

**ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В СЕТИ 10/0,4 КВ
С СИЛОВЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ
НЕСИММЕТРИЧНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ**

А.И. Антонов

Омский институт водного транспорта, г. Омск, Россия

Резюме: В статье приводятся результаты исследований уровней электромагнитных помех по коэффициентам несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 10/0,4 кВ с несимметричной резко переменной нагрузкой при силовых трансформаторах различной мощности.

Ключевые слова: несимметрия напряжения, силовые трансформаторы, электромагнитная помеха, качество электрической энергии, несимметричный характер нагрузки, программный продукт.

**STUDY OF THE LEVEL OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN A NETWORK
WITH POWER TRANSFORMERS OF VARIOUS CAPACITIES UNDER ASYMMETRIC
NATURE OF THE LOAD**

A.I. Antonov

Omsk Institute of Water Transport, Omsk, Russia

Abstract: In the article results of researches of levels of electromagnetic disturbances on the unbalance voltage factors on the reverse sequence in a 10 / 0.4 kV network with asymmetric sharply variable load are presented with power transformers of different power.

Keywords: asymmetry of voltage, power transformers, electromagnetic interference, power quality, unbalanced nature of the load, a software product.

Одним из видов искажения электрической сети является несимметрия трехфазной системы напряжений, основная причина которой – различные условия работы фаз. Несимметричные режимы возникают по разным причинам, таким как неполнофазные режимы работы элементов электрической сети, например, при пофазном отключении линий и трансформаторов для ремонта (продольная несимметрия) или наличие значительных несимметричных нагрузок по фазам (поперечная несимметрия) [1].

Несимметрия напряжения характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} , который рассчитывается по формуле [2]

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31fund}^4}{(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31fund}^2)^2} \cos^{-1} \theta$, в свою очередь U_{ijfund} – основная составляющая

напряжения между фазами i и j .

ГОСТ 32144-2013 характеризует коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности как кондуктивную низкочастотную электромагнитную помеху (ЭМП), соответствующую определённому уровню электромагнитной совместимости (ЭМС). При этом установлены следующие уровни ЭМС электрических сетей общего назначения для кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности: значения данного показателя КЭ в точке передачи электрической энергии, усреднённые в интервале 10 мин., не должны превышать 2% в течение 95% времени интервала и 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю [2].

Наш объект, на котором проводились необходимые исследования, связан с литейным производством на промышленном предприятии. Литейный участок на этом предприятии, в котором литейные установки конструктивно подключаются на 2 фазы, является источником кондуктивных низкочастотных ЭМП в сети 10/0,4 кВ и вызывает при этом поперечную несимметрию.

Для начала разработана математическая модель объекта исследования, графическая интерпретация которой показана на рис. 1. Данный объект состоит из источника питания напряжением 10 кВ, силового понижающего трансформатора ТМЗ 1000-10/0,4, четырех линейных трансформаторов ОЭСК 250/40, четырех установок электрошлакового литья с дуговым способом нагрева, работающих при напряжении 40 В, каждая мощностью 170 кВ·А [3].

Модель разработана в прикладном пакете *Simulink* программы *Matlab*. Данная модель характеризуется поперечной несимметрией напряжения.

После разработки данной модели необходимо убедиться в ее адекватности. Так как источником кондуктивной низкочастотной ЭМП является литейный участок, в состав которого входят 4 нагрузки, каждая мощностью 170 кВ·А, то при уменьшении этой мощности значения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности должны также уменьшаться. Чтобы убедиться в верности данного суждения, мы уменьшали мощности нагрузок от 190 до 30 кВ·А с шагом 20 кВ·А. При этом на каждом шаге мощности всех 4-х нагрузок были одинаковы. Для каждого шага получены значения линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} для сетей 10 и 0,4 кВ. С помощью формулы (1) вычислены значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} . Результаты, полученные с помощью модели и вычисленные с помощью формулы (1), представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов несимметрии напряжения при уменьшающейся мощности нагрузки

Мощность нагрузки, кВт	10 кВ				0,4 кВ			
	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	K_{2U}	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	K_{2U}
190	9521	9939	9453	2,5	360,1	388,9	354	4,7
170	9568	9965	9534	2,3	364	391	359,6	4,2
150	9629	9990	9598	2	368,4	393,2	364,7	3,8
130	9683	10010	9667	1,8	372,6	395	369,9	3,3
110	9736	10020	9732	1,5	376,9	396,5	375	2,8
90	9789	10030	9793	1,3	381,1	397,7	379,9	2,4
70	9841	10035	9850	1	385,3	398,7	384,6	1,9
50	9892	10040	9901	0,76	389,5	399,4	389,1	1,4
30	9941	10040	9946	0,5	393,7	399,7	393,3	0,82

