

УДК 621.311

**Антонов Александр Игоревич<sup>1</sup>**, старший преподаватель,

e-mail: [kese@nsawt.ru](mailto:kese@nsawt.ru)

**Денчик Юлия Михайловна<sup>2</sup>**, к.т.н., доцент,

e-mail: [kese@nsawt.ru](mailto:kese@nsawt.ru)

**Иванова Елена Васильевна<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор, заведующая кафедры «Электроэнергетических систем и электротехники»,

e-mail: [dimo4ka1996@mail.ru](mailto:dimo4ka1996@mail.ru)

**Переладов Михаил Евгеньевич<sup>2</sup>**, ассистент кафедры,

e-mail: [pereladoff2@yandex.ru](mailto:pereladoff2@yandex.ru)

**Сальников Василий Герасимович<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор,

e-mail: [ygsalnikovese@mail.ru](mailto:ygsalnikovese@mail.ru)

<sup>1</sup>Омский институт водного транспорта – филиал Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия

## НЕСИММЕТРИЯ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ КАК ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

*Аннотация.* В статье раскрывается актуальность проблемы несимметрии линейных напряжений в замкнутых электрических сетях с распределенной генерацией как источник электромагнитных помех, в частности, проблема электромагнитной совместимости береговых и судовых технических средств. Представлено математическое описание процесса возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности и алгоритм его нахождения.

*Ключевые слова:* кондуктивная электромагнитная низкочастотная помеха, показатели качества электроэнергии, математическая модель, программирование в среде LabVIEW, электромагнитная совместимость.

### 1. Введение. Состояние проблемы

В соответствии с «Планом развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 г. № 3120-р предусматривается развитие инфраструктуры прибрежных территорий Северного морского пути, в частности, строительство причалов, современных портов, перегрузочных центров, на основе реализации мероприятий по электрификации этих объектов. При этом качество электроэнергии должно регулироваться стандартом ГОСТ 32144-2013. Значительная роль в выполнении этого плана отводится судам технического флота и плавающим объектам.

Эффективная работа этих судов в акватории портов наблюдается при их электроснабжении с берега. Как результат возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) береговых и судовых технических средств. Причина этого явления - незначительная интегральная характеристика замкнутых береговых электрических сетей 0,4-10 кВ (полная мощность трёхфазного короткого замыкания) с распределенной

генерацией и интенсивная эскалация нелинейной нагрузки [1]. Поэтому проблема ЭМС береговых сетей и судовых электрических сетей как рецепторов является актуальной.

## 2. Постановка задачи

Электроснабжение судна с берега осуществляется в соответствии с договором на энергоснабжение, в котором предусмотрена точка передачи электрической энергии (ГОСТ 32144-2013). Это граница деления имущества между собственниками по признаку обладания на основании предусмотренного закона. Показатели качества электрической энергии согласовываются и заносятся в договор. В этом случае они воспринимаются в качестве показателей уровней электромагнитной совместимости для кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП) и предельных величин этих помех, возникающих под действием работы оборудования электрических установок береговой и судовой электрической сети [2, 3].

ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95) классифицирует ЭМП, в соответствии с которым несимметрия напряжений в трёхфазных системах относится к кондуктивным низкочастотным ЭМП. Это одна из наиболее опасных ЭМП для электродвигательной нагрузки судовой электрической сети, влияющая на форму кривой напряжения, создающая утяжеленный режим работы. Распространяется по проводникам электропередачи «берег – техническое судно». Различаются понятия: нормируемые показатели качества электроэнергии (КЭ), которые можно регулировать в определённых диапазонах, и кондуктивные низкочастотные ЭМП, которые подлежат подавлению с целью обеспечения допустимого уровня ЭМС технических средств, необходимо для повышения технико-экономических показателей работы судов технического флота, сохранения жизни и здоровья людей [4-7].

В связи с изложенным, задачей данной статьи является исследование несимметрии линейных напряжений в замкнутых электрических сетях с распределенной генерацией как источника электромагнитных помех.

## 3. Результаты. Математическая модель появления кондуктивной ЭМП

В точке передачи электрической энергии с берега контролируются параметры линейного напряжения. Процесс формирования кондуктивных низкочастотных ЭМП по несимметрии линейных напряжений изложим при следующих практических условиях.

