTAGE DISTORTION
IN A 10 KV NETWORK FOR RECOMMENDATIONS
FOR REDUCING VOLTAGE ASYMMETRY

Key words: quality of electrical energy, electromagnetic interference, voltage asymmetry, electromagnetic environment, electrothermal installations.

To date, there is a fairly large number of electrical equipment that is a source of asymmetric modes of operation in medium and low voltage electrical networks. This electrical equipment can create conductive low-frequency electromagnetic interference in electrical networks by the coefficient of voltage asymmetry in the reverse sequence. Studying the methodological basis of research on the theory of conductive low-frequency interference, it was found that when switching from one adjacent electrical network to another (for example, from a 0.4 kV network to a 10 kV network and vice versa) potential for conductive low-frequency interference decreases, i.e. the interference is partially suppressed by a certain amount. This amount is called the criterion determining the changes of the voltage asymmetry coefficient values in the reverse sequence in the transition of conductive low-frequency electromagnetic interference to the adjacent network. The purpose of this article is to develop a mathematical model for the study of network parameters affecting voltage asymmetry in the reverse sequence, which is reduced to a method for determining the value of the criterion for the effect of an asymmetric load on voltage distortion in a 10 kV network for recommendations for reducing voltage asymmetry. The article describes in detail the method of calculating this value and how it can be used to form recommendations for reducing voltage asymmetry. Scientific novelty of the study consists in the fact that an empirical mathematical model has been obtained that determines the criterion for the influence of an asymmetric load in a low-voltage network, the impact on which makes it possible to improve the electromagnetic situation in a 10 kV electrical network. This parameter can be taken into account when designing elements of electrical networks to determine the electromagnetic environment.

References

1. Antonov A.I., Denchik Yu.M., Zubanov D.A., Zubanova N.V. et al. *Algoritm opredeleniya konduktivnoi nizkochastotnoi elektromagnitnoi pomekhi po koeffitsientu nesimmetrii napryazhenii po obratnoi posledovatel'nosti* [Algorithm for determining conductive low-frequency electromagnetic interference by the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2018, no 1, pp. 177–182.
2. Antonov A.I. *Issledovanie urovnya elektromagnitnykh pomekh v seti 10/0,4 kV s silovymi transformatorami razlichnoi moshchnosti pri nesimmetrichnom kharaktere nagruzki* [Investigation of the level of electromagnetic interference in a 10/0.4 kV network with power transformers of various capacities with an asymmetric nature of the load]. *Problemy energetiki*, 2017, no. 9-10, pp. 65–76.
3. Batuner L.M. Pozin M.E. *Matematicheskie metody v khimicheskoi tekhnike* [Mathematical methods in chemical engineering]. Leningrad, Khimiya Publ., 1971, 824 p.
4. Borisov R.K., Smirnov M.N., Petrov S.R., Balashov V.V., Kolechitskii E.S. *Metody i sredstva resheniya prakticheskikh problem elektromagnitnoi sovmestimosti na elektrostantsiyakh i podstantsiyakh* [Methods and means of solving practical problems of electromagnetic compatibility at power plants and substations]. *Elektro*, 2002, no. 2, pp. 44–52.

5. Vishnyagov M.G., Ivanova Yu.M., Sal'nikov V.G. *Parametry elektromagnitnoi obstanovki v seti s iskazhayushchei nagruzkoi* [Parameters of the electromagnetic environment in a network with a distorting load]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2008, no. 2, pp. 242–247.

6. Gorelov V.P., Lizalek N.N., eds., Ivanova E.V. *Konduktivnye elektromagnitnye pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Conductive electromagnetic interference in electric power systems]. Novosibirsk, 2006, 432 p.

7. Gorelov V.P., ed., Ivanova E.V., Ruppel' A.A. *Konduktivnye elektromagnitnye pomekhi v cetyakh 6–10 kV* [Conductive electromagnetic interference in 6–10 kV networks]. Omsk, 2004, 284 p.

8. Antonov A.I., Denchik Yu.M., Ivanov M.N., Ivanova E.V. et al. *Kriterii vliyaniya nesimmetrichnoi nagruзки v nizkovol'tnoi seti na iskazhenie napryazheniya v seti srednego napryazheniya* [Criterion for the effect of an asymmetric load in a low-voltage network on voltage distortion in a medium-voltage network]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2018, no. 2, pp. 249–253.

9. Khatsevskii K.V., Denchik Yu.M., Kleutin V.I., Zubanov D.A. et al. *Problemy kachestva elektroenergii v sistemakh elektroobrazovaniya* [Problems of electricity quality in power supply systems]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2012, no. 2(110), pp. 212–214.

10. Sidorenko A.A. *Podavlenie konduktivnykh elektromagnitnykh pomekh v elektricheskikh setyakh predpriyatii vodnogo transporta: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Suppression of conductive electromagnetic interference in the electrical networks of water transport enterprises. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 2006, 125 p.

ALEXANDER I. ANTONOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Omsk Institute of Water Transport, Russia, Omsk (aleksandr_antonov_85@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0482-5080>).

DMITRY Yu. RUDY – Post-Graduate Student, Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering, Siberian State University of Water Transport, Russia, Novosibirsk (dima_rudi@mail.ru).

ALEXANDER A. RUPPEL – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Omsk Institute of Water Transport, Russia, Omsk (ruppelsan@mail.ru).

ELENA Yu. RUPPEL – Associate Professor of the Department of Physics and Mathematics, Siberian State Automobile and Road University, Russia, Omsk.

Формат цитирования: Антонов А.И., Руди Д.Ю., Руппель А.А., Руппель Е.Ю. Учёт критерия влияния несимметричной нагрузки на искажение напряжения в сети 10 кВ для рекомендаций по уменьшению несимметрии напряжений // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 12–20. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-12-20.