

SPIN-код: 4216-9920

AuthorID (РИНЦ): 916641

КОЛМОГОРОВ Аркадий Сергеевич, ведущий инженер ООО «Автоматика-сервис», г. Омск.**БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика» ОмГТУ.

SPIN-код: 9384-0078

AuthorID (РИНЦ): 189467

Адрес для переписки: lightsun@mail.ru

Для цитирования

Колмогорова С. С., Колмогоров А. С., Бирюков С. В. Измерение степени неоднородности электрического поля // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 45–48. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-45-48.

Статья поступила в редакцию 15.02.2018 г.

© С. С. Колмогорова, А. С. Колмогоров, С. В. Бирюков

УДК 621.31

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-48-54

А. И. АНТОНОВ¹
Ю. М. ДЕНЧИК²
Д. А. ЗУБАНОВ¹
Н. В. ЗУБАНОВА²
А. А. РУППЕЛЬ¹

¹Омский институт
водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного
университета водного транспорта,
г. Омск

²Сибирский государственный
университет водного транспорта,
г. Новосибирск

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

В статье описаны процессы, связанные с появлением несимметрии трехфазной системы напряжения. Описан активный эксперимент на выбранном объекте исследования с несимметричными резкопеременными нагрузками. Обработаны результаты эксперимента с помощью программы для ЭВМ и проведен анализ обработки данных результатов.

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент несимметрии напряжения, электромагнитная помеха, резкопеременная нагрузка, электромагнитная обстановка, перегрузки по фазам.

В настоящее время происходит всё более интенсивная электрификация различных регионов Российской Федерации, связанная с нарастанием темпов их освоения. Одним из факторов предъявляемых требований к системам электроснабжения является повышение качества функционирования электрических сетей общего назначения [1]. Качество функционирования определяется степенью соответствия технических средств требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 32144-2013. Многие системы электроснабжения по ряду причин характеризуются некачественной электроэнергией, в результате чего обостряется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. В связи с этим возникают кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи (ЭМП) в системах электроснабжения. Данные ЭМП раз-

личаются по показателям качества электрической энергии (ПКЭ) [1].

Одним из основных факторов обеспечения электроэнергетической эффективности предприятий является удовлетворение значений ПКЭ установленным нормам. Соответствие этих значений является необходимым условием безопасного применения электрооборудования [2]. Несоответствие норм показателей КЭ может привести к порче дорогостоящего оборудования, нарушениям производственных циклов, выпуску некачественной продукции. Своевременное обнаружение отклонений показателей КЭ от нормы позволяет предотвратить данные негативные последствия.

Согласно ГОСТ 32144-2013, несимметрия трехфазной системы напряжений является одним из видов искажения электрической сети [3]. Основ-

ной причиной несимметричных режимов являются различные условия работы фаз [4]. Такие режимы возникают по различным причинам, зависящим от неполнофазных режимов работы элементов электрической сети, например, при пофазном отключении линий и трансформаторов для ремонта (продольная несимметрия) или из-за значительных несимметричных нагрузок по фазам (поперечная несимметрия) [2].

Несимметрия напряжения характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2U'}$, который является одним из основных показателей качества электрической энергии.

Кондуктивная низкочастотная ЭМП по K_{2U} приводит к ряду негативных последствий, таких как снижение вращающего момента на валу вращающихся машин, вследствие чего их дополнительный нагрев; снижение скорости вращения роторов асинхронных двигателей и производительности приводимых ими механизмов; увеличенное потребление реактивной мощности и, как следствие, увеличение электрических потерь в электрических сетях [2].

Значения K_{2U} рассчитываются по формуле [5]:

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

где $\beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31fund}^4}{(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31fund}^2)^2}$, в свою очередь U_{ijfund} — основная составляющая напряжения между фазами i и j .

Установлены следующие уровни ЭМС электрических сетей общего назначения для кондуктивной низкочастотной ЭМП по K_{2U} : 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 [4].

Объектом исследования в данной работе является литейное производство, в котором литейные установки (а именно, дуговые сталеплавильные печи), конструктивно подключены на две фазы (рис. 1). Данные конструктивные особенности объекта исследования, согласно теории электромагнитных помех [1], должны вызывать поперечную несимметрию.