1 В системах линейных напряжений трёх и четырёхпроводных трёхфазных сетей составляющие нулевой последовательности отсутствуют. Объясняется это тем, что векторная сумма линейных напряжений неизменно равна нулю

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0. \quad (1)$$

В связи с этим показателем КЭ, наиболее существенно описывающий несимметрию линейных напряжений по ГОСТ 32144-2013 непосредственно связывает коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ .

2 Пусть показатели несимметрии напряжений  $K_{2U}$  установленные ГОСТ 32144-2013 и согласованные в определённом порядке сторонами договора на энергоснабжение, равны между собой. При этом нормированный показатель  $K_{2U}$  становится уровнем ЭМС технических средств. Нормально допустимая несимметрия напряжений оценивается количественным значением коэффициента  $K_{2Uн} \leq 2 \%$ , а предельно допустимые значения, соответственно,  $K_{2Uп} < 4 \%$ .

3 К оценке электромагнитной обстановки (ЭМО) в характерной точке сети допускаются значения  $K_{2U}$ , полученные усреднением в промежутке времени 600 сек в течение недели (168 ч непрерывного измерения), полученные в процессе измерений

поверенными приборами показателей КЭ (например, Ресурс-ПКЭ) или измерительно-вычислительными комплексами (ИВК).

Параметр  $K_{2U}$  в трёхфазной электрической сети является перманентно распределённой вероятностной случайной величиной, обусловленными многими случайными событиями. Эта величина связана с полем событий, зависит от таблицы вероятностей [8]

$$\begin{pmatrix} K_{2U1}, & K_{2U2}, & K_{2U3}, & \dots, & K_{2Ui}, & \dots, & K_{2Un} \\ P_1, & P_2, & P_3, & \dots, & P_i, & \dots, & P_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $K_{2U1}, K_{2U2}, K_{2U3}, \dots, K_{2Ui}, \dots, K_{2Un}$  – величины коэффициента  $K_{2U}$  полученные усреднением в промежутке времени 600 сек в течение недели, %;  
 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_n$  – вероятности возникновения этих величин.

При достижении уровня, превышающего нормальные количественные показатели коэффициента  $K_{2U}$ , часть поля событий (2) характеризует кондуктивную низкочастотную ЭМП, возникшую благодаря отличительными особенностями технологического производственного процесса, трансфер, распределения и электропотребления (рисунок 1).

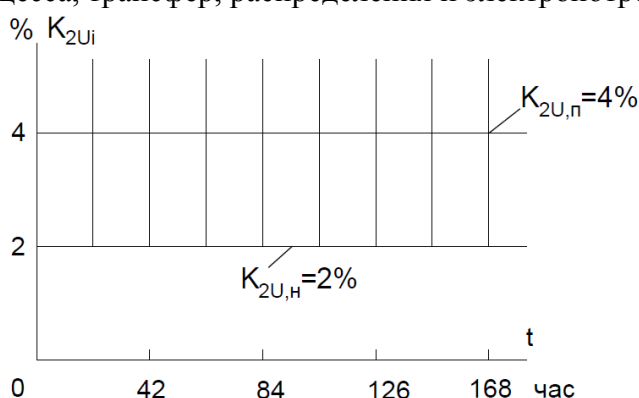


Рис. 1. Границы возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $K_{2U}$

Процесс образования кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту  $K_{2U}$  выражается системой уравнений

$$K_{2U} \left[ \begin{array}{l} P(K_{2U,н} < K_{2Ui} < K_{2U,п}) > 0,05; \\ P(K_{2U,п} \leq K_{2Ui} < \infty) \neq 0 \end{array} \right] \subset \delta K_{2U}, \quad (3)$$

где  $\delta K_{2U}$  – кондуктивная низкочастотная ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности, %.

А именно: ссылаясь на ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95) величина  $\delta K_{2U}$  формируется в электрической сети, если в течение расчётного времени (168 ч) вероятность  $P(K_{2U,н} \leq K_{2Ui} < K_{2U,п})$  установления  $K_{2Ui}$  в пределах (2 % <  $K_{2Ui}$  < 4 %) превышает 0,05, а вероятность  $P(K_{2U,п} \leq K_{2Ui} < \infty)$  установления  $K_{2Ui}$  в пределах (4 % ≤  $K_{2Ui}$  < ∞) не равна нулю. Помеха  $\delta K_{2U}$  появляется в результате выполнении только одного из перечисленных условия.