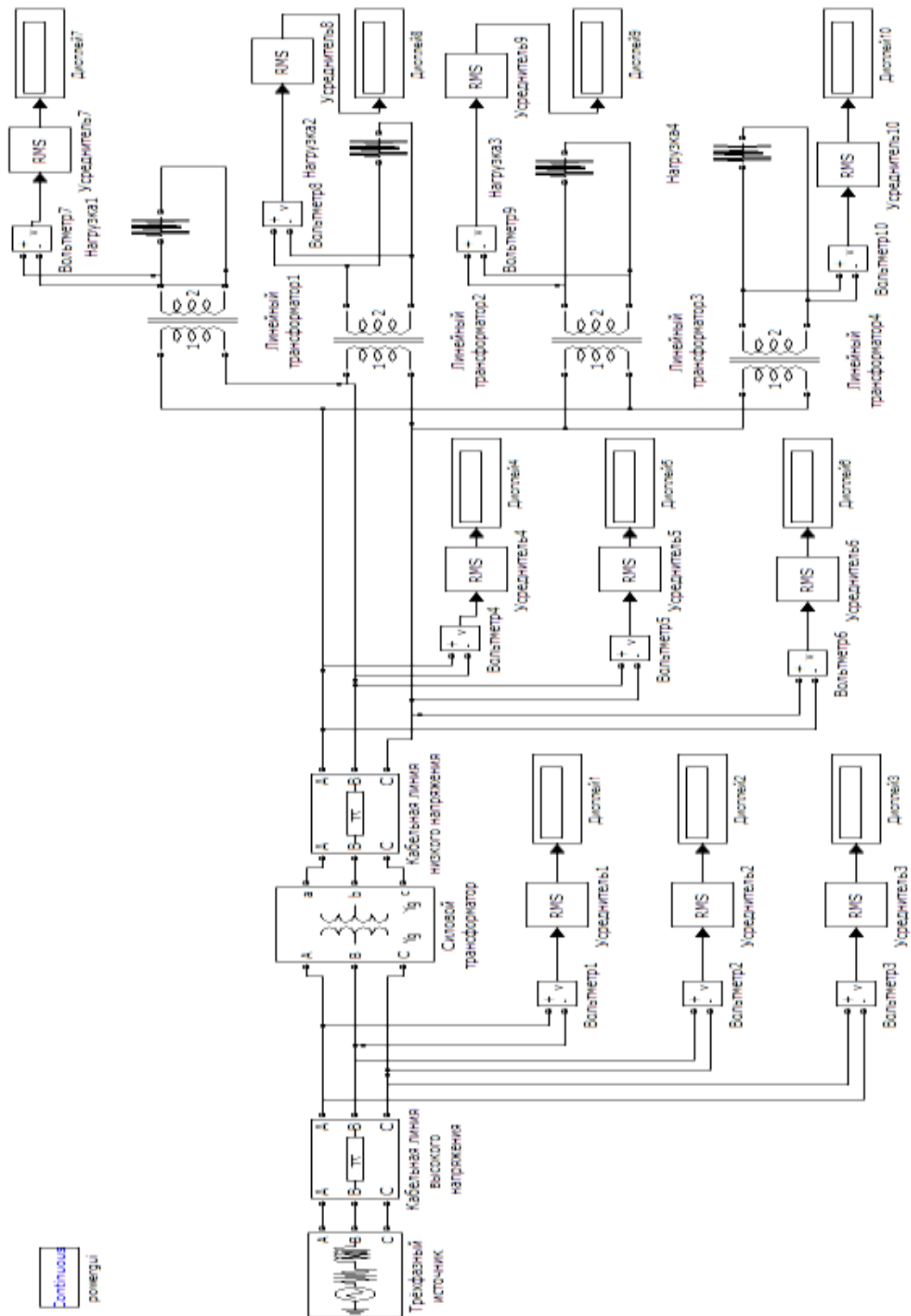


Рис. 1. Графическая интерпретация математической модели литейного участка

Для наглядности полученных результатов построен график зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности для высокого и низкого напряжения от мощности нагрузки (рис. 2), из которого видно, что при уменьшении мощности нагрузки уменьшаются значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности как в сети 0,4 кВ, так и в сети 10 кВ. При определенных значениях мощностей нагрузки значения данных коэффициентов становятся ниже предельно допустимых (4%) и нормально допустимых (2%) значений. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что действительно нагрузки определенной мощности являются источником кондуктивной низкочастотной ЭМП.

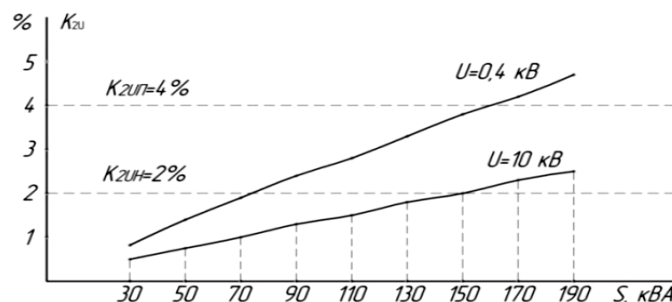


Рис. 2. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности для высокого и низкого напряжения от мощности нагрузки

Данный вывод позволяет нам продолжить исследования уровня ЭМП при несимметричном характере нагрузки. Так как нагрузка имеет не только несимметричный, но и резкопеременный характер, то для выявления отклонения качества электроэнергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности на данном объекте использовался генератор случайных чисел, изменяющий значения мощностей каждой нагрузки на литейном участке случайным образом от 140 до 200 кВ·А 20 раз. Для каждого из 20-ти вариантов значений мощностей нагрузки с помощью модели получили свои значения линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} . Пользуясь формулой (1), вычислены значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} .

