



# ИННОВАЦИИ В ИНФОРМАТИКЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

---

---

DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2022.2.1>

УДК 621.31

ББК 31.27-082



## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЕТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ: МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Олег Николаевич Безбожнов**

Аспирант, кафедра телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
[bezbozhnov.oleg@volsu.ru](mailto:bezbozhnov.oleg@volsu.ru)  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Денис Иванович Чадаев**

Кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
[chadaev.denis@volsu.ru](mailto:chadaev.denis@volsu.ru)  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы мониторинга нормируемых параметров электроэнергии в сетях smart grid как средства обеспечения контроля качества электроэнергии. Сделан вывод о возможности использования разрабатываемого устройства для сбора, анализа и передачи данных о показателях качества электроэнергии (далее – КЭ) в распределительной электрической сети, с дальнейшим использованием их в целях управления энергоснабжением и энергопотреблением в интеллектуальных системах электроснабжения, и повышения энергоэффективности работы систем электроснабжения за счет внедрения интеллектуальных технологий smart grid. Устройство может быть интегрировано в системы энергетики на базе концепции интеллектуальных сетей (smart grid) в виде элемента общего информационного комплекса таких сетей, как часть системы оценивания ситуации и противоаварийной автоматики.

**Ключевые слова:** интеллектуальные электрические сети, качество электроэнергии, управление энергопотреблением, противоаварийная автоматика.

В условиях постоянно растущего потребления электрической энергии важнейшей задачей является ее рациональное распределение и использование. Современные концепции интеллектуальных распределительных электрических сетей включают в себя инструменты контроля и мониторинга процессов распределения и потребления электроэнергии, позволяющие обеспечить соответствие этих процессов действующим стандартам.

Цель исследования – создание устройства мониторинга нормируемых параметров качества электроэнергии, таких как напряжение, форма сигнала, коэффициент гармоник, с возможностью выявления отклонений этих параметров от нормы, с возможностью передачи полученных результатов по инфокоммуникационным сетям.

Интеллектуальные электрические сети (smart grid) – электрические сети, в которых организован обмен информацией между участниками сети, начиная от генерирующих мощностей и до конечных устройств-потребителей электроэнергии, в режиме времени. В рамках этой концепции абсолютно все составляющие системы – крупные энергопроизводители (ТЭЦ, ГЭС, АЭС, а также любые локальные генерирующие мощности (ДГУ, ветрогенераторы, небольшие солнечные электростанции и др.)), а также электрораспределительные сети и конечные потребители связываются с использованием инфокоммуникационных технологий в интеллектуальные сети.

Электроэнергетика на основе концепции сетей smart grid является частью промышленного Интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT), предполагающего, в итоге, полную подключенность и автоматизацию управления промышленными процессами. В электроэнергетике в наибольшей степени видна необходимость и достижимость сквозного управления и оптимизации процессов производства, распределения и потребления энергетического ресурса на основе автоматических алгоритмов оптимизации.

Для обеспечения информационного обмена данными в smart grid предусмотрено использование цифровых коммуникационных сетей и интерфейсов обмена данными. Одной из важнейших целей smart grid является обеспечение практически непрерывного управля-

емого баланса между спросом и предложением электрической энергии [6]. Для этого элементы сети должны постоянно обмениваться между собой информацией о параметрах электрической энергии, режимах потребления и генерации, количестве потребляемой энергии и планируемом потреблении, коммерческой информацией. В итоге это дает возможность оптимальной эксплуатации инфраструктуры электроэнергетической системы.

Благодаря современным технологиям smart grid может применяться как в масштабах зданий, предприятий, так и для обычных домашних электрических устройств, например, холодильника или стиральной машины. Соответственно, все устройства, входящие в состав smart grid, должны быть оснащены техническими средствами, осуществляющими информационное взаимодействие между ними [5].

Параметры качества электроэнергии регламентируются ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1]. Стандарт определяет качество электрической энергии (далее – КЭ) следующим образом: КЭ – это степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ. Стандарт устанавливает показатели и нормы КЭ в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц.

Настоящий стандарт предназначен для применения при установлении и нормировании показателей КЭ, связанных с характеристиками напряжения электропитания, относящимися к частоте, значениям и форме напряжения, а также к симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения [3; 4]. Данные характеристики напряжения подвержены изменениям из-за изменений нагрузки, влияния кондуктивных электромагнитных помех, создаваемых отдельными видами оборудования, и возникновения неисправностей, вызываемых, главным образом, внешними событиями. В результате возникают случайные

изменения характеристик напряжения во времени в любой отдельной точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, а также случайные отклонения характеристик напряжения в различных точках передачи электрической энергии в конкретный момент времени [1].