Функции распределения вероятностей, приведённые в математической модели (3), после интегрирования представлены формулами

$$P(K_{2U,н} < K_{2Ui} < K_{2U,п}) = \int_2^4 \psi(K_{2U}) d(K_{2U}), \quad (4)$$

$$P(K_{2U,\Pi} < K_{2Ui} < \infty) = \int_4^{\infty} \psi(K_{2U}) d(K_{2U}), \quad (5)$$

где  $\psi(K_{2U})$  – плотность вероятности распределения величины  $K_{2U}$ , 1/%.

Плотность вероятности распределения является неотрицательной функцией. Интегрируемая функция  $\psi(K_{2U})$  удовлетворяет двум условиям

$$\begin{cases} \psi(K_{2U}) \geq 0, \\ \int_{-\infty}^{\infty} \psi(K_{2U}) d(K_{2U}) = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Для характеристики помехи  $\delta K_{2U}$  необходимо определить моменты распределения случайной величины  $K_{2U}$  и вероятность появления этой помехи. Для достижения цели воспользуемся положениями теории производящих функций [9].

Действительные переменные коэффициента  $K_{2U}$ , которые в зависимости от полученных результатов измерений, принимают различные значения  $K_{2Ui}$  (2), являются дискретными случайными величинами. Характеризуются значениями вида 0, 1, 2, 3..., т.е. относятся к натуральным числам. Это является основанием для того, чтобы вместо характеристической функций случайных величин  $K_{2U}$  использовать производящую функцию для нахождения моментов распределения.

С позиции решаемой задачи наряду с величиной  $K_{2U}$ , зависящей от определённого закона распределения теории вероятностей и математической статистики (2), представим кондуктивную низкочастотную ЭМП  $\delta K_{2U}$  в показательной форме комплексной величины [10]

$$\delta K_{2U} = e^{jtK_{2U}}. \quad (7)$$

Математическое ожидание величины  $\delta K_{2U}$  будет некоторой функцией от  $t$ , т.е.

$$M[\delta K_{2U}] = M[e^{jtK_{2U}}], \quad (8)$$

где  $t$  – действительный параметр, характеризующий принадлежность  $K_{2U}$  к распределению (2);

$j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Эта функция, в нашем случае, является производящей функцией случайной величины  $K_{2U}$ . Значит, под производящей функцией случайной величины  $K_{2U}$  понимается математическое ожидание некой случайной комплексной величины  $e^{jtK_{2U}}$ , которая имеет свойства, аналогичные свойствам характеристической функции:

- равномерно непрерывна на всей действительной оси: при  $t=0$   $M[e^{jtK_{2U}}] = 1$ ; при  $(-\infty < t < \infty)$   $M[e^{jtK_{2U}}] \leq 1$ ;
- если случайное значение  $K_{2U}$  обладает моментом распределения порядка  $n$ , то она  $n$  раз дифференцируется по  $t$ .

Помимо сказанного, дополнительно к характеристике производящей функции выделим из теории этих функции два основных положения. Первое утверждает, что производящая функция однозначно определяет распределение вероятностей так, что не только каждому закону распределения отвечает определённая производящая функция, но и, наоборот, каждой производящей функции соответствует единственное распределение. Второе положение утверждает, что если последовательность законов распределения  $P_1(K_{2U,\Pi} < K_{2U,i} < K_{2U,\Pi}), P_2(K_{2U,\Pi} < K_{2U,i} < K_{2U,\Pi}), \dots$  производящих функций сводится к

производящей функции закона  $P(K_{2U,H} < K_{2U,i} << K_{2U,\Pi})$ , то и сами законы  $P_1(K_{2U,H} < K_{2U,i} < K_{2U,\Pi})$ ,  $P_2(K_{2U,H} < K_{2U,i} < K_{2U,\Pi})$ ... сходятся к закону  $P(K_{2U,H} < K_{2U,i} < K_{2U,\Pi})$ .

Таким образом, на основании теоремы о равенстве начальных моментов, а также следствия о равенстве центральных моментов распределения непрерывной случайной величины и её производящей функции имеем равенства

$$M[K_{2U}] = M[\delta K_{2U}]; \quad (9)$$

$$\sigma[K_{2U}] = \sigma[\delta K_{2U}], \quad (10)$$

где  $M[K_{2U}]$ ,  $M[\delta K_{2U}]$  – математическое ожидание соответственно величины

$K_{2U}$  и  $\delta K_{2U}$ , %;

$\sigma[K_{2U}]$ ,  $\sigma[\delta K_{2U}]$  – средние квадратические отклонения этих величин, %.