На объекте исследования используется силовой трансформатор мощностью 1000 кВ·А. Данные исследования проводились при силовых трансформаторах различной мощности, то есть кроме силового трансформатора 1000 кВ·А в модель поочередно вводились силовые трансформаторы мощностью 630, 1600 и 2500 кВ·А. В модели для каждого из силовых трансформаторов получены те же параметры, что и при силовом трансформаторе 1000 кВ·А.

После получения значений K_{2U} , необходимо их обработать. Обработка полученных значений проводилась с помощью программного продукта «Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности», благодаря которому рассчитаны параметры закона распределения исследуемой величины, а также определены вероятности появления кондуктивной электромагнитной помехи за расчетный период. Программный продукт разработан в среде разработки Lab VIEW [4]. На данный программный продукт получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661752 от 20 октября 2016 г.

LabVIEW — интегрированная графическая среда разработчика для создания интерактивных программ сбора, обработки данных и управления периферийными устройствами. Программирование осуществляется на уровне функциональных блок-схем

(блок-диаграмм) с использованием графического языка G. В состав библиотеки программы входит подпалитра математических функций (*Mathematics*). Программный продукт, разработанный средствами *LabVIEW*, позволяет создавать пользователю удобный интерфейс, получить все необходимые значения для оценки результатов измерений показателей качества электрической энергии.

Для проведения статистической обработки данных, полученных с помощью модели в ходе исследований, в программном продукте предлагается сначала экспортировать данные измерений в документ *Microsoft EXCEL*. После этого следует сохранить полученные данные как текстовые файлы (с разделителями табуляции), и данный сохраненный файл необходимо прикрепить в программу в разделе «Ввод данных». В программном продукте уже заложены пределы нормально допустимых и предельно допустимых значений K_{2U} согласно ГОСТ 32144-2013. После запуска в течение нескольких долей секунд программный продукт рассчитывает параметры распределения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности, такие как максимальное и минимальное значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности, математическое ожидание коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности и среднеквадратичное отклонение. Интерфейс программного продукта по обработке результатов исследований показателей качества электрической энергии показан на рис. 3–10.

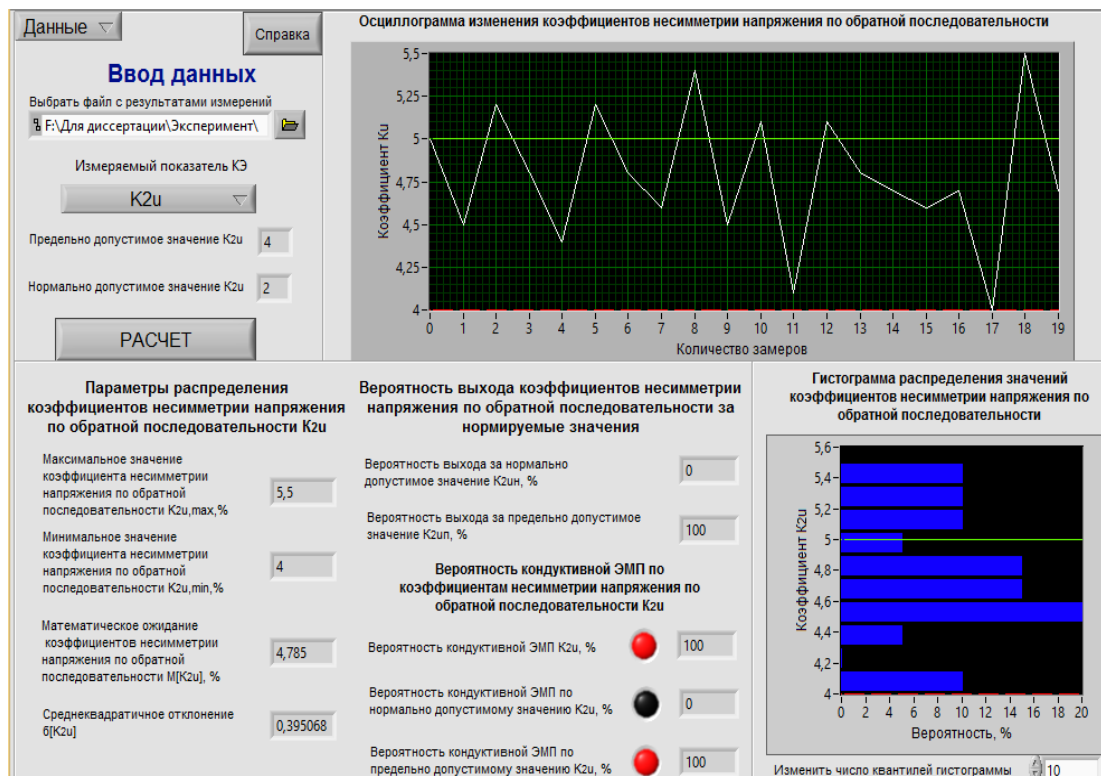


Рис. 3. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 0,4 кВ при мощности силового трансформатора 630 кВ·А

