

УДК. 621.311

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

К.В. Суслов, Н.Н. Солонина, Д.О. Герасимов

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu
<http://orcid.org/0000-0003-1774-4826>, <http://orcid.org/0000-0001-8306-4138>,

Резюме: Одним из важнейших свойств электроэнергетической системы является её наблюдаемость. Обеспечение наблюдаемости актуально не только для перетоков мощности и показателей надежности электроснабжения, но и для показателей качества электроэнергии, в частности несинусоидальности формы питающего напряжения. Все более широкое применение находят элементы силовой электроники в интеллектуальных электрических системах, причем ее применение будет в будущем расти. Это приводит к появлению гармонических составляющих высших порядков тока и напряжения. Объекты электрической системы могут быть как источниками, так и приемниками гармоник. В связи с этим актуальной задачей становится оценка влияния отдельных объектов на качество электрической энергии в энергосистеме. Наблюдаемость электроэнергетических систем может быть реализована путем применения регистраторов векторных параметров (PMU). В данной работе авторами предлагается использование распределенной системы мониторинга качества электрической энергии путем использования имеющейся инфраструктуры PMU. Это позволит осуществлять непрерывный контроль уровня гармонических колебаний в различных сечениях энергосистемы. Особенно данное мероприятие необходимо применять для изолированных систем электроснабжения.

Ключевые слова: качество электрической энергии, изолированные системы электроснабжения, гармоники напряжения и тока, распределенный мониторинг качества электроэнергии.

MODERN APPROACHES TO ESTIMATION OF POWER QUALITY

K.V. Suslov, N.N. Solonina, D.O. Gerasimov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu
<http://orcid.org/0000-0003-1774-4826>, <http://orcid.org/0000-0001-8306-4138>,

Abstract: One of the most important properties of the electric power system is its observability. Ensuring observability is relevant not only for power flows and reliability indicators of power supply, but also for power quality indicators, in particular, the non-sinusoidal shape of the supply voltage. Increasingly, the use of elements of power electronics in intelligent power systems, and its application will grow in the future. This leads to the appearance of harmonic components of higher orders of current and voltage. The objects of the power system can be either sources or receivers of harmonics. In this regard, the actual task is to assess the impact of individual objects on the quality of electrical energy in the power system. The observability of

power systems can be realized by the application of the phasor measurement units (PMU). In this paper, the authors suggest using a distributed system for monitoring the power quality by using the existing PMU infrastructure. This will allow for continuous monitoring of the level of harmonic oscillations in different sections of the power system. Especially this event should be used for isolated power supply systems.

Keywords: *power quality, isolated power supply systems, voltage and current harmonics, distributed power quality monitoring.*

Введение

В последнее время на первый план выходит задача повышения эффективности использования существующих генерирующих мощностей и сетевой инфраструктуры. При этом возникает некоторое противоречие. С целью повышения эффективности работы применяется современная преобразовательная техника на базе силовой электроники, в частности преобразователи частоты, инверторы, выпрямители и т.д. Применение современной силовой электроники, с одной стороны, позволяет повысить эффективность работы технологических установок, но с другой стороны, в питающем напряжении увеличивается уровень гармонических составляющих высших порядков [1, 2, 3]. Также появление генераторов на базе возобновляемых источников энергии потребовало использование силовой электроники для инверторов и выпрямителей. Особенно влияние таких источников сказывается на изолированных системах электроснабжения. На основании нормативных документов уровень гармонических колебаний в питающем напряжении характеризуется суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения, который выражается в процентах по отношению к величине напряжения основной гармоники.

По имеющимся данным доля гармонических колебаний высших порядков в общем спектре, вызванная нелинейной нагрузкой, может достигать уровня 20% [4, 5, 6].