Дуговые сталеплавильные печи типа ДСП 5 и ДСП 10 следует рассматривать как приёмники электроэнергии с несимметричными электрическими параметрами (комплексными сопротивлениями фаз). При этом явно прослеживается наличие несимметричных нагрузок потребителей электрической энергии (явление поперечной несимметрии), что, согласно [4], ведет за собой появление K_{2U} .

Помимо всего прочего, при работе дуговой сталеплавильной печи часто наблюдается явление переноса мощности из одной крайней фазы в другую. В результате этого одна из дуг имеет пониженное напряжение и мощность («мёртвая» фаза), а другая, наоборот, повышенные («дикая» фаза). В промышленных дуговых печах с симметричной относительно средней фазы (токопроводы расположены в одной плоскости) короткой сетью «дикой» фазой является крайняя опережающая, а «мёртвой» — крайняя отстающая. Неравенство мощностей дуг по

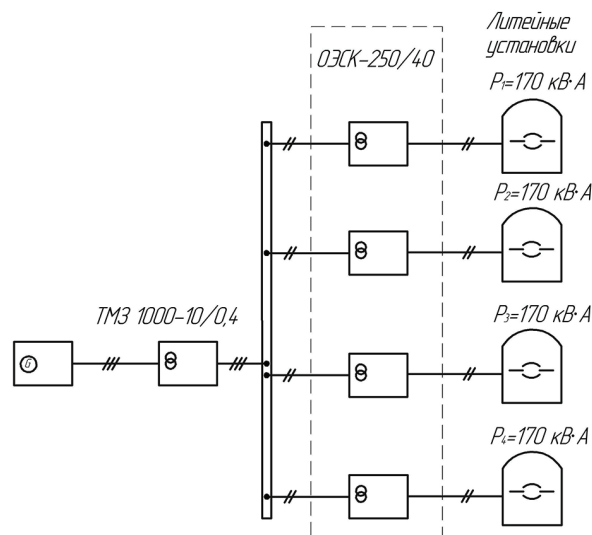


Рис. 1. Структура литейного участка промышленного предприятия

фазам может достигать 50 % [5]. На основании этого можно считать характер такой нагрузки резкопеременным [6].

Исходя из всего вышесказанного, можно предположить, что при проведении исследований на объекте (а именно, проведение активного эксперимента) должна наблюдаться кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха по K_{2U} .

Для получения необходимых данных об объекте исследования и проведения их последующего анализа и обработки использовался активный эксперимент, который по сравнению с пассивным экспериментом обладает следующими преимуществами:

- разброс опытных данных достаточно большой и среднеквадратичное отклонение оказывается несоизмеримым с ошибками измерения параметров объекта;
- независимыми переменные x_1, x_2, \dots, x_m не изменяются под действием одних и тех же причин, поэтому исходные данные практически не подвергаются корреляции;
- требования к точности измерений достаточно велики как в условиях обычной эксплуатации объекта, так и при проведении специальных исследований.

Для проведения активного эксперимента построены проблемно-ориентированные математические модели элементов объекта исследования по принципу декомпозиции, на основании которых разработана структура объекта исследования (рис. 1) и её графическая интерпретация (рис. 2). 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 (дуговые сталеплавильные печи), работающие при напряжении 40 В, номинальная мощность каждой 170 кВт·А [5].

Для начала исследований примем к сведению тот факт, что нагрузка имеет не только несимметричный, но и резкопеременный характер. В связи с этим, для выявления отклонения качества электроэнергии по K_{2U} в модели объекта исследования используется генератор случайных чисел (ГСЧ), имитирующий изменение значений по нормаль-