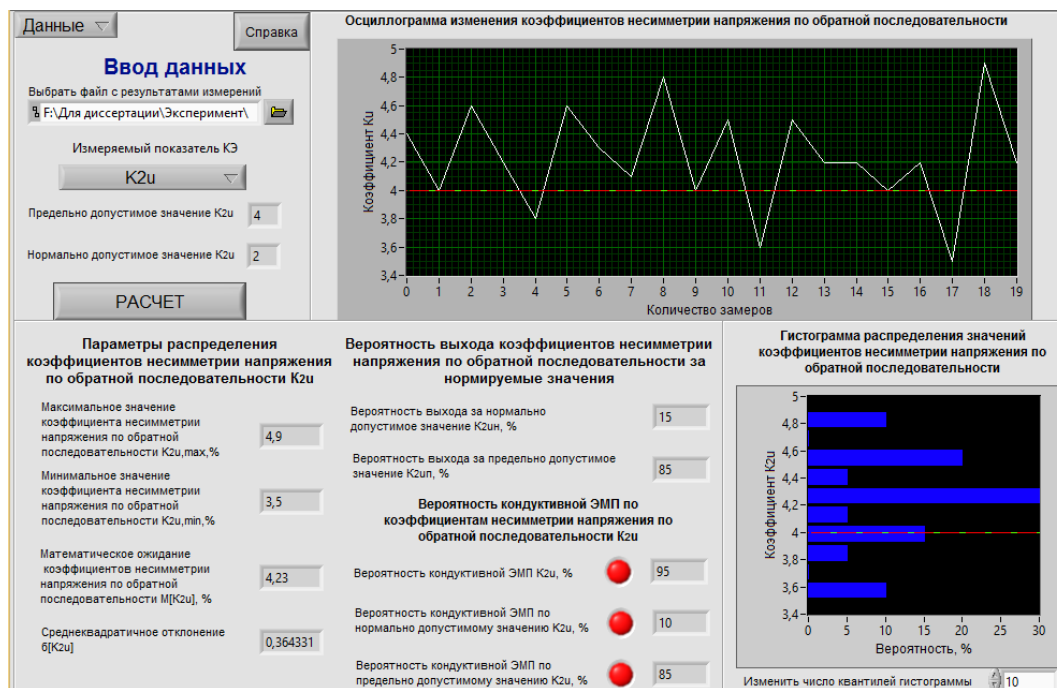


Рис. 4. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 0,4 кВ при мощности силового трансформатора 1000 кВ·А

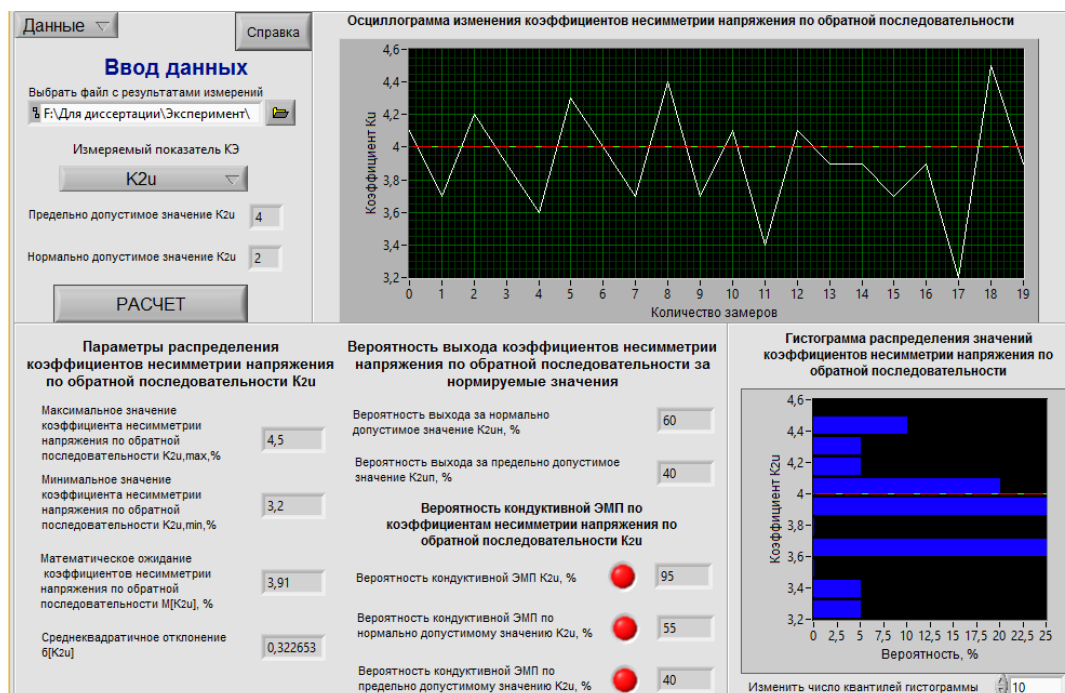


Рис. 5. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 0,4 кВ при мощности силового трансформатора 1600 кВ·А