В связи с этим актуальной задачей является контроль распределения гармонических колебаний высших порядков в различных сечениях питающей электрической сети. На основании анализа данного распределения имеется возможность вырабатывать сигналы управления работой частотоподающих цепей, в частности пассивных и активных фильтров, управляемых конденсаторных компенсирующих устройств, реакторов и т.д. В качестве источника первичной информации в различных точках электрической сети предлагается использовать имеющуюся инфраструктуру регистраторов векторных параметров (PMU). Данные системы в последнее время находят широкое применение для мониторинга режимов работы энергетических систем. Для реализации данного подхода в узловых точках системы установлены датчики мгновенных значений токов и напряжений. Сигналы с этих датчиков посредством спутниковой связи передаются в центр управления для мониторинга режимов. Данные сигналы также используются и для контроля качества электроэнергии. В центре управления необходимо установить интеллектуальный счетчик раздельного измерения энергии гармоник и энергии основной гармоники [7, 8]. На вход данного счетчика поступает информация о величинах токов и напряжений в различных узлах системы. После обработки данной информации принимается решение о воздействии посредством устройств гибких систем передачи энергии переменным током (FACTS) на управляемые элементы.

Постановка задачи

Для обеспечения живучести энергосистемы необходимы устройства управления её параметрами. Для успешного и эффективного функционирования энергосистемы необходима распределенная система мониторинга качества электроэнергии. В данной

статье мониторинг качества электрической энергии ограничивается мониторингом уровня гармонических колебаний высших порядков в питающем напряжении. С этой целью предлагается производить измерения потоков энергии гармонических колебаний в различных сечениях энергетических систем. Причем данные измерения производятся в режиме, близком к режиму реального времени. Для реализации данной задачи имеется ряд предпосылок. Это, прежде всего, имеющаяся инфраструктура *PMU* [9, 10]. Данная инфраструктура позволяет выполнять измерения мгновенных значений тока и напряжения в различных сечениях и передавать их в центр управления. Традиционно данная информация используется для регистрации векторных параметров энергосистемы. Авторами предлагается данную первичную информацию использовать также для определения потоков энергии основной гармоники и гармоник в разных сечениях при помощи вышеуказанного разработанного авторами интеллектуального счетчика [7, 8, 11]. Вторая предпосылка – существуют устройства *FACTS*, которые позволяют дистанционно изменять величины реактивных элементов цепи.

Основные положения подхода

Разработка алгоритма управления параметрами нескольких реактивных элементов является достаточно сложной задачей. В связи с этим был предложен метод последовательных приближений. В этом случае путем последовательного изменения в небольших пределах одного из параметров осуществляем наблюдение за реакцией системы в целом. В качестве такого параметра, к примеру, можно использовать регулируемую емкость. В этом случае в качестве целевой функции используем отношение мощности основной гармоники P_1 к мощности гармоник $P_{\text{нн}}$. Данные значения снимаются с выхода интеллектуального счетчика. В общем случае данная целевая функция (1) зависит от многих переменных:

$$\frac{P_1}{P_{\text{нн}}} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad , \quad (1)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – это значения реактивных элементов, влияющих на частотные свойства цепи.

Величины x_1, x_2 являются переменными, т.е. их можно изменять дистанционно с центра управления. Величины x_3, x_4 и т.д. являются квазипостоянными, т.е. их изменение происходит со скоростью изменения режимов работы системы. На рис. 1 показана схема замещения типичной изолированной системы электроснабжения. При расчетах сделаем допущение, что в напряжении присутствует только одна гармоника, например третья. Данная гармоника генерируется как источником e_g , так и нелинейным потребителем e_3 , и имеются два переменных реактивных элемента: емкость C_r , индуктивность L_r .

С целью определения принципиальной возможности автоматической настройки переменных величин рассмотрим следующий пример. Пусть необходимо обеспечить максимально высокое качество электроэнергии в точке присоединения (*ab*) потребителя. Для данного случая индуктивность генератора L_g , распределенная емкость C_d , распределенная индуктивность L_d и индуктивности потребителей L_{nc} и L_{lc} будут считаться неизменными величинами, а величины регулируемых емкости C_d и индуктивности L_r будут считаться переменными.

На рис. 2 в графическом виде представлена процедура определения максимума целевой функции при наличии двух изменяющихся параметров цепи (в данном случае x_1 – переменная емкость, x_2 – переменная индуктивность).