Согласно ГОСТ 32144-2013, потребитель электрической энергии должен обеспечить условия, при которых отклонения напряжения питания на выводах электроприемников не превышают установленных для них допустимых значений, при условии выполнения поставщиком электроэнергии требований настоящего стандарта к КЭ в точке передачи электрической энергии. Таким образом, для выполнения требований ГОСТа потребителю необходимо располагать данными о воздействии используемого им энергопотребляющего оборудования на параметры КЭ. Вся последовательность производства, передачи и потребления электрической энергии, должна обеспечивать возможности контроля качества электрической энергии, поставляемой потребителям, при условии соблюдения норм электромагнитной совместимости электроустановок и электротехнического оборудования при их производстве, а также контроля потребителем правильности эксплуатации оборудования и установок.

Основными показателями КЭ являются: отклонение напряжения, колебания напряжения, отклонение частоты, доза фликера, коэффициент временного перенапряжения, провал напряжения, импульсное напряжение, несинусоидальность кривой напряжения [2]. Указан-

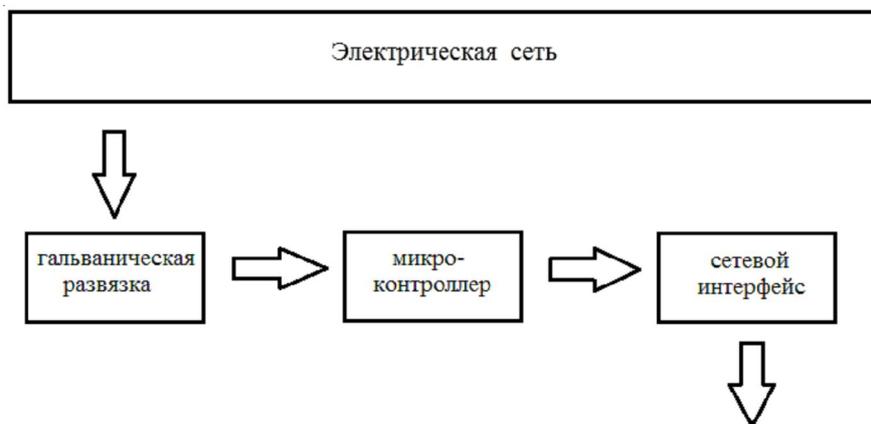
ные параметры и их допустимые значения определены в действующих стандартах.

Разрабатываемое устройство для мониторинга показателей КЭ представляет собой аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на базе микроконтроллера ATmega328P-PU, связанного с распределительной электрической сетью через гальваническую развязку.

Структурная схема устройства приведена на рисунке.

Гальваническая развязка (с использованием оптопары) позволяет получить сигнал, эквивалентный по форме сигналу напряжения электросети, для дальнейшей обработки микроконтроллером. Микроконтроллер выполняет следующие задачи: определение мгновенной амплитуды напряжения сети и действующего значения напряжения, отклонения от нормы, аналого-цифровое преобразование полученного сигнала, получение его частотных характеристик с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT), сравнение их с нормами частотных показателей напряжения. Далее, при обнаружении критических отклонений от нормируемых по анализируемым параметрам, формируется отчет об их наличии для дальнейшей передачи через сетевой интерфейс. Сетевой интерфейс реализован в виде передачи данных через сеть Ethernet с применением протокола MQTT.

MQTT или Message Queue Telemetry Transport – распространенный, открытый и не требовательный к ресурсам протокол обмена данными, применяемый для передачи данных в сетях с ограничениями по размеру кода и пропускной способности канала.



Структурная схема устройства мониторинга показателей КЭ

Используется для организации передачи данных в системах М2М (взаимодействие машина-машина) и промышленном интернете вещей (Industrial Internet of Things, IIoT). Для использования в беспроводных сетях разработана и применяется версия протокола MQTT-S и ее более поздняя версия MQTT-SN (MQTT for Sensor Networks), используемая в беспроводных сетях (например, сети Zigbee), не поддерживающих TCP/IP.

Протокол MQTT – асинхронный протокол, обеспечивающий передачу данных при неустойчивой работе используемых линий передачи, при нарушениях связи. Протокол работает на прикладном уровне over TCP/IP. Протокол поддерживает несколько уровней качества обслуживания (QoS) в зависимости от важности данных и приоритета доставки, сообщения MQTT имеют различные флаги Quality of Service – QoS:

– QoS 0 – сообщение доставляется один раз. В случае неудачной доставки (разрыва связи) сообщение повторно не отправляется, то есть будет потеряно;

– QoS 1 – сообщение доставляется один раз с получением подтверждения доставки. В случае отсутствия подтверждения, сообщение отправляется повторно;

– QoS 2 – сообщение доставляется только один раз, в случае сбоев передачи, например, вследствие отсутствия связи, доставка может быть отложена, но сообщение будет доставлено после восстановления связи.