Из второго положения вытекает утверждение о том, что плотность вероятности распределения непрерывной случайной величины  $K_{2U}$ , характерная для определённого закона распределения случайной величины теории вероятностей, соответствует плотности вероятности распределения производящей функции  $M[\delta K_{2U}]$ . Как результат, можно записать

$$\psi\{K_{2U}, M[K_{2U}], \sigma[K_{2U}]\} = \psi\{\delta K_{2U}, M[\delta K_{2U}], \sigma[\delta K_{2U}]\}. \quad (11)$$

Вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП  $\delta K_{2U}$  представлена формулой

$$P(\delta K_{2U}) = P(K_{2U,H} < K_{2U,i} < K_{2U,\Pi}) + P(K_{2U,\Pi} < K_{2U,i} < \infty) - 0,05. \quad (12)$$

Полученные параметры кондуктивной низкочастотной ЭМП  $M[\delta K_{2U}]$ ,  $\sigma[\delta K_{2U}]$  и её вероятность возникновения  $P[\delta K_{2U}]$  за измеренный период времени характеризует эту помеху как случайную величину.

#### 4. Обсуждение

На основании изложенного разработаны: методика обработки полученных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту  $K_{2U}$  (свидетельство о регистрации электронного ресурса № 2016661752); алгоритм определения этой помехи; программа для ЭВМ по расчету параметров, характеризующих описываемую ЭМП (RU2016661752). Эта программа была разработана в среде программирования LabVIEW - графической среде и платформе для разработки, которая позволяет управлять, синхронизировать и иерархически структурировать алгоритм обмена данных с оборудованием, содержит математические библиотеки, позволяющие выполнять сложный анализ данных [11-14]. Эта компьютерная программа позволяет пользователю оценить результаты измерений, полученные индикатором КЭ. Помимо этого, большое количество современных индикаторов качества электроэнергии позволяют результаты измерений экспортировать в формат XLS. Разработка программного обеспечения выполняется с помощью функциональных блок-схем (блок-диаграмм) с использованием графического языка «G», основанного на модели потоков данных. Программа способна работать на IBM-PC - совместимых ПК на платформе многих операционных систем.

На рисунке 2 показана структурная схема программы, которая представляет собой набор взаимосвязанных блоков и операторов, которые заточены на определенные задачи, такие как имитация вещественных процессов, представление физических процессов с помощью операторных функций и констант, визуализация полученных данных и т.д. Компьютерная программа осуществляет совместимость с MatLab (Simulink), благодаря виртуальным инструментам и элементов управления помогает пользователю легко справиться с поставленными задачами, автоматизирует вычисления и отображение



визуализированных результатов, в частности, вывод значений параметров и отображение осциллограмм [15]. Представлен также алгоритм симметрирования напряжений в электрической сети на основе нахождения наиболее оптимальной схемы электроснабжения конечных потребителей (свидетельство о государственной регистрации электронного ресурса №23664).

Изложенное свидетельствует о широкой апробации решения поставленной задачи.