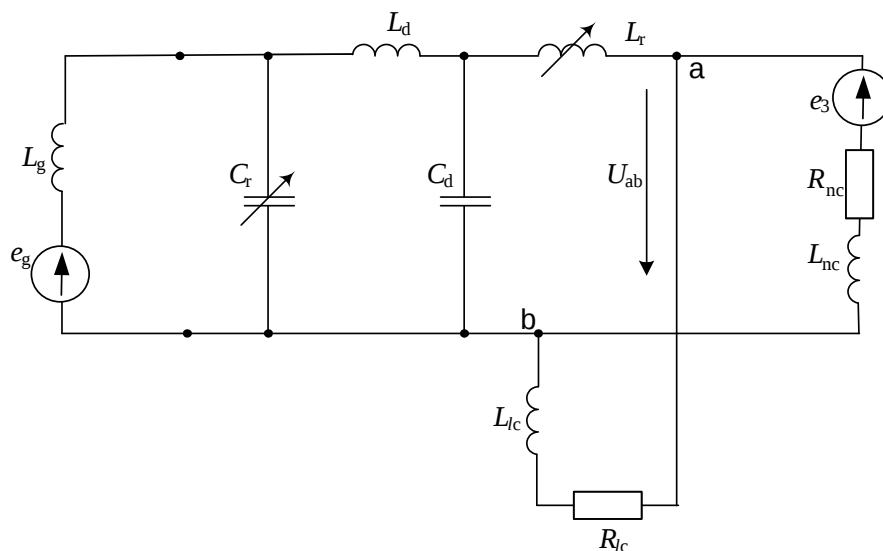


Рис.1. Схема замещения изолированной системы электроснабжения

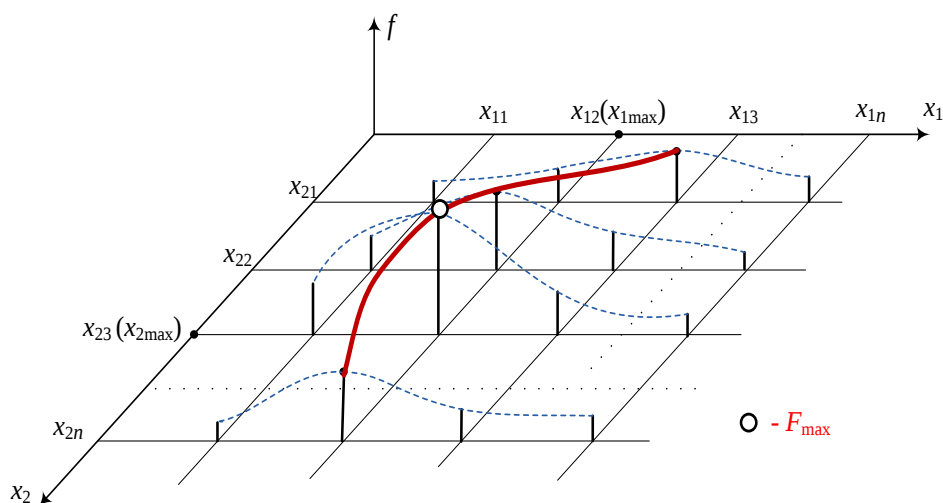


Рис. 2. Иллюстрация процедуры поиска максимума целевой функции

В приведенную модель вводятся исходные числовые параметры постоянных величин x_3 , x_4 и других, а также минимальное значение диапазона изменения переменных x_1 , x_2 . Затем, зафиксировав первое значение переменной x_2 в начале установленного диапазона (x_{21}), производим увеличение переменной x_1 с постоянным шагом Δx_1 от минимального x_{11} до максимального значения x_{1n} диапазона. В данном случае n – общее число сечений. При каждом значении x_1 определяем расчетным путем отношение мощности основной гармоники к мощности гармоник в точках (ab) (рис. 2), используя методы расчета электрических цепей. При данном значении x_{21} находим значение x_{1max} , которое будет соответствовать максимуму целевой функции (1). Полученные значения x_{1max} , x_{21} и значение целевой функции f_{max1} заносятся в память логического устройства.