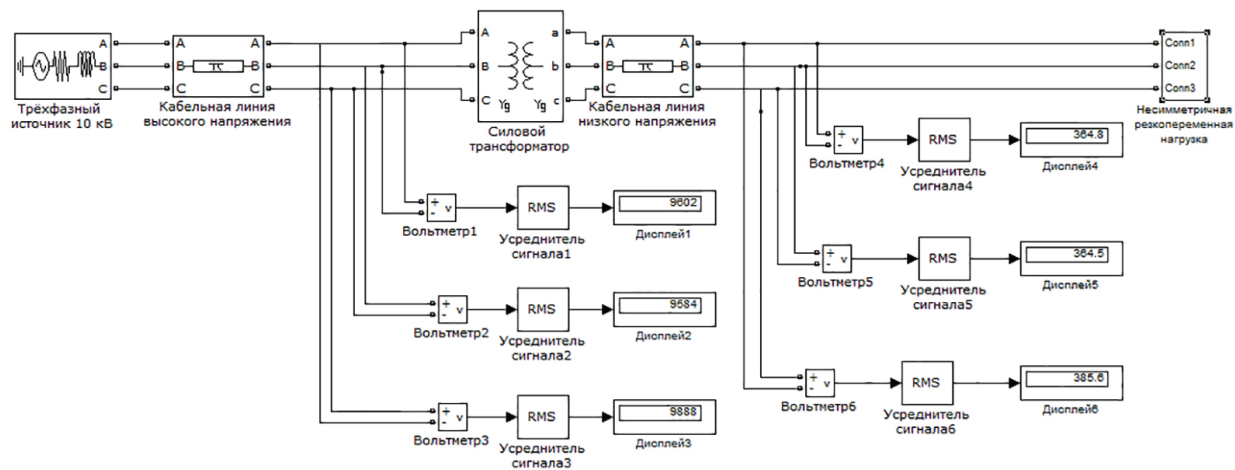


Рис. 2. Графическая интерпретация математической модели объекта исследования

Таблица 1

Значения мощностей нагрузок, линейных напряжений и коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сетях 10/0,4 кВ при перегрузке фаз А и В

Мощности нагрузок				Линейное напряжение сети 10 кВ			Значение K_{2U} в сети 10 кВ, %	Линейное напряжение сети 0,4 кВ			Значение K_{2U} в сети 0,4 кВ, %
$P_{1'}$, кВт·А	$P_{2'}$, кВт·А	$P_{3'}$, кВт·А	$P_{4'}$, кВт·А	$U_{AB'}$, В	$U_{BC'}$, В	$U_{AC'}$, В		$U_{AB'}$, В	$U_{BC'}$, В	$U_{AC'}$, В	
170	181	146	202	9394	9528	9844	2,2	354,3	363,8	383,7	3,7
172	182	170	174	9466	9450	9845	2,1	359	358,7	383,9	3,6
204	192	176	185	9384	9400	9848	2,5	353,7	355,4	383,9	4,3
163	138	137	168	9530	9589	9882	1,8	363,3	368	386,4	3,0
205	156	167	195	9422	9483	9821	1,9	356,1	360,8	382,2	3,5
165	198	166	170	9446	9441	9874	2,4	357,7	358,2	385,7	4,0
156	189	172	211	9408	9502	9778	1,8	355,2	361,9	379,4	3,1
141	155	185	155	9596	9499	9821	1,6	367,7	361,8	382,4	2,6
150	154	149	149	9568	9539	9896	1,9	365,7	364,7	387,5	3,2
188	169	165	154	9490	9440	9903	2,4	360,7	358,2	387,6	4,1
181	146	170	138	9580	9465	9890	2,1	366,5	359,8	387,1	3,5
182	170	202	151	9540	9387	9832	2,1	363,8	354,4	383,1	3,6
192	176	174	162	9470	9420	9874	2,4	359,3	356,8	385,8	4,0
138	137	185	172	9605	9556	9768	1,0	368,2	365,4	379,1	1,8
156	167	168	151	9547	9480	9879	1,9	364,4	360,7	386,1	3,4
198	166	195	162	9493	9394	9839	2,2	360,9	354,9	383,4	3,8
189	172	170	181	9439	9457	9849	2,2	357,4	359,1	383,9	3,7
155	185	211	200	9470	9434	9725	1,5	359,2	357,3	376	2,6
154	149	155	176	9527	9564	9838	1,6	363,1	366,2	383,5	2,7
169	165	149	170	9479	9516	9889	2,2	360,1	363,2	386,6	3,6
146	170	154	172	9508	9535	9859	1,9	361,8	364,4	384,9	3,1
170	202	138	204	9345	9507	9870	2,6	351,1	362,5	385,3	4,3
176	174	151	163	9473	9482	9902	2,3	359,5	361	387,7	3,9
137	185	162	205	9441	9544	9792	1,7	357,5	364,7	380,3	2,9