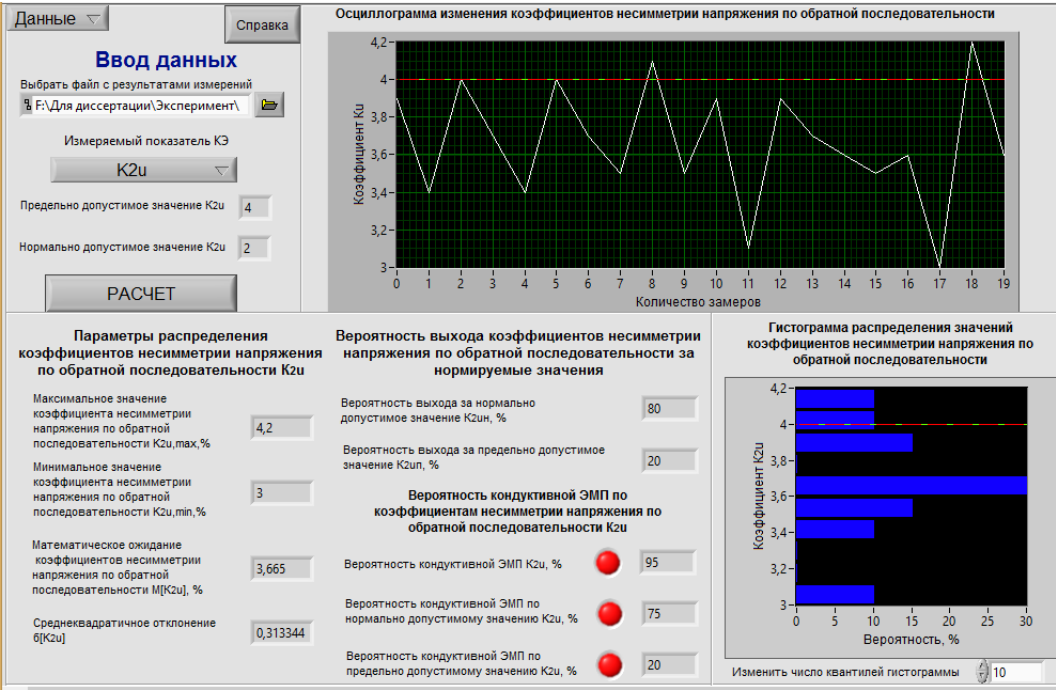


Рис. 6. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 0,4 кВ при мощности силового трансформатора 2500 кВ·А

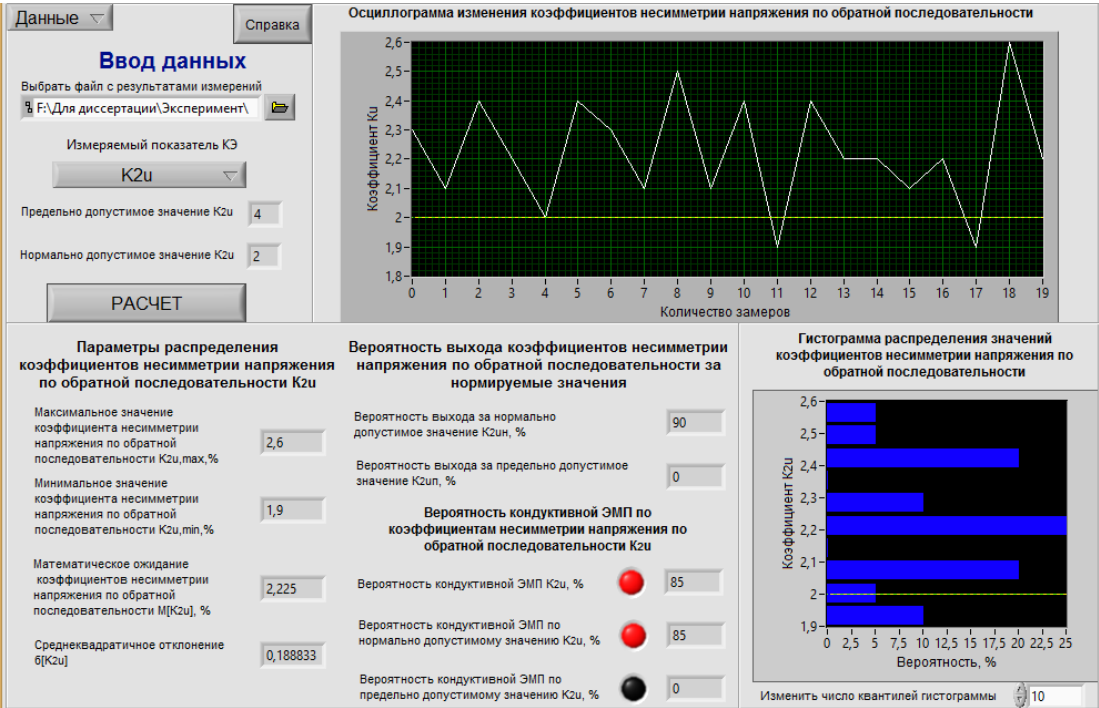


Рис. 7. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 10 кВ при мощности силового трансформатора 630 кВ·А