Затем делается приращение переменной x_2 , с шагом Δx_2 , и получается

$$x_{21} + \Delta x_2 = x_{22},$$

Операция изменения x_1 вновь повторяется во всем диапазоне, и рассчитывается x_{1max} при значении x_{22} . По аналогии с первым случаем определяется f_{max2} . Процесс вычислений продолжается до тех пор, пока переменная x_2 не достигнет верхнего предела диапазона ее изменения. Т.е. необходимо достигнуть соотношения $x_2 = x_{2n}$, что позволит определить величину $f_{max n}$. Логическое устройство обрабатывает полученный массив данных и определяет конечные значения x_{1max} , x_{2max} . Затем осуществляется сравнение рассчитанных локальных максимумов целевой функции f_{max1} – $f_{max n}$, и находится наибольшее значение из них – F_{max} . Данное значение и будет являться максимумом целевой функции (1) (рис. 2).

Значения величин f_{max1} – $f_{max n}$ поступают на логическое устройство, с помощью которого вырабатывается выходной сигнал для управления исполнительными устройствами. Данные устройства, в свою очередь, изменяют значения x_1 и x_2 .

В результате данной процедуры произведено предварительное определение оптимальных значений переменных. Но при этом в расчетах не учитывались различные влияющие факторы, в частности: не все гармонические колебания высших порядков, а также другие источники гармоник и т. д.

В данном случае, регулирование реактивных параметров осуществляется с помощью статических синхронных компенсаторов (СТАТКОМ). Использование данных устройств позволяет регулировать величину выходного тока в полном диапазоне емкостного или индуктивного тока, причем вне зависимости от уровня напряжения системы переменного тока. По сравнению с другими устройствами, к примеру со статическим компенсатором реактивной мощности (СТК), СТАТКОМ имеет следующие преимущества [12]:

- позволяет реализовать как индуктивный, так и емкостной режимы работы;
- занимает существенно меньшую площадь, так как отпадает необходимость использования громоздких конденсаторов батарей и реакторов, которые используются в СТК;
- наличие широкого динамического диапазона регулирования;
- высокое быстродействие и лучшие характеристики в переходных процессах;
- нечувствителен к гармоническим резонансам в системе и т.д.

Принцип реализации подхода

С целью получения первичной информации, как было отмечено ранее, авторами предлагается использовать интеллектуальный счетчик [7].

Для реализации данного подхода была разработана программа расчета [13].

На рис. 3 показана имитационная модель счетчика в среде *MatLab*, позволяющего производить измерение полигармонического сигнала, а именно измерять суммарную энергию, энергию основной гармоники и энергию отдельно каждой гармонической составляющей. Это позволяет определять вклад каждой гармоники в энергопотребление.

Имитационная модель интеллектуального счетчика состоит из трех подсистем: *Subsystem_1*, *Subsystem_2*, *Subsystem_3*. *Subsystem_1* предназначена для моделирования полигармонического формы изменения напряжения сети, что позволяет изменять в широких пределах амплитуду и спектральный состав гармоник высших порядков. Это позволяет, в свою очередь, моделировать искажения основной гармоники питающего напряжения, близкой по форме к реальным осциллограммам (рис. 4 и 5). *Subsystem_2* производит разложение полигармонического сигнала в числовой конечный тригонометрический ряд, используя быстрое преобразование Фурье, что позволяет произвести расчет энергетической составляющей по каждой из гармоник. *Subsystem_3* производит вычисление эквивалентной основной синусоиды. На панели индикации производится отображение результатов вычислений и преобразований, выполненных в вышеуказанных подсистемах.