Мощности нагрузок				Линейное напряжение сети 10 кВ			Значение K_{2U} в сети 10 кВ, %	Линейное напряжение сети 0,4 кВ			Значение K_{2U} в сети 0,4 кВ, %
$P_{1'}$ кВ·А	$P_{2'}$ кВ·А	$P_{3'}$ кВ·А	$P_{4'}$ кВ·А	$U_{AB'}$ В	$U_{BC'}$ В	$U_{AC'}$ В		$U_{AB'}$ В	$U_{BC'}$ В	$U_{AC'}$ В	
167	168	172	165	9509	9473	9854	2,0	361,9	360,2	384,5	3,4
166	195	151	156	9462	9452	9924	2,6	358,7	359	389,1	4,4
172	170	162	141	9537	9452	9914	2,3	363,6	359	388,6	3,9
185	211	181	150	9444	9347	9903	2,8	357,5	352	387,6	4,8
149	155	200	188	9544	9500	9738	1,2	364,1	361,7	376,9	2,0
165	149	176	181	9523	9521	9799	1,5	362,3	363,2	380,9	2,6
170	154	170	182	9500	9516	9816	1,7	361,3	362,9	382	2,9
202	138	172	192	9461	9507	9809	1,8	358,9	362,2	381,3	3,0
174	151	204	138	9611	9412	9829	2,0	368,4	356,1	383,1	3,3
185	162	163	156	9506	9464	9889	2,2	361,6	359,7	386,8	3,8
168	172	205	198	9474	9447	9738	1,5	359,5	358,1	376,8	2,6
195	151	165	189	9454	9502	9826	1,9	358,2	362	382,6	3,3
170	162	156	155	9522	9494	9894	2,1	362,7	361,7	387,2	3,6
211	181	141	154	9418	9427	9962	3,0	355,9	357,6	391,5	5,0
155	200	150	169	9443	9474	9900	2,4	357,5	360,5	387,5	4,1
149	176	188	146	9572	9438	9848	2,0	365,9	357,9	384,3	3,3
154	170	181	170	9526	9480	9819	1,7	362,9	360,5	382,2	2,9
138	172	182	176	9534	9503	9798	1,5	363,5	362	380,8	2,6
151	204	192	137	9538	9371	9879	2,5	363,7	353,5	386,3	4,2
162	163	138	167	9491	9544	9902	2,1	360,7	365,1	387,7	3,6
172	205	156	166	9422	9431	9908	2,7	356,1	357,6	388	4,5
151	165	198	172	9545	9465	9786	1,6	364,3	359,4	379,9	2,7
162	156	189	185	9520	9496	9772	1,5	362,5	361,5	379,2	2,5
181	141	155	149	9554	9510	9895	1,9	364,8	362,8	387,4	3,4
200	150	154	165	9482	9488	9590	2,2	360	361,3	386,8	5,8
176	188	169	170	9452	9438	9868	2,3	358,1	358	385,4	4,0

ному закону распределения случайной величины. С помощью данного ГСЧ значения мощностей каждой установки на литейном участке изменялись случайным образом 50 раз. Математическое ожидание в данном блоке установили 170 (номинальная мощность каждой нагрузки), среднеквадратичное отклонение задали равным семи (чтобы обеспечить дисперсию, примерно равную 50). Полученные исходные данные значений мощностей нагрузки с помощью ГСЧ использовали для получения остальных необходимых для исследования параметров.

Так как в объекте исследования существуют четыре дуговые сталеплавильные печи, то полученные значения мощностей распределены во всех 4-х нагрузках в случайном порядке (табл. 1).