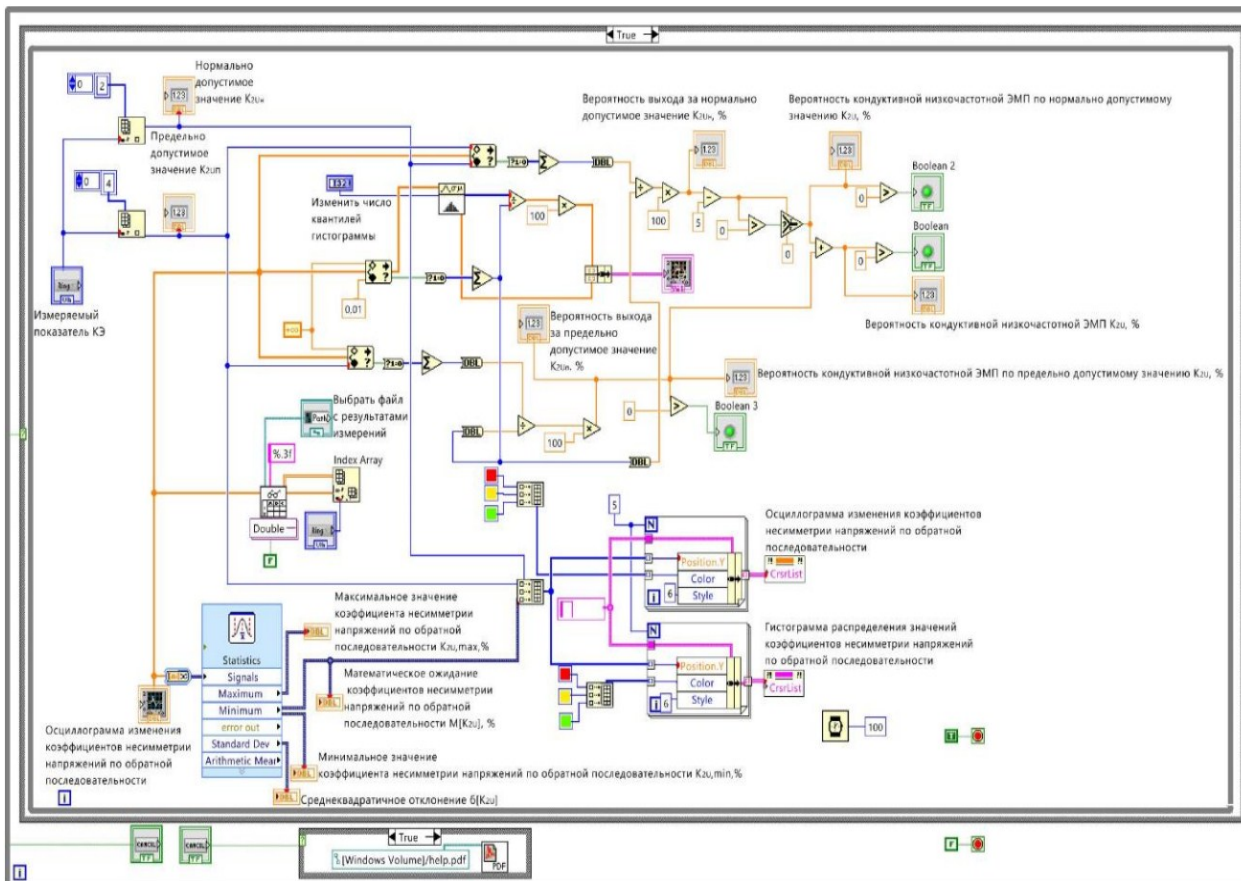


Рис.2. Внутренняя структура программы

## Выводы

1. Кондуктивная низкочастотная ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности  $\delta K_{2U}$ , характеризующая электромагнитный процесс в трёхфазных системах при возникновении несимметрии, обладает следующими свойствами:

- является стохастической величиной, определённой путём математической обработки результатов измерений ИВК или другими поверенными приборами значений коэффициентов  $K_{2U}$  (усреднённых в промежутке 600 сек) за расчётный период, равный времени интервала в одну неделю (168 ч непрерывного измерения);
- является локальным параметром ЭМО в электроэнергетической системе (наблюдается в основном в сетях среднего и низкого напряжений);
- характеризуется интегральной функцией распределения (плотностью вероятности распределения, математическим ожиданием, средним квадратическим отклонением) и вероятностью появления за расчётный период наблюдения, учитывающий допустимую вероятность отклонения  $K_{2U}$  от нормированного (согласованного) значения; область определения этой функции формирует совокупность значений  $K_{2U}$  поля событий за неделю;

- имеет следующие параметры распределения:  $M[\delta K_{2U}]$  – математическое ожидание, %;  $\sigma[\delta K_{2U}]$  – среднее квадратическое отклонение, %;  $P(\delta K_{2U})$  – вероятность появления за расчётный период, о.е.;
  - распространяется по каналу гальванической связи: по силовым цепям линий электропередачи «берег – судно технического флота»;
  - имеет широкую область распространения в электрических сетях 0,4-10 кВ.
2. С позиции обеспечения ЭМС технических средств выделяются следующие наиболее важные свойства кондуктивной низкочастотной ЭМП  $\delta K_{2U}$ :
- технические средства в электрических сетях, функционирование которых основано на законах электротехники, радиотехники и электроники, являются рецепторами, реагирующими на эту кондуктивную низкочастотную ЭМП;
  - характеризует недопустимый уровень ЭМС технических средств по коэффициенту  $K_{2U}$ ;
  - являются критериями качества функционирования технических средств в электрических сетях, обусловленного несимметрией напряжений;
  - подлежит подавлению.