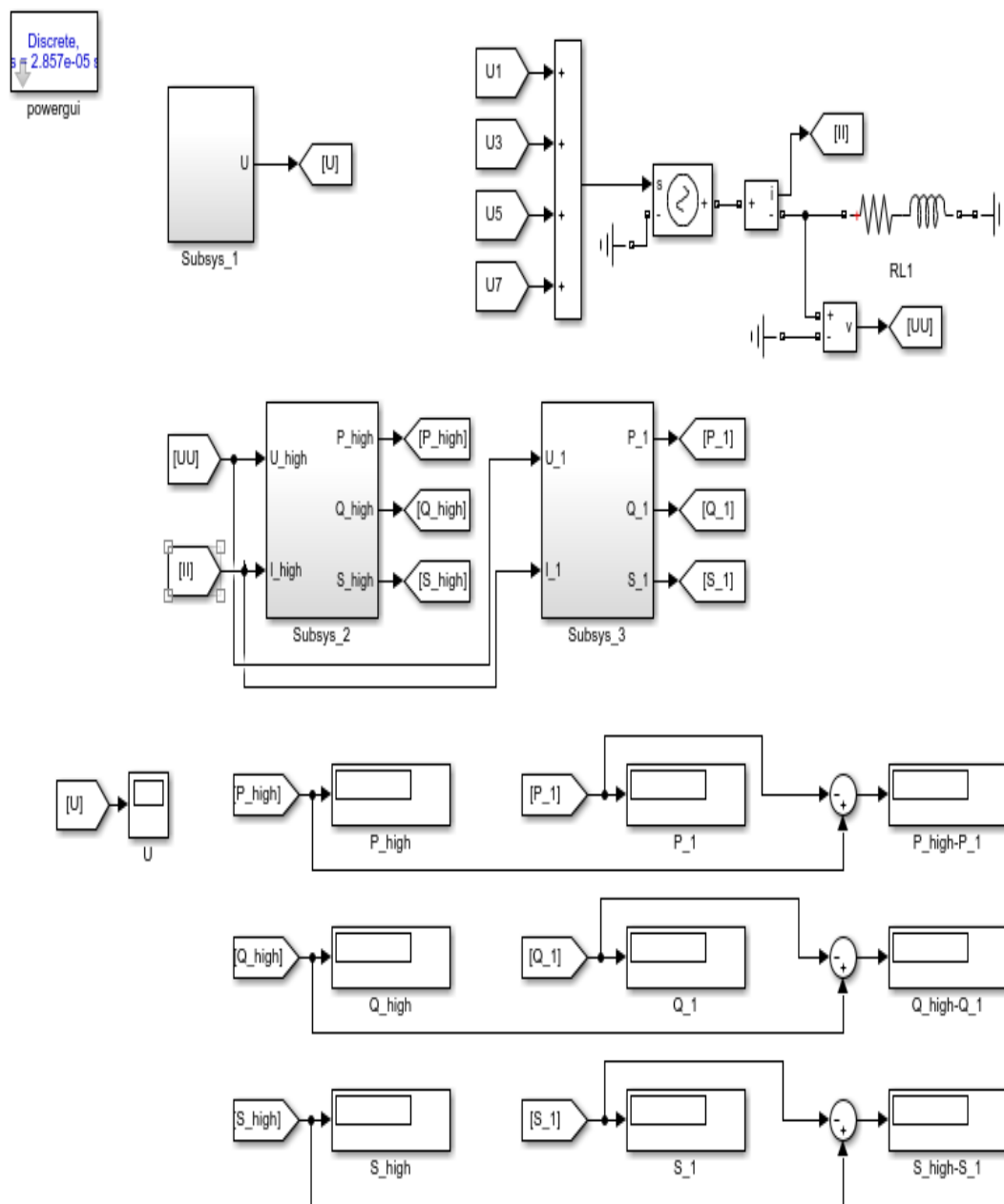


Рис.3. Имитационная модель интеллектуального счетчика

В качестве источника несинусоидального напряжения были выбраны нелинейные бытовые потребители – СВЧ-печи.

На рис. 4 показана кривая синусоидального напряжения, приближенная к кривым напряжения реальных потребителей. Поскольку наиболее весомый вклад в искажение кривой напряжения вносят третья, пятая и седьмая гармоники, авторы ограничились ими.

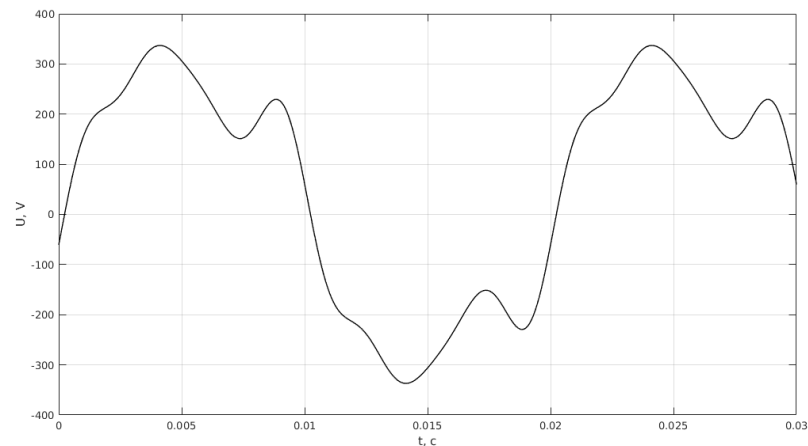


Рис. 4. Кривая несинусоидального напряжения, приближенная к кривым напряжения реальных потребителей

Данные таблицы иллюстрируют вклад в измеряемую мощность каждой гармоники раздельно, а также суммарную мощность гармонических составляющих и общую мощность, включая мощность основной гармоники.