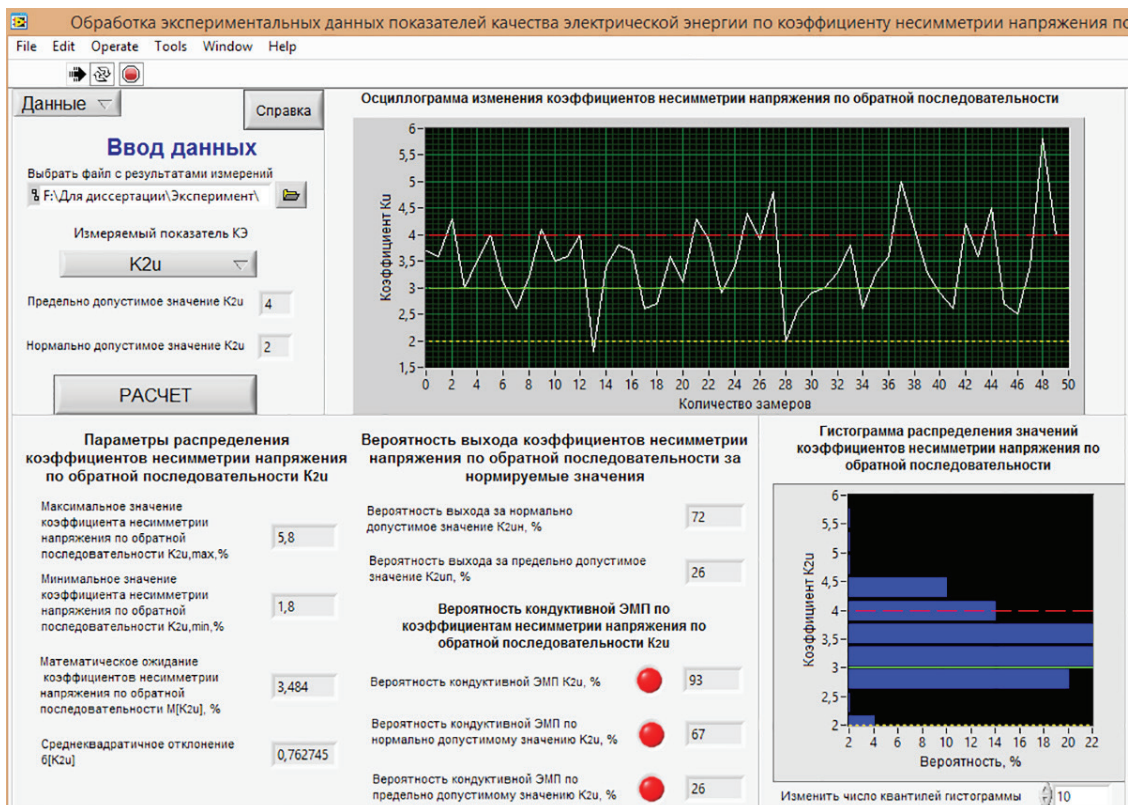
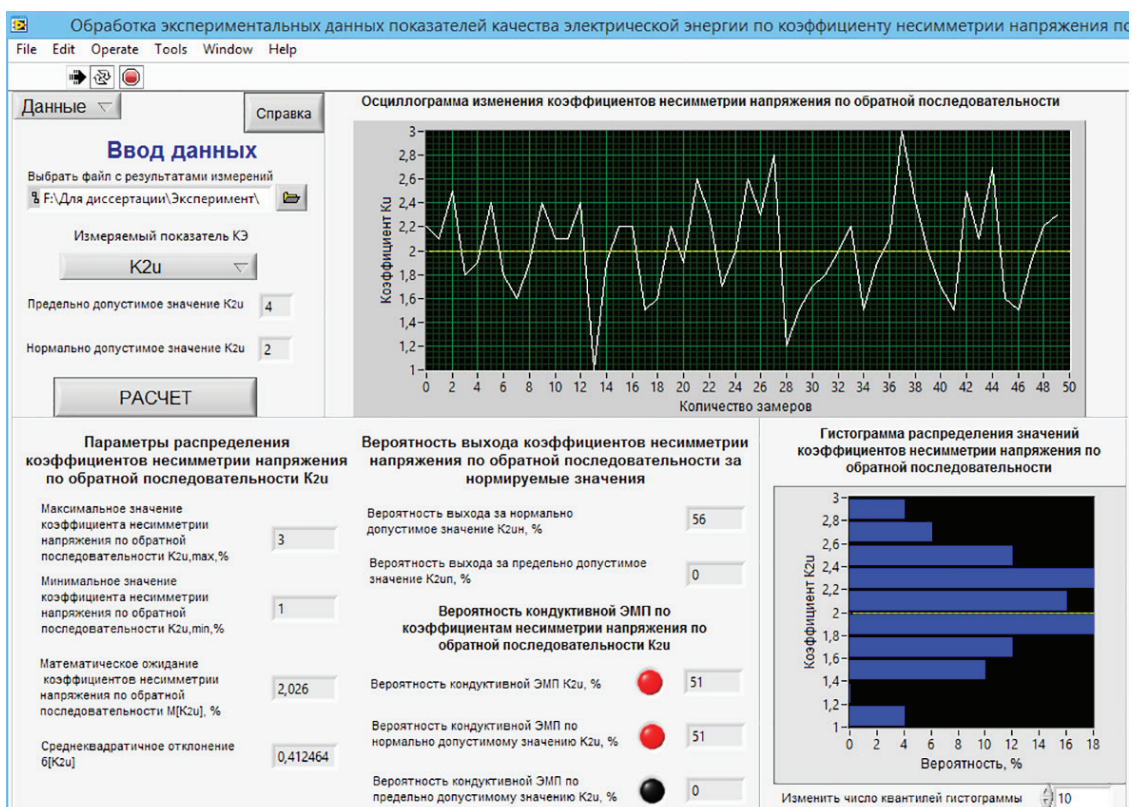
Для каждого из 50-ти вариантов значений мощностей нагрузки в ходе активного эксперимента с помощью модели получили значения линейных