Предусмотрена несложная процедура добавления новых сетевых устройств. Архитектура протокола MQTT – клиент-сервер (брокер), в виде обмена сообщениями между брокером (broker) и клиентом (client), который выполняет функции издателя или подписчика (publisher/subscriber). Издатель (publisher) – источник сообщений, датчик или любое другое IoT-устройство. Подписчик (subscriber) – получатель сообщений от издателя, например, система управления оборудованием, либо система сбора и анализа данных. MQTT-брокер (MQTT сервер) представляет собой узел, обеспечивающий обмен сообщениями между издателем и подписчиком, получающий сообщения от издателей, передающий их подписчикам и контролирующий доставку.

Таким образом, разрабатываемое устройство позволяет осуществлять сбор, анализ и передачу данных о показателях КЭ в распределительной электрической сети, с дальнейшим использованием их в целях управления энергоснабжением и энергопотреблением в интеллектуальных системах электроснабжения, и повышения энергоэффективности работы систем электроснабжения за счет внедрения интеллектуальных технологий smart grid. Устройство может быть интегрировано в системы энергетики на базе концепции интеллектуальных сетей (smart grid), в виде элемента общего информационного комплекса таких сетей, как часть системы оценивания ситуации и противоаварийной автоматики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 15.03.2022).
2. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200115349> (дата обращения: 15.03.2022).
3. ГОСТ Р 51317.4.30-2008. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200072576> (дата обращения: 15.03.2022).
4. ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЭК 61000-4-7:2002). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200072575> (дата обращения: 15.03.2022).
5. Ильин, В. В. Введение в Smart Grid / В. В. Ильин // АВОК. – 2012. – № 7. – С. 76–85.
6. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М. : ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

## REFERENCES

1. GOST 32144-2013. *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [GOST 32144-2013. Electric Energy. Compatibility of Technical Means is Electromagnetic. Standards for the Quality of Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (accessed 15 March 2022).

2. GOST 33073-2014 *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Kontrol' i monitoring kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [GOST 33073-2014 Electric Energy. Compatibility of Technical Means is Electromagnetic. Control and Monitoring of the Quality of Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115349> (accessed 15 March 2022).

3. GOST R 51317.4.30-2008. *Sovmestimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Metody izmerenij pokazatelej kachestva jelektricheskoi*

*jenergii* [GOST R 51317.4.30-2008. Compatibility of Technical Means is Electromagnetic. Methods for Measuring Indicators of the Quality of Electrical Energy]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200072576> (accessed 15 March 2022).

4. GOST R 51317.4.7-2008 (MJeK 61000-4-7:2002). *Sovmestimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Obshhee rukovodstvo po sredstvam izmerenij i izmerenijam garmonik i intergarmonik dlja sistem jelektrosnabzhenija i podključaemyh k nim tehničeskikh sredstv* [GOST R 51317.4.7-2008 (IEC 61000-4-7:2002). Compatibility of Technical Means is Electromagnetic. General Guide to Measuring Instruments and Measurements of Harmonics and Interharmonics for Power Supply Systems and Technical Means Connected to Them]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200072575> (accessed 15 March 2022).

5. Il'in V.V. *Vvedenie v Smart Grid* [Introduction to Smart Grid]. *ABOK*, 2012, no. 7, pp. 76-85.

6. Kobets B.B., Volkov I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii SmartGrid* [Innovative Development of the Electric Power Industry Based on the SmartGrid Concept]. Moscow, IATs Energiya, 2010. 208 p.

## SMART GRID: MONITORING THE QUALITY OF ELECTRIC POWER

Oleg N. Bezbozhnov

Postgraduate Student, Department of Telecommunications Systems,  
Volgograd State University  
[bezbozhnov.oleg@volsu.ru](mailto:bezbozhnov.oleg@volsu.ru)  
Prosp. Universitetskij, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Denis I. Chadaev

Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Telecommunication Systems,  
Volgograd State University  
[chadaev.denis@volsu.ru](mailto:chadaev.denis@volsu.ru)  
Prosp. Universitetskij, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The issues of monitoring the normalized parameters of electricity, in smart grid networks, as a means of ensuring control of the quality of electricity, are considered. In the context of constantly growing consumption of electrical energy, the most important task is its rational distribution and use. State-of-the-art prototypes of intelligent power distribution networks include means of controlling power distribution and consumption processes to ensure that these processes comply with applicable regulations. The purpose of our study is to create a monitoring device for normalized power quality parameters, such as voltage, signal shape, harmonic coefficient, with the possibility of detecting deviations of these parameters from the norm, with the possibility of transmitting the results obtained via infocommunication networks.

The developed device allows collecting, analyzing and transmitting data on power quality indicators in the distribution electrical network, with their further use in order to manage energy supply and energy consumption in smart power supply systems, and improve the energy efficiency of power supply systems through the introduction of smart grid technologies. The device can be integrated into energy systems based on the smart grid concept, which are a single energy-information complex, as part of a situation assessment system and emergency automation.

**Key words:** intelligent electrical networks, smart grid, power quality indicators, energy management, emergency automation.