Таблица

Вклад гармонических составляющих							
	Номер гармонической составляющей				$\sum_{i=1}^7 P_i, Q_i, S_i$	$\sum_{i=1}^7 P_i, Q_i, S_i$	%
	1	3	5	7			
P , Вт	4405,00	129,70	36,04	3,42	4574	169,20	3,83
Q , ВАр	1384,00	122,30	56,62	7,53	1590	186,40	13,44
S , ВА	4617,00	178,30	67,12	8,27	4871	253,70	5,49

Последняя графа таблицы показывает соотношение мощностей гармоник высших порядков и мощности основной гармоники.

Данная система мониторинга гармонических колебаний работает в режиме реального времени. В связи с этим и режим возможного минимального содержания доли высших гармонических составляющих в точках присоединения поддерживается непрерывно. Представленная методика мониторинга качества электрической энергии также может быть использована и при применении разветвленных схем. В этом случае необходимо использовать мультиплексор, который устанавливается перед счетчиком. Данное решение позволяет оптимизировать частотные режимы в различных точках присоединений.

Описанная процедура мониторинга позволяет осуществлять контроль непрерывно в режиме реального времени, что позволяет производить непрерывную настройку системы электроснабжения на режим, который наиболее близок к оптимальному с точки зрения содержания уровня гармонических колебаний в питающем напряжении в рассматриваемых точках присоединения.

Выводы

Уровень содержания гармонических составляющих в питающем напряжении существенно влияет на эффективность использования электроэнергии. Поэтому необходим непрерывный контроль уровня гармонических колебаний в различных сечениях энергетической системы. Для реализации данного механизма авторами предлагается распределенная система мониторинга качества электрической энергии.

Данная система дает возможность определять направление и уровень гармонических колебаний в питающей сети при помощи разработанного авторами интеллектуального счетчика.

Разработана имитационная модель счётчика в среде *Matlab*, позволяющая производить измерения мощности полигармонического сигнала, а именно измерять суммарную энергию, энергию основной гармоники и отдельно энергию каждой гармонической составляющей. Это позволяет определить вклад каждой гармоники в энергопотребление.

Литература

1. Смирнов С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения / С.С. Смирнов. Новосибирск: Наука, 2010. 327 с.
2. Mudiraj A.N. Improvement of Power Quality by mitigating harmonics in single phase AC distribution/ A.N.Mudiraj //2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT). 2016. P. 83 – 88.
3. Shashikumar K. Automatic sequential reactive power compensation and harmonic suppression at loads using appliance clustering and power quality monitoring / K.Shashikumar, C.Venkataseshaiah, K.S.Sim. // 2016 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS). 2016 P. 1 - 6.
4. Arrillaga J. Power system harmonics / J. Arrillaga. - Chichester: Wiley, 2003. 670 p.
5. Jaipradidtham C. Energy conservation with TCSC controller of electric arc furnace for harmonic analysis in power quality disturbance using continuous wavelet transform / C. Jaipradidtham, // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). 2016. P. 2905 – 2908.
6. Rajasekhar A.N.V.V. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC / A.N.V.V.Rajasekhar, M.N.Babu. - 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016. P. 1754 – 1758.
7. Suslov K.V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks / K.V.Suslov, N.N.Solonina, V.S.Stepanov // International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies EDST. 2015. C. 131–137.
8. Smirnov A.S. Separate measurement of fundamental and high harmonic energy at consumer inlet - a way to enhancement of electricity use efficiency / K.V.Suslov, N.N.Solonina, A.S.Smirnov // International Conference on Power System Technology PowerCon 2010.
9. Wu Z. Simultaneous transmission line parameter and PMU measurement calibration / Z.Wu, L.T.Zora, A.G.Phadke // Power & Energy Society General Meeting IEEE. 2015. P.450–458.
10. Nuthalapati S. Managing the Grid: Using Synchrophasor Technology / S.Nuthalapati, A.Phadke // Power and Energy Magazine. IEEE. 2015. Vol. 13/-Issue. 5. P.340–348.
11. Suslov K.V. Distributed filtering of high harmonics in Smart Grid / K.V.Suslov, N.N.Solonina, A.S.Smirnov // CIGRE Bologna Symposium - The Electric Power System of the Future: Integrating Supergrids and Microgrids. 2011. P.230–238.
12. Sood V.K. HVDC and FACTS Controllers. Applications of Static Converters in Power Systems / V. K Sood - Springer, 2004. 450p.
13. Суслов К.В. Программа для расчета и управления уровнем гармонических составляющих в питающей электрической сети. / К.В.Суслов, Н.Н.Солонина, Ю.Д.Герасимов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613995. Дата гос. регистрации 12.12.2016.