напряжений $U_{AB'}$, $U_{BC'}$ и $U_{CA'}$. Вышеуказанные исследования проводились для всех вариантов перегрузок трёхфазной трёхпроводной сети 10 кВ и 0,4 кВ, так как несимметрию напряжения вызывает любой из этих вариантов, а именно:

- 1) 1-й вариант — перегружены фазы А и В;
- 2) 2-й вариант — перегружены фазы В и С;
- 3) 3-й вариант — перегружены фазы А и С.

Все полученные с помощью модели значения мощностей нагрузок и линейных напряжений, а также вычисленные с помощью формулы (1) значения K_{2U} для первого варианта перегрузки сведены в табл. 1. Также получены значения необходимых параметров для второго и третьего вариантов перегрузки, их анализ показал, что они являются эквивалентными первому варианту.

Обработка полученных значений K_{2U} с проводилась с помощью программы для ЭВМ «Обработка

Рис. 3. Результаты обработки значений K_{2U} в сети 0,4 кВ при перегрузке фаз А и ВРис. 4. Результаты обработки значений K_{2U} в сети 10 кВ при перегрузке фаз А и В

экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности». В данной программе рассчитаны параметры закона распределения исследуемой случайной

величины, а также определены вероятности появления кондуктивной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности при данных массивах значений K_{2U} [7]. На данную программу для ЭВМ

Результаты обработки значений K_{2U} в сетях 10/0,4 кВ при разных вариантах перегрузки

№ п/п	Параметры	Перегружены фазы А и В		Перегружены фазы В и С		Перегружены фазы А и С	
		Сеть 0,4 кВ	Сеть 10 кВ	Сеть 0,4 кВ	Сеть 10 кВ	Сеть 0,4 кВ	Сеть 10 кВ
1	Максимальное значение $K_{2U \max}$, %	5,8	3,0	6,7	3,9	6,7	3,9
2	Минимальное значение $K_{2U \min}$, %	1,8	1,0	3,4	2,0	3,1	1,7
3	Математическое ожидание $M[K_{2U}]$, %	3,48	2,03	4,79	2,83	4,56	2,62
4	Среднеквадратичное отклонение $\delta[K_{2U}]$, %	0,76	0,41	0,71	0,41	0,71	0,44
5	Вероятность выхода за нормально допустимое значение K_{2UH} , %	72	56	12	100	16	96
6	Вероятность выхода за предельно допустимое значение K_{2UL} , %	26	0	88	0	84	0
7	Вероятность кондуктивной ЭМП по нормально допустимому значению $K_{2U'}$, %	67	51	7	95	11	91
8	Вероятность кондуктивной ЭМП по предельно допустимому значению $K_{2U'}$, %	26	0	88	0	84	0
9	Вероятность кондуктивной ЭМП $K_{2U'}$, %	93	51	95	95	95	91

получено свидетельство о государственной регистрации [8].

Программа для ЭВМ, разработанная средствами LabVIEW, имеет удобный интерфейс и позволяет получить все необходимые значения для оценки результатов измерений ПКЭ. Отличительными особенностями данной среды программирования по сравнению с подобными средствами являются: интуитивно понятная графическая среда, не требующая глубоких знаний программирования; большое количество готовых модулей для моделирования физических процессов; возможность представления физических процессов передаточными функциями; совместимость с MatLab (Simulink); большое количество виртуальных приборов и средств управления; автоматизация расчетов и вывода их результатов (графики, диаграммы, осциллограммы, гистограммы и т.д.) [7]. Интерфейс результатов обработки значений K_{2U} в сетях низкого и среднего напряжения для первого варианта перегрузки представлены на рис. 3–4.