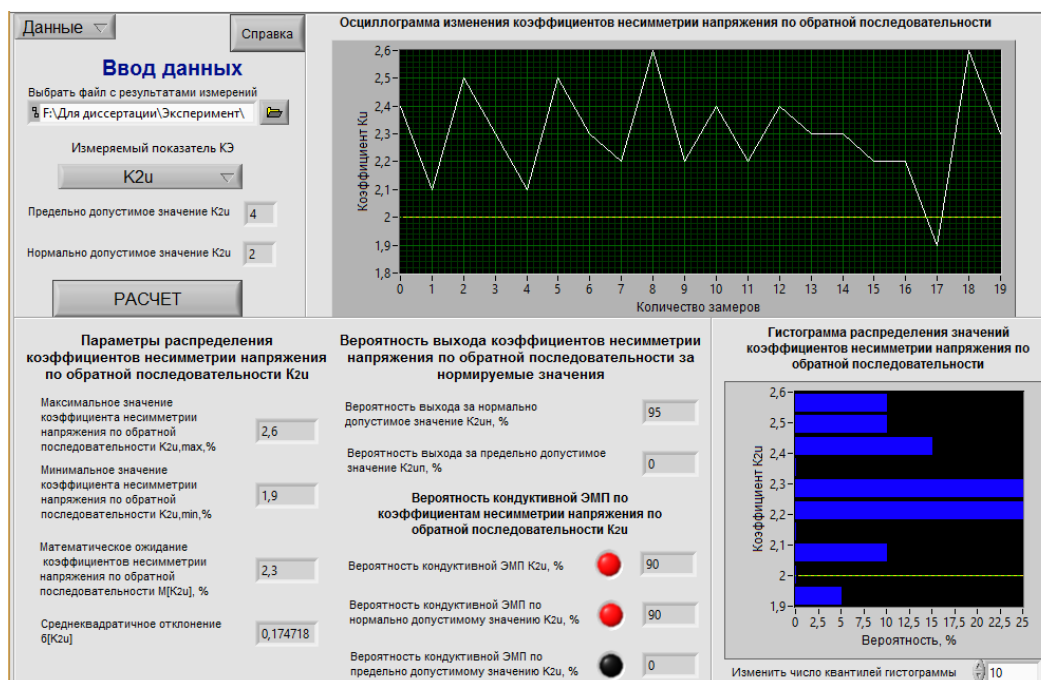


Рис. 8. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 10 кВ при мощности силового трансформатора 1000кВ·А

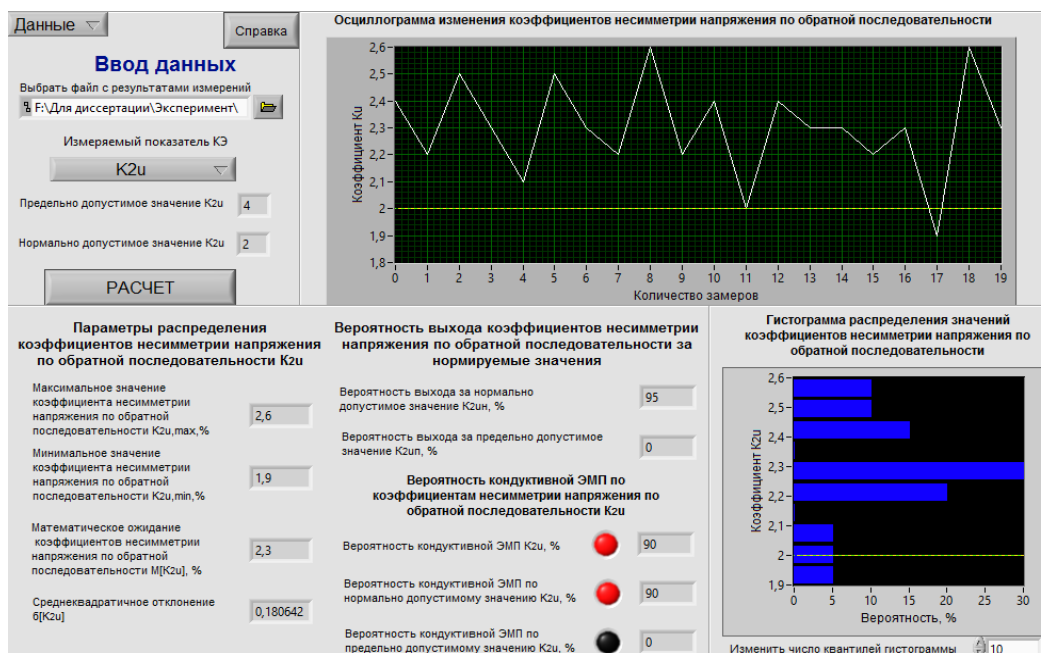


Рис. 9. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 10 кВ при мощности силового трансформатора 1600 кВ·А