### Список литературы:

1. A. Eslami, A three-phase comprehensive methodology to analyze short circuits, open circuits and internal faults of transformers based on the compensation theorem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 96(), 238–252, (2018) doi:10.1016/j.ijepes.2017.09.039
2. R. Smolenski, P. Lezynski, J. Bojarski, W. Drozd, L. Choon Long, Electromagnetic compatibility assessment in multiconverter power systems - Conducted interference issues, *Measurement*, 165(), 108119, (2020) doi:10.1016/j.measurement.2020.108119
3. A. Bhakthavachala, S. Tara kalyani, K. Anuradha, A Simplified Filter Topology for Compensating Common Mode Voltage and Electromagnetic Interference in Induction Motor Drives, *Energy Procedia*, 117(), 377–384, (2017) doi:10.1016/j.egypro.2017.05.150
4. M. Drouineau, N. Maïzi, V. Mazauric, Impacts of intermittent sources on the quality of power supply: The key role of reliability indicators, *Applied Energy*, 116(), 333–343, (2014) doi:10.1016/j.apenergy.2013.11.069
5. E. Heylen, G. Deconinck, D. Van Hertem, Review and classification of reliability indicators for power systems with a high share of renewable energy sources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97(), 554–568, (2018) doi:10.1016/j.rser.2018.08.032
6. S. Wang, H. Chen, A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using deep convolutional neural network, *Applied Energy*, 235(), 1126–1140, (2019) doi:10.1016/j.apenergy.2018.09.160
7. N. Onat, H. Bayar, The sustainability indicators of power production systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3108–3115, (2010) doi:10.1016/j.rser.2010.07.022
8. J. Guo, X. Du, Reliability sensitivity analysis with random and interval variables, *International journal for numerical methods in engineering*, 78(13), 1585–1617, (2009) doi:10.1002/nme.2543
9. Tian-Xiao He, Leetsch C. Hsu, Peter J.-S. Shiue, Symbolization of generating functions; an application of the Mullin–Rota theory of binomial enumeration, *An International Journal Computers & Mathematics with Applications*, 54(5), 664–678, (2007) doi:10.1016/j.camwa.2006.12.034
10. M. I. Ganzburg, Exact errors of best approximation for complex-valued nonperiodic functions, *Journal of Approximation Theory*, (), S002190451830008X, (2018) doi:10.1016/j.jat.2018.02.002

11. M. Stojcev Cory L. Clark, LabVIEW Digital Signal Processing and Digital Communications (2005) McGraw Hill, New York 0-07-144492-0 205 pp., Hardcover, plus XIII, ISBN: 0-07-144492-0, 48(3), 490–491, (2008) doi:10.1016/j.microrel.2006.08.009
12. M. Weislik, K. Suchenia, M. S. Laskawski, Method of programming of sequential control systems using LabVIEW environment. IFAC-PapersOnLine, 49(25), 476–481, (2016) doi:10.1016/j.ifacol.2016.12.073
13. C. Wagner, S. Armenta, B. Lendl, Developing automated analytical methods for scientific environments using LabVIEW, Talanta, 80(3), 1081–1087, (2010) doi:10.1016/j.talanta.2009.08.018
14. G. Faraco, L. Gabriele, Using LabVIEW for applying mathematical models in representing phenomena, Computers & Education, 49(3), 856–872, (2007) doi:10.1016/j.compedu.2005.11.025
15. L. Ashok Kumar, V. Indragandhi, Y. Uma Maheswari, MATLAB®/Simulink, Software Tools for the Simulation of Electrical Systems, 1–35, (2020) doi:10.1016/b978-0-12-819416-4.00001-6

## **LINE VOLTAGE IMMETRY IN CLOSED ELECTRIC NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION AS A SOURCE OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE**

Alexander I. Antonov, Yulia M. Denchik, Elena V. Ivanova, Mikhail E. Pereladov, Vasily G. Salnikov

*Annotation.* The article reveals the relevance of the problem of asymmetry of line voltages in closed electrical networks with distributed generation as a source of electromagnetic interference, in particular, the problem of electromagnetic compatibility of coastal and ship technical equipment. A mathematical description of the process of the occurrence of a conductive low-frequency EMF by the voltage unbalance coefficient in the reverse sequence and an algorithm for its finding are presented.

*Keywords:* conducted electromagnetic low-frequency interference, power quality indicators, mathematical model, programming in the LabVIEW environment, electromagnetic compatibility.