

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-14

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

А. И. Антонов¹, Ю. М. Денчик^{2,a}, Е. В. Иванова^{2,a}, М. Н. Романов^{2,b}, В. Г. Сальников³

¹ Омский институт инженеров водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Омск, Российская Федерация, aleksandr_antonov_85@mail.ru

² Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Российская Федерация,

^a kese@nsawt.ru, ^b m.n.romanov@nsawt.ru

³ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация, Salnikov_vg@surgu.ru

Аннотация: рассматривается электромагнитная обстановка в электрических сетях общего назначения. Анализ показывает, что в настоящее время существует задача обеспечения электромагнитной совместимости технических средств. Одним из параметров, влияющих на качество электрической энергии, является несимметрия напряжений в трехфазных сетях, приводящая к отклонениям величины напряжения, росту потерь, ухудшению условий работы электрооборудования. Разработка и использование на производстве способов и устройств, позволяющих повысить качество электроэнергии, приобретает на этом фоне неоспоримую актуальность. В рамках концепции «Интеллектуальные сети» среди требований, предъявляемых к распределительным сетям, устройствам потребления и производства электроэнергии, ее передаче к конечному потребителю, можно выделить необходимость повышения эффективности применения новых технологий и электротехнических устройств, использования ресурсов с максимальной эффективностью. В работе приведено описание разработанной программы для ЭВМ. Достоинством данной программы является полная совместимость с программами Matlab (приложение Simulink), Mathcad, а также большое число виртуальных приборов и средств управления. Программа в автоматическом режиме производит необходимые вычисления и выводит полученные результаты в удобной для пользователя форме: в виде графиков, осциллограмм, гистограмм и др.

Ключевые слова: искажение симметричности питающего напряжения, показатели качества электроэнергии, электромагнитная низкочастотная кондуктивная помеха, совместимость технических средств электромагнитная, несимметричные режимы, электрическая сеть.

Для цитирования: Антонов А. И., Денчик Ю. М., Иванова Е. В., Романов М. Н., Сальников В. Г. Развитие электрических сетей на основе компьютерного моделирования несимметричных режимов. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):123–129. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-14.

ASYMMETRIC MODE SIMULATION FOR ELECTRIC GRID DESIGN

A. I. Antonov¹, Yu. M. Denchik^{2,a}, E. V. Ivanova^{2,a}, M. N. Romanov^{2,b}, V. G. Salnikov³

¹ Water Transport Engineering School, Siberian State University of Water Transport, Omsk, Russian Federation, aleksandr_antonov_85@mail.ru

² Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation,

^a kese@nsawt.ru, ^b m.n.romanov@nsawt.ru

³ Surgut State University, Surgut, Russian Federation, Salnikov_vg@surgu.ru

Abstract: this study deals with the electromagnetic environment of electric grids and electromagnetic compatibility issues. One of the electric power quality indicators is the voltage asymmetry in 3P grids, which leads to voltage deviations, increased losses, and deterioration of the electrical equipment operating conditions. There is need for methods and devices to increase the quality of electric power. Within the Smart Grid concept, one of the key requirements is to increase the resource utilization efficiency, introduce advanced technologies and equipment. The paper presents the software developed by the authors. It is fully compatible with Matlab (Simulink application), MathCAD, as features a large number of virtual instruments and controls. The software is automatic and user-friendly. The reports are curves, oscillograms, histograms, etc.

Keywords: voltage asymmetry, power quality, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility, software, electromagnetic environment, asymmetric modes, electrical network.

Cite this article: Antonov A. I., Denchik Yu. M., Ivanova E. V., Romanov M. N., Salnikov V. G. Asymmetric Mode Simulation for Electric Grid Design. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):123–129. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-14.

Эффективная и надежная работа электрооборудования напрямую связана с показателями качества электроэнергии в сетях распределения. Проблема обеспечения качества электрической энергии многогранна. Необходимо изучение источников и видов электромагнитных помех в исследуемых сетях, степени восприимчивости электрооборудования к помехам и способов воздействия на них, разработка нормативной документации, в которой определены приемлемые уровни показателей качества электрической энергии, разработка методики и средств для измерений показателей качества электроэнергии.