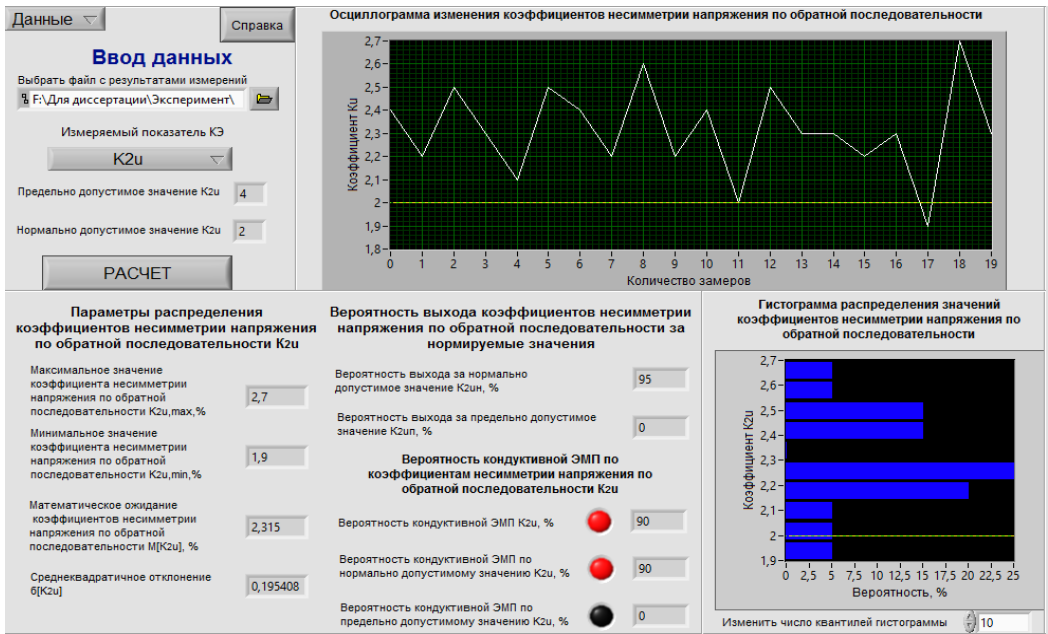


Рис. 10. Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети напряжением 10 кВ при мощности силового трансформатора 2500 кВ·А

Для наилучшего восприятия сравнительного анализа значений параметров распределения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности все полученные значения для сетей 10/0,4 кВ при разных мощностях силового трансформатора сведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров распределения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности сети 10/0,4 кВ при различных мощностях силового трансформатора

№ п/п	Параметры	Сеть 0,4 кВ Мощность силового трансформатора, кВ·А				Сеть 10 кВ Мощность силового трансформатора, кВ·А			
		630	1000	1600	2500	630	1000	1600	2500
1	Максимальное значение $K_{2U_{max}}$, %	5,5	4,9	4,5	4,2	2,6	2,6	2,6	2,7
2	Минимальное значение $K_{2U_{min}}$, %	4	3,5	3,2	3	1,9	1,9	1,9	1,9
3	Математическое ожидание $M[K_{2U}]$, %	4,785	4,23	3,91	3,665	2,225	2,3	2,3	2,315
4	Среднеквадратичное отклонение $\delta[K_{2U}]$, %	0,395	0,364	0,323	0,313	0,189	1,174	0,181	0,195
5	Вероятность выхода за нормально допустимое значение $K_{2U_{н}}$, %	0	15	60	80	90	95	95	95
6	Вероятность выхода за предельно допустимое значение $K_{2U_{п}}$, %	100	85	40	20	0	0	0	0

Продолжение таблицы 2

7	Вероятность кондуктивной ЭМП по нормально допустимому значению K_{2U} , %	0	10	55	75	85	90	90	90
8	Вероятность кондуктивной ЭМП по предельно допустимому значению K_{2U} , %	100	85	40	20	0	0	0	0
9	Вероятность кондуктивной ЭМП K_{2U} , %	100	95	95	95	85	90	90	90

После обработки результатов исследования можно сделать следующие выводы:

– значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 0,4 кВ больше, чем в сети 10 кВ, что подтверждает теорию о критерии распределения в электроэнергетической системе кондуктивных ЭМП в смежную сеть, согласно которой помеха, переходящая из одной смежной сети в другую (в нашем случае от сети 0,4 в сеть 10 кВ), гасится в силовом трансформаторе на определенное значение коэффициента. Из таблицы видно, что в сети 10 кВ вероятность кондуктивной ЭМП по предельно допустимому значению K_{2U} равна 0, то есть ни одно из значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности не вышло за пределы 4%, тогда как в сети 0,4 кВ такая вероятность присутствует;

– значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 0,4 кВ уменьшаются с увеличением мощности силового трансформатора, а это влечет за собой уменьшение математического ожидания и среднеквадратичного отклонения, а следовательно и вероятности появления кондуктивной ЭМП. Это означает, что помеха в силовом трансформаторе большей мощности гасится на большее значение коэффициента. Увеличение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности на низком напряжении при снижении мощности трансформатора можно объяснить тем, что мощность нагрузки растет относительно мощности силового трансформатора, и запас по мощности силового трансформатора уменьшается;

– значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 10 кВ несколько уменьшаются, но это уменьшение происходит в меньшей степени, по сравнению с увеличением значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 0,4 кВ. Уменьшение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 10 кВ при снижении мощности трансформатора можно объяснить тем, что мощность источника трехфазного напряжения относительно мощности трансформатора увеличивается и, соответственно, увеличивается запас по мощности этого источника.