Авторы публикации

Суслов Константин Витальевич – канд. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Солонина Нафиса Назиповна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Герасимов Дмитрий Олегович – доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

References

1. Smirnov S.S. High harmonics in high voltage networks / S.S.Smirnov. Novosibirsk: Nauka, 2010. 327 p.
2. Mudiraj A.N. Improvement of Power Quality by mitigating harmonics in single phase AC distribution/ A.N.Mudiraj //2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT). 2016. P. 83 – 88.
3. Shashikumar K. Automatic sequential reactive power compensation and harmonic suppression at loads using appliance clustering and power quality monitoring / K.Shashikumar, C.Venkateshaiah, K.S.Sim. // 2016 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS) 2016 P.1 – 6.
4. Arrillaga J. Power system harmonics / J. Arrillaga. Chichester: Wiley, 2003. 670 p.
5. Jaipradidtham C. Energy conservation with TCSC controller of electric arc furnace for harmonic analysis in power quality disturbance using continuous wavelet transform / C. Jaipradidtham, // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON) - 2016 P. 2905 – 2908.
6. Rajasekhar A.N.V.V. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC / A.N.V.V.Rajasekhar, M.N.Babu. - 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016 P. 1754 – 1758.
7. Suslov K.V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks / K.V.Suslov, N.N.Solonina, V.S.Stepanov // International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies EDST. 2015. P. 131–137.
8. Smirnov A.S. Separate measurement of fundamental and high harmonic energy at consumer inlet - a way to enhancement of electricity use efficiency / K.V.Suslov, N.N.Solonina, A.S.Smirnov // International Conference on Power System Technology PowerCon 2010. P.1 – 6.
9. Wu Z. Simultaneous transmission line parameter and PMU measurement calibration / Z.Wu, L.T.Zora, A.G.Phadke // Power & Energy Society General Meeting IEEE. 2015. P.450–458.
10. Nuthalapati S. Managing the Grid: Using Synchrophasor Technology / S.Nuthalapati, A.Phadke // Power and Energy Magazine, IEEE. 2015. Vol. 13/-Issue. 5- P.340–348.
11. Suslov K.V. Distributed filtering of high harmonics in Smart Grid / K.V.Suslov, N.N.Solonina, A.S.Smirnov // CIGRE Bologna Symposium - The Electric Power System of the Future: Integrating Supergrids and Microgrids. - 2011. P.230–238.
12. Sood V.K. HVDC and FACTS Controllers. Applications of Static Converters in Power Systems / V. K Sood - Springer, 2004. 450p.
13. Suslov K.V. The program for calculating and controlling the level of harmonic components in the power supply network. / K.S. Suslov, N.N.Solonina, Y.D. Gerasimov, Certificate of state registration of the computer program No. 2016613995. date of state registration 12.12.2016.

Authors of the publication

Konstantin V. Suslov –cand. sci. (techn.), professor, department of power supply and electrotechnic, Irkutsk National Research Technical University.

Nafisa N. Solonina – cand. sci. (techn.), associate professor, department of power supply and electrotechnic, Irkutsk National Research Technical University.

Dmitry O.Gerasimov – associate professor, department of power supply and electrotechnic, Irkutsk National Research Technical University.

Поступила в редакцию

04 июля 2017 г.