Среди основных источников электромагнитных помех, распространяемых по проводам и связанных с низкими частотами, вызывающих искажение синусоидальности формы кривой питающего напряжения, можно выделить повсеместно использующиеся преобразователи и стабилизаторы, имеющие в своей конструкции полупроводниковые вентиляльные элементы (диоды, тиристоры, транзисторы), обладающие ярко выраженной нелинейностью вольт-амперных характеристик. Причем такие типы преобразователей получают в последнее время все большую область применения, включая и бытовых потребителей.

В электрических сетях напряжением 110 кВ и больше используется концепция «Сильные сети», построенная на базе «Flexible Alternative Current Transmission System» (FACTS) и направленная в большинстве случаев на увеличение пропускной способности линии электропередачи. Для электрических сетей общего назначения, характеризуемых средними величинами напряжений, применяется технология «Интеллектуальные сети», определяющая направление развития сетей до 2030 года.

Концепцию «Smart Grid» (интеллектуальная сеть) можно представить как однородный автоматизированный комплекс, объединяющий в своем составе производство, распределение и потребление электрической энергии. Такая система должна управляться через компьютерный узел, куда в режиме реального времени должна поступать информация с цифровых датчиков, соответствующая уровню потребления электроэнергии. Применение данной концепции позволяет увеличить до максимума эффективность использования различного вида ресурсов, технического оборудования и технологий на всех этапах электроснабжения: производстве, распределении и потреблении электрической энергии. Такая задача может быть решена при высоко развитой системе математического моделирования различных режимов работы электроэнергетической системы, что позволит обеспечить электромагнитную совместимость технических средств.

Показатели качества электроэнергии определяются множеством параметров, к одному из них относится несимметрия напряжения в трехфазных сетях. Явление несимметрии напряжения приводит к отклонениям величины напряжения в сети, увеличению потерь в самой сети и подключенном к ней электрооборудовании, ухудшению условий работы электрооборудования и т. п. Разработка и использование на производстве способов и устройств, позволяющих повысить качество электроэнергии, приобретает на этом фоне неоспоримую актуальность.

Задача повышения технико-экономических показателей электрических сетей с помощью существенного понижения несимметрии напряжения играет существенную роль, при этом актуальным является решение научно обоснованной задачи по разработке средств контроля и методики учета и уменьшения несимметрии напряжения в сетях.

С целью мониторинга показателей качества электрической энергии в режиме реального времени, особенно связанных с искажением симметричности питающего напряжения, был разработан метод, позволяющий определять кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи, вызванные искажением симметричности питающего напряжения. На основании данного метода был создан алгоритм и разработана программа для ЭВМ, позволяющая определять кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи (K_{2U}) по значению коэффициента искажения синусоидальности питающего напряжения по обратной последовательности.

В основу разработки алгоритма расчета кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех заложены требования ГОСТ 32144-2013. При построении алгоритма учитывались предельные и нормально допустимые значения искажений синусоидальности питающего напряжения в зависимости от продолжительности периода наблюдений за параметрами электрической сети, производимых с помощью сертифицированных средств наблюдений.

Значение величины кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи K_{2U} определим по формуле:

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

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

С учетом теоремы непрерывности величина K_{2U} является непрерывно распределенной случайной величиной электрической сети, появление которой связано с множеством случайных событий. Эта величина непосредственно связана с полем событий, и ее можно описать следующей таблицей вероятностей:

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

где $K_{2U1}, K_{2U2}, K_{2U3}, \dots, K_{2Ui}, \dots, K_{2Un}$ — значения коэффициента K_{2U} в течение расчетного времени, %; $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_n$ — вероятность появления этих значений.

Как видно из выражения (2), в случае, когда значение искомой величины (K_{2U}) превышает значения, регламентированные ГОСТ 32144–2013 как нормально допустимые, некоторая часть рассматриваемого поля событий свидетельствует о возникновении в рассматриваемой сети электромагнитной помехи, связанной с низкими частотами и распространяемой по проводам. Причиной ее возникновения может являться особенность технологии производственного процесса, способы передачи электроэнергии и ее распределения, особенности технических средств со стороны потребителя (рисунок 1) в исследуемых сетях общего назначения. Для определения действительного значения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи, возникшей в рассматриваемой сети, могут быть использованы только методы математической статистики.