Литература

- ГОСТ 30804.4.30. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электроэнергии. М.: Стандартинформ, 2014. 57 с.
- ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

3. Антонов А.И., Вишнягов М.Г., Денчик Ю.М., Зубанов Д.А., Клеутин В.И., Руппель А.А. Определение кондуктивной низкочастотной помехи по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: СГУВТ. 2015. № 4. С. 199–203.

4. Зубанов Д.А., Клеутин В.И., Сидоренко А.А. и др. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программы LabView: сборник научных трудов ОИВТ. 2012. № 10. С. 118–122.

5. Суранов А.Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2007. 536 с.

6. Наумов И. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения. Иркутск, 2001 г. 217 с.

7. Пат. СССР 801186, МКИ H02 J3/26. Устройство для симметрирования режима трехфазной сети / Налбандян Д.Б., Мельник Н.И. Опубл. 30.01.81. Бюл. № 4.

8. Вишнягов М.Г., Руппель А.А. и др. Электромагнитная совместимость в электрических сетях Прииртышья // Энергосистема: исследование свойств, управление, автоматизация: матер. междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 26–29 мая 2009 г. Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. Спецвыпуск. 2009. № 1. С. 223–227.

9. Данилов Г.А., Денчик Ю.М., Иванов М.Н. Ситников Г.В. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Под ред. В.П. Горелова, В.Г. Сальникова. Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013. 559 с.

10. Park R.H. Two-Reaction theory of synchronous machines. General method of analysis. Trans. AIEE. Pt 1, 1929, V. 48. P. 716; Pt 2, 1933, V. 52. P. 352.

Автор публикации

Антонов Александр Игоревич – ст. преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта. E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru.

References

1. GOST 30804.4.30. Electric Energy. The compatibility of technical means is electromagnetic. Methods for measuring electricity quality. Moscow: Standardinform, 2014. 57 p.

2. GOST 32144-2013. Interstate standard. Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems. - In exchange for GOST 13109-97; Enter. 2014-07-01. Moscow: Standardinform, 2014. 20 p.

3. Antonov A.I. Determination of conductive low-frequency noise with respect to the voltage unbalance coefficient by the reverse sequence. A.I. Antonov, M.G. Vishnyagov, Yu.M. Dencik, D.A. Zubanov, V.I. Kleutin, A.A. Ruppel. Scientific Problems of Siberia and the Far East. Novosibirsk: SSUVT. 2015. No. 4. P. 199–203.

4. Zubanov D.A. Processing of the results of experimental studies of electrical energy quality indicators by means of the LabView program. D.A. Zubanov, V.I. Kleutin, A.A. Sidorenko et al. Collected scientific papers of the OIVT. 2012. 10. P. 118–122.

5. Suranov, A.Ya. LabVIEW 8.20: Reference book on functions. A.Ya. Suranov. Moscow: DMK Press, 2007. 536 p.

6. Naumov I. Optimization of asymmetric regimes of the system of rural power supply. Irkutsk, 2001 217 with.

7. Pat. USSR 801186, MКИ H02 J3 / 26. Device for balancing the three-phase network mode. Nalbandyan DB, Melnik N.I. Opubl. 30.01.81. Bul. No. 4.

8. Vishnyagov M.G. Electromagnetic Compatibility in Electrical Networks of Priirtyshia. M.G. Vishnyagov, A.A. Ruppel [and others]. Energy system: the study of properties, management, automation: mater. Intern. Scientific-techn. Conf. Novosibirsk, May 26-29, 2009. Scientific Secretary Probl. Transp. Sib. And Dahl. East. Special release. 2009. No. 1. P. 223–227.

9. Danilov G.A. Improving the quality of the operation of power transmission lines. G.A. Danilov, Yu.M. Denchik, M.N. Ivanov, G.V. Sitnikov, ed. V.P. Gorelov, V.G. Salnikova. Novosibirsk: Novosib. State. Acad. Aq. Trans., 2013. 559 p.

10. Park R.H. Two-Reaction theory of synchronous machines. General method of analysis // Trans. AIEE. Pt 1, 1929, V. 48. P. 716; Pt 2, 1933, Vol. 52. P. 352.

Author of the publication

Alexander I. Antonov – St. Lecturer of the Department "Electrical engineering and electrical equipment" Omsk Institute of Water Transport.

Поступила в редакцию

13 июня 2017 г.