Для наилучшего восприятия сравнительного анализа результатов обработки значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности, все полученные значения для сетей 10/0,4 кВ при разных вариантах перегрузки фаз сведены в табл. 2.

Анализ полученных данных показывает, что во всех вариантах перегрузки в сетях как низкого, так и среднего напряжения присутствует вероятность выхода за нормально допустимое значение коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности и вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по нормально до-

стимому значению, а следовательно, и вероятность кондуктивной ЭМП по данному коэффициенту.

Однако в сети 10 кВ для всех вариантов перегрузок значения математического ожидания и среднеквадратичного отклонения ниже, чем в сети 0,4 кВ. Также в сети 10 кВ, в отличие от сети 0,4 кВ, для всех вариантов перегрузок вероятность выхода за предельно допустимое значение коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности равна нулю. Следовательно, вероятность кондуктивной ЭМП по предельно допустимому значению коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 10 кВ также равна нулю. Это свидетельствует о том, что, согласно теории о критерии распределения в электроэнергетической системе кондуктивных низкочастотных ЭМП в смежную сеть, помеха, переходящая из одной смежной сети в другую (в нашем случае от сети 0,4 кВ в сеть 10 кВ) гасится в силовом трансформаторе на определенное значение коэффициента [9–10].

Библиографический список

1. Данилов Г. А., Денчик Ю. М., Иванов М. Н., Ситников Г. В. Повышение качества функционирования линий электропередачи: моногр. / под ред.: В. П. Горелова, В. Г. Сальникова. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. акад. водн. транспорта, 2013. 559 с. ISBN 978-5-8119-0530-0.
2. Машкин А. Г., Машкин В. А. Проблемы качества и учёта электроэнергии на границах системы тягового электроснабжения // Промышленная энергетика. 2007. № 11. С. 29–31.
3. Ситников Г. В. Повышение качества функционирования электрических сетей общего назначения с низкими ин-

тегральными характеристиками в регионах с суровым климатом: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Новосибирск, 2014. 167 с.

4. Соколов М. М. Совершенствование методов контроля состояния электротехнического комплекса электроснабжения устройств автоматики электрифицированных железных дорог: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Омск, 2010. 163 с.

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

6. Наумов И. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения (теоретические обобщения): моногр. / ред. В. И. Тесля. Иркутск, 2001. 217 с.

7. Суранов А. Я. LabVIEW 8.20. Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2007. 536 с. ISBN 5-94074-207-6.

8. А. с. № 2016661752 Российская Федерация. Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности: прогр. для ЭВМ / Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А., Зубанова Н. В., Иванов Д. М., Руппель А. А., Сальников В. Г. № 2016619225; заявл. 30.08.16; опубл. 20.11.16.

9. Рягузов М. И. Система автоматизации проектирования устройств управления промышленными установками первичной переработки нефти: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12. Омск, 2011. 187 с.

10. Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / под ред.: В. П. Горелова, Н. Н. Лизалека. Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2006. 432 с. ISBN 5-8119-0201-0.

АНТОНОВ Александр Игоревич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрообо-

рудование» Омского института водного транспорта (ОИВТ) (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта.

SPIN-код: 5682-8929

AuthorID (РИНЦ): 842787

ДЕНЧИК Юлия Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ).

ЗУБАНОВ Дмитрий Александрович, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

SPIN-код: 7998-0625

AuthorID (РИНЦ): 573576

ЗУБАНОВА Наталья Валерьевна, аспирантка кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» СГУВТ.

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

SPIN-код: 3386-9834

AuthorID (РИНЦ): 423886

Адрес для переписки: aleksandr_antonov_85@mail.ru

Для цитирования

Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А., Зубанова Н. В., Руппель А. А. Моделирование несимметричных режимов работы электрической сети и обработка результатов с помощью программы для ЭВМ // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 48–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-48-54.

Статья поступила в редакцию 29.01.2018 г.

© А. И. Антонов, Ю. М. Денчик, Д. А. Зубанов, Н. В. Зубанова, А. А. Руппель