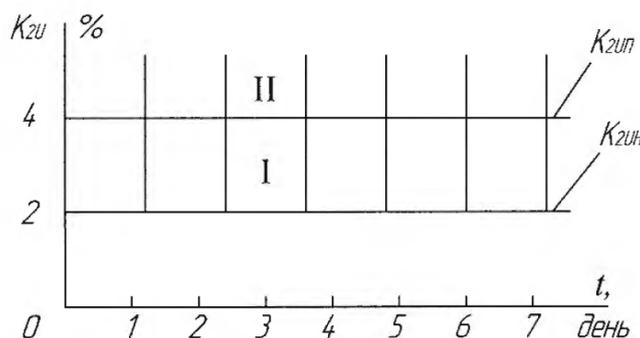


Рис. 1. Диаграмма области возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности

Процесс возникновения исследуемой помехи можно математически описать, воспользовавшись моделью

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

где δK_{2U} — кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха по K_{2U} , %.

Проведенные с использованием формулы (2) расчеты показали, что если искомая вероятность величины K_{2U} превышает значение 0,05, то кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха находится в диапазоне $2 \div 4$ %, а при расчетном значении вероятности, превышающем 4 %, кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха принимает значение, отличное от нуля. Таким образом, о наличии кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи в исследуемой электрической сети можно судить, даже если выполняется только одно из приведенных выше условий.

Следовательно, можно констатировать, что использование системы уравнений (3) в исследовании электрической сети с искажением симметричности напряжений показывает наличие кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, если расчетная величина выходит за пределы значений, нормируемых ГОСТ.

Вероятность распределения случайной величины в промежутке между предельно допустимыми и нормально допустимыми значениями можно определить по формуле:

$$P(K_{2U} < K_{2U} < K_{2U}) = \int_2^4 \psi(K_{2U})d(K_{2U}). \quad (4)$$

Для интервала $(K_{2U}; \infty)$ эта функция может быть представлена в следующем виде:

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

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

По предложенному алгоритму расчета вероятности возникновения электромагнитной помехи, распространяемой по проводам и связанной с низкими частотами искажений питающего напряжения, разработана программа для персональных компьютеров «Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности», которая получила свидетельство о государственной регистрации [1]. При создании программы для ЭВМ была использована система графического программирования LabVIEW, т. е. система программирования с помощью графических объектов, включающая в себя возможность синхронизации, обмена данными с внешними устройствами, управления и имеющая в своем составе множество библиотек математических функций, с помощью которых можно комплексно анализировать полученные данные, в том числе: во времени, по амплитуде, спектру, порядку и т. п. [2].

Одной из задач, решаемых в ходе разработки программы, являлась задача разработки такого дизайна диалоговых окон, который не требовал бы от пользователя программы специальных знаний программирования, что было реализовано с помощью системы программирования LabVIEW. При работе с программой нет необходимости вводить вручную значения, полученные при измерениях, так как многие применяемые в настоящее время измерительные устройства, такие как «Омск-М», обеспечивают формирование результатов изучения в широко используемом формате Excel [2].

При разработке программы использовались функциональные блок-схемы. Программа для ЭВМ способна функционировать во всех версиях операционной системы Windows и занимает объем оперативной памяти 210 Мб [1].

Как видно из блок-схемы программы, представленной на рисунке 2, в ней, кроме расчета вероятностей появления кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, используется массив данных с нормируемыми ГОСТ 32144–2013 значениями показателей качества электроэнергии.

Панели пользователя максимально понятны и удобны для пользователя, не имеющего навыков программирования и глубоких знаний в сфере информатики. Они не перегружены лишней информацией, что значительно облегчает использование программы.

Достоинством разработанной программы является полная совместимость с программами Matlab (приложение Simulink), Mathcad, а также большое число виртуальных приборов и средств управления. Программа в автоматическом режиме производит необходимые вычисления и выводит полученные результаты в удобной для пользователя форме: в виде графиков, осциллограмм, гистограмм и т. п.

Для нормального функционирования программы необходимо установить ее на персональный компьютер, при этом не требуется установка полного пакета системы программирования LabVIEW, достаточно запустить файл setup.exe (установочный файл), и произойдет автоматическая распаковка и установка программы на компьютер. По окончании установки программы с помощью установочного файла она полностью готова к выполнению расчетов.

Для корректной работы программы необходимо использовать массив данных, полученный от сертифицированных и поверенных измерительно-вычислительных комплексов, например таких, как Ресурс-ПКЭ. В этом измерительно-вычислительном комплексе применяется математико-статистический способ анализа с использованием выборочной совокупности. Такой контроль может быть одноступенчатым и многоступенчатым, что значительно повышает точность выполняемого анализа.

При подготовке программы к работе необходимо экспортировать исходные данные в формате электронных таблиц Excel, после чего файл, содержащий данные измерений, сохраняют в текстовом

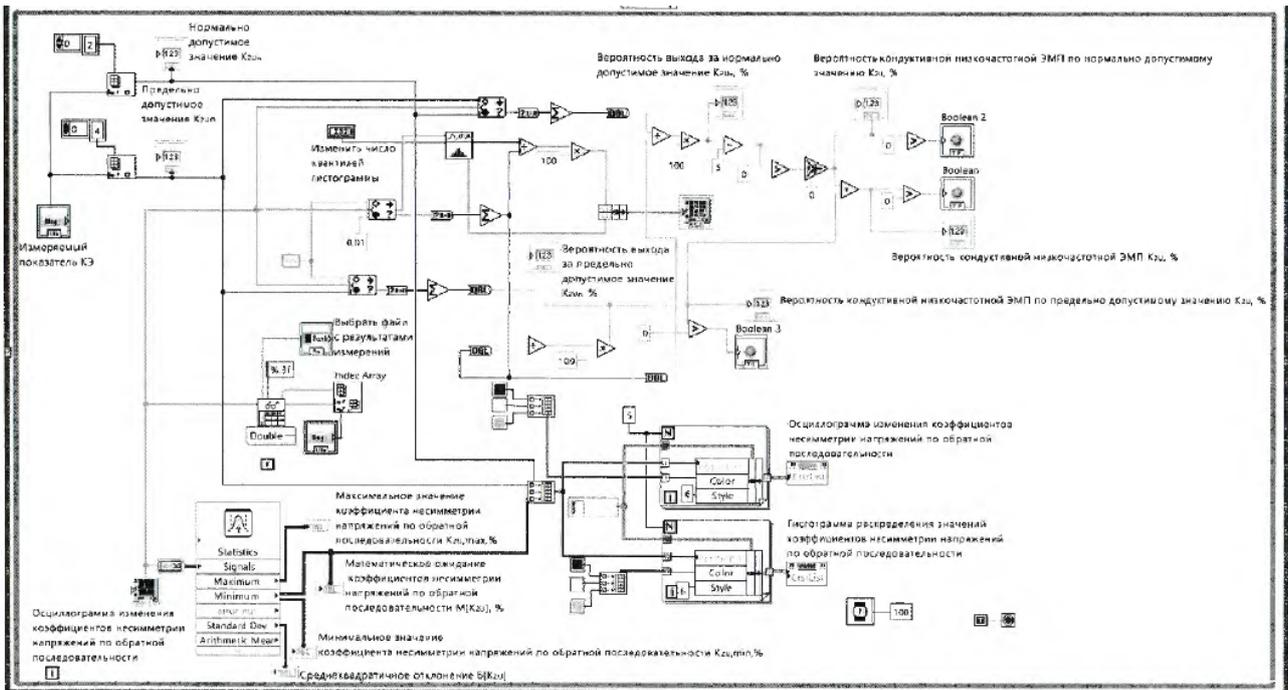


Рис. 2. Окно разработки программы с используемыми блок-схемами

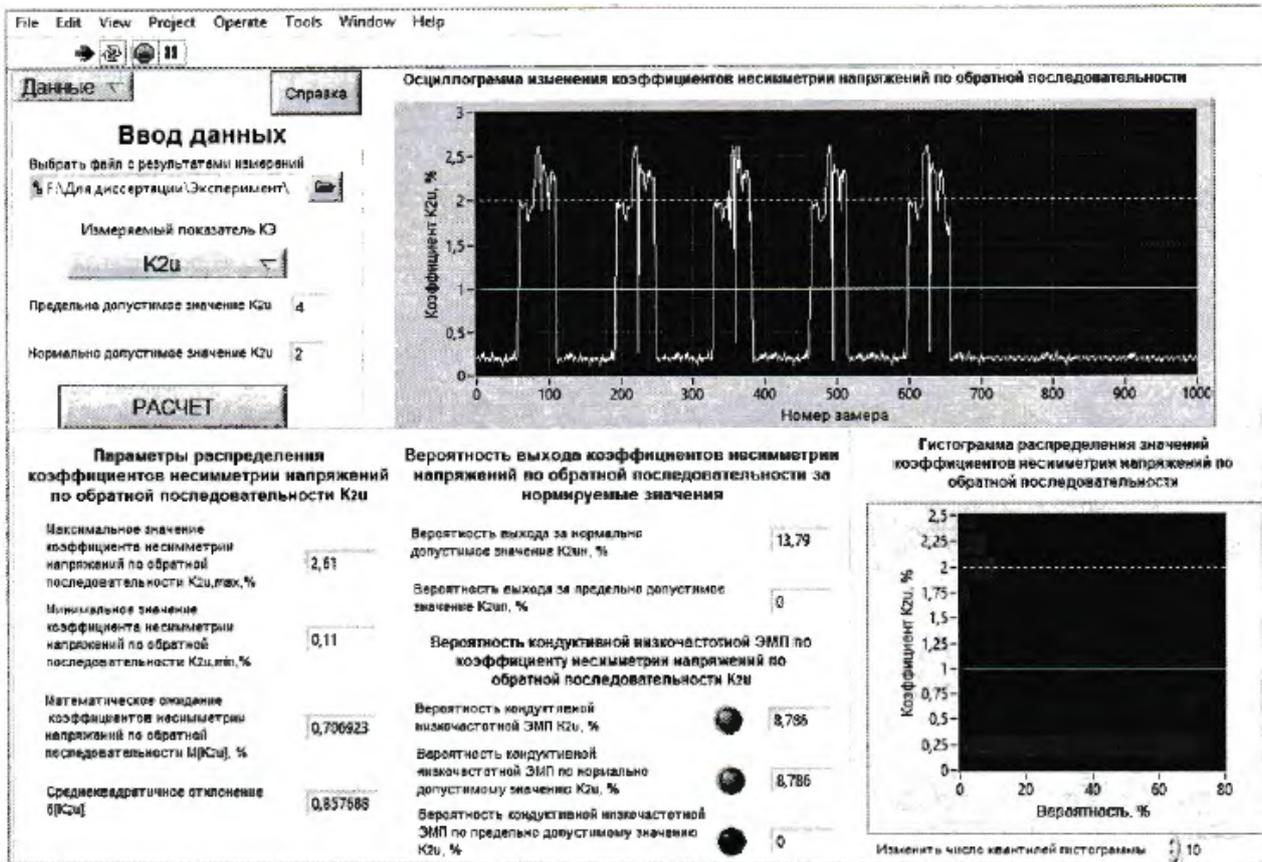


Рис. 3. Основное рабочее окно программы

формате с учетом разделителей табуляции, а затем вводят в программу через диалоговое окно «Ввод данных». Отличительной особенностью разработанной программы является то, что все необходимые нормативные значения внесены в отдельный массив данных.

Существенной особенностью разработанной программы является возможность представления

Параметры распределения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U}

Максимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U, \max}$, %	2,63
Минимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U, \min}$, %	0,09
Математическое ожидание коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности $M[K_{2U}]$, %	0,955777
Среднеквадратичное отклонение $\sigma[K_{2U}]$	0,93954

Рис. 4. Окно расчета распределения значений δK_{2U}

Вероятность выхода коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности за нормируемые значения

Вероятность выхода за нормально допустимое значение K_{2U} , %	18,89
Вероятность выхода за предельно допустимое значение K_{2U} , %	0
Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U}	
Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП K_{2U} , %	13,89
Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по нормально допустимому значению K_{2U} , %	13,89
Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по предельно допустимому значению K_{2U} , %	0

Рис. 5. Окно расчета при отклонении δK_{2U} от нормируемых значений

результатов в виде гистограммы исследуемой величины. Для построения гистограммы необходимо ввести в диалоговое окно программы число квантилей, которое выбирается из условия равенства границы нормируемого ГОСТ значения показателя качества с границей квантиля. Количество квантилей определяется условием наименьшего значения для необходимой точности расчета.

После ввода исходных данных, представленных массивом, программа выполняет обработку полученных значений (рисунок 4), определяет основные параметры вероятности возникновения искомой величины (рисунок 5). В случае, когда вероятность появления δK_{2U} больше нормируемого значения, в диалоговом окне программы индикаторы диалогового окна обозначат отклонение от параметров ГОСТ красным цветом.

Массив данных может быть представлен как в виде осциллограммы (рисунок 6), так и в виде гистограммы.



Рис. 6. Пример представления массива данных в виде осциллограммы

Необходимый способ представления массива данных может быть определен после вычисления измерительно-вычислительным комплексом закона распределения δK_{2U} как случайной величины.

Разработанная программа позволяет автоматически определять δK_{2U} , что сопровождается затруднениями при работе в таких программах, как Mathcad, Matrix, Matlab и аналогичных.

Представленная программа является базой метода определения электромагнитных помех, распространяющихся по проводам и связанных с низкими частотами, как составляющая концепции Smart Grid (рисунок 7).

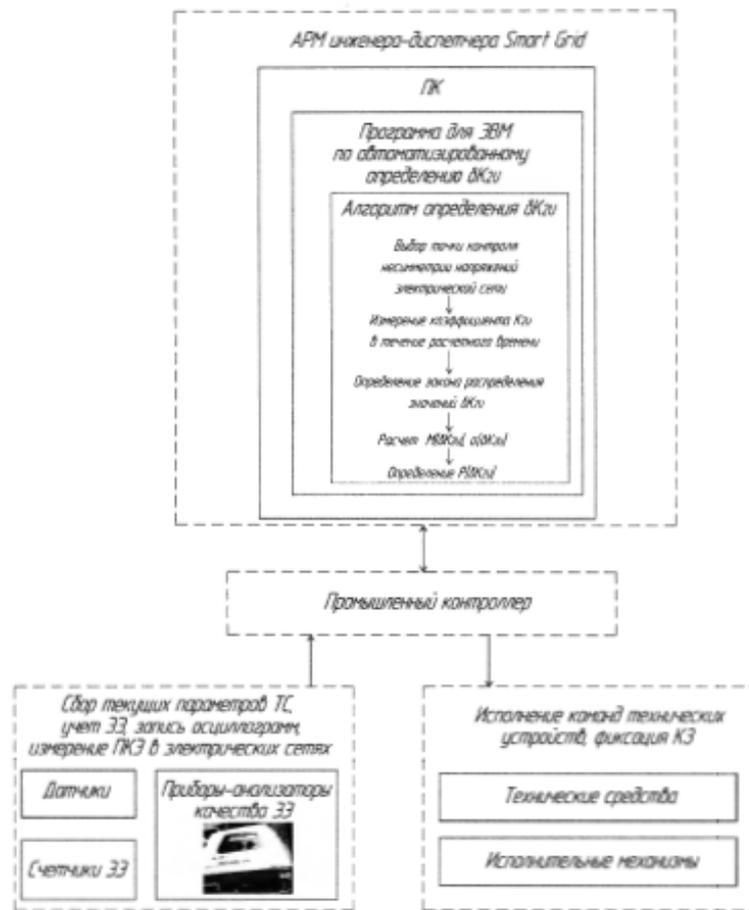


Рис. 7. Функциональная интерпретация метода автоматизированного определения δK_{2U}

В технологии Smart Grid применяются новые методы управления, современные технологии и компоненты электрических сетей, методы поддержки принятия решений, интегрированные коммуникации. Основным требованием при использовании этой технологии являются высокие требования к обеспечению нормированных значений показателей качества электрической энергии [3].

Следовательно, данный метод, на базе которого составлены алгоритм и программа для ЭВМ, согласно основным положениям концепции «Интеллектуальные сети», можно представить как новый способ обработки исходных данных, что обеспечивает научное обоснование оценки электромагнитной обстановки в рассматриваемых сетях, и использовать необходимые технические средства и решения для незамедлительного подавления помех в случае их появления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А. [и др.]. *Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности*: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 23380. М.: ИУО РАО ОФЭРНиО; 2017.
2. 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;10:118–122.
3. Ушаков В. Я. *Современные проблемы электроэнергетики*: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2013. 448 с.