

УДК 621.382

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА БАЗЕ АНАЛИЗА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****Дубров В.И., Оганян Р.Г., Шайхутдинов Д.В., Кириевский Е.В.,  
Горбатенко Н.И., Наракидзе Н.Д.***Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова, Новочеркасск, e-mail: iimt-srstu@mail.ru*

Настоящая статья посвящена обзору энергетической отрасли, связанной с цифровыми электроподстанциями. В статье рассмотрены предпосылки к созданию цифровых подстанций. Представлена структура и описан принцип функционирования цифровых подстанций. На основании анализа нормативных документов стандарта МЭК-61850 разработана структурная схема цифровой подстанции. На основании анализа структурной схемы выбран подход к разработке математической модели цифровой подстанции с применением методов системного анализа, планирования эксперимента и метода главных компонент. Данный подход базируется на рассмотрении технологического процесса, заключающегося в контролируемом преобразовании высоковольтным оборудованием электроэнергии одного класса напряжения в другой. Предложена обобщенная математическая модель, включающая характеристики поступающей электроэнергии, характеристики технологической системы, режимы рабочего процесса, факторы, действующие на технологическую систему, и выходные показатели качества преобразования электроэнергии и ее себестоимости.

**Ключевые слова:** преобразование электроэнергии, цифровая подстанция, МЭК 61850, моделирование цифровых подстанций

**DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF DIGITAL SUBSTATIONS BASED ON THE ANALYSIS OF THE AUTOMATED TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF ELECTRIC POWER CONVERSION****Dubrov V.I., Oganyan R.G., Shaykhutdinov D.V., Kirievskiy E.V.,  
Gorbatenko N.I., Narakidze N.D.***Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI), Novocherkassk, e-mail: iimt-srstu@mail.ru*

This article provides an overview of the energy sector related to digital power substations. The article describes the background to the creation of digital substations. The structure and the principle of operation of digital substation is described. Based on the analysis of normative documents IEC 61850 standard the structural diagram of a digital substation is developed. Based on the analysis of structural scheme chosen the approach to the development of mathematical models of digital substation with system analysis methods, experimental design, and principal component analysis. This approach is based on consideration of the process, consisting in the controlled transformation of a high-voltage electric equipment of the voltage one class to another. A generalized mathematical model that includes characteristics of incoming electricity, technological characteristics of the system, workflow modes, factors acting on the technological system, and output indicators of quality power conversion and its cost is offered.

**Keywords:** electric power conversion, digital substation, IEC 61850, modeling of digital substations

Потребление электроэнергии в России, несмотря на некоторые признаки замедления экономического роста, растет. Среднегодовой показатель прироста составляет в последние годы около 1,2%, прогнозировалось увеличение его до 2% до 2020 года [11], но по данным ОАО «СО ЕЭС», потребление электроэнергии в Единой энергосистеме России в январе 2016 года составило 99,4 млрд кВт·ч, что на 2,3% больше объема потребления за январь 2015 года [12]. Указанные сведения свидетельствуют о необходимости увеличения производства электроэнергии, а также об увеличении нагрузки на энергосистему. Существующая энергетическая инфраструктура в подавляющем количестве случаев является устаревшей и уже работает на пределе своих возможностей, что обостряет проблему обеспечения на-

дежности и повышения качества энергоснабжения и накладывает ограничения на дополнительную генерацию электроэнергии. Возникает необходимость замены более 50% энергетической инфраструктуры на новое оборудование, т.к. срок эксплуатации уже давно истек. Перспективной при этом является замена на современное оборудование, открывающая больше возможностей в части эффективности и надежности.

Новые технологии производства современных систем управления перешли из стадии научных исследований и экспериментов в стадию практического использования. Широко применяются цифровые устройства защиты и автоматики. Произошло существенное развитие аппаратных и программных средств систем управления. В то же время развитие фотоэлектрической

технологии позволило перейти с передачи данных традиционными аналоговыми сигналами на передачу цифровым сигналом. Эти технологии и особенности побудили перейти к созданию цифровых электроподстанций (ЦПС) [15], которые разрабатываются на основе стандарта МЭК 61850 «Коммуникационные сети и системы подстанций» и охватывают современные технические условия и стандарты по проектированию, управлению проектами, коммуникационным механизмам [14].

**Цель работы:** анализ организационной структуры цифровой электроподстанции и выбор подхода к разработке ее математической модели.

**Материал и методы исследований:** методы теории автоматического управления, элементов теории планирования эксперимента, теории измерений, математического моделирования.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Существуют различные определения цифровой подстанции:

1. Цифровая подстанция – подстанция, оснащенная системами контроля, управления и защиты, информационный обмен между которыми выполняется только в цифровом виде по последовательным каналам связи на единых протоколах [9].

2. Цифровая подстанция – подстанция, состоящая из интеллектуального первичного и вторичного оборудования, соединенного посредством протокола связи МЭК 61850, обеспечивающая эффективное использование информации о процессах на подстанции, повышение согласованности действия различных видов оборудования [7].

3. Цифровая подстанция – подстанция, оснащенная комплексом цифровых устройств, обеспечивающих функционирование систем релейной защиты и автоматики, учета электроэнергии, АСУ ТП, регистрации аварийных событий по протоколу МЭК 61850 [13].

При этом построение цифровой подстанции однозначно основано на протоколе МЭК 61850, разделы № 1 и 5 которого описывают организационную структуру цифровой подстанции. В первом разделе установлены основные принципы, положенные в систему автоматизации, работающей в соответствии с данным протоколом, определена 3-уровневая архитектура системы автоматизации, взаимосвязь между подстанциями, а также между уровнями и внутри каждого из уровней. В пятом разделе данная информация детализируется, вводится понятие логических узлов [5], опи-

сывается их классификация в соответствии с функциональным назначением.

Обобщая представленную информацию, можно заключить, что ЦПС разделена на три уровня:

- 1) полевой уровень (уровень процесса);
- 2) уровень присоединения;
- 3) станционный уровень.

Полевой уровень состоит из высоковольтного оборудования, например силовых трансформаторов, выключателей, разъединителей и др., в которые встроены микропроцессорные системы диагностики, первичных датчиков для сбора аналоговой информации (трансформатора тока и напряжения) и шины процесса, которая представляет собой информационную сеть, соединяющую первичное оборудование и подстанционные автоматизированные системы (устройствами уровня присоединения) по протоколу МЭК 61850-9-2 SV. По данной шине передаётся информация о положениях коммутационного оборудования, управляющие команды, информация о состоянии подстанционного оборудования и его параметрах, а также информация, описывающая в реальном времени формы кривых тока и напряжения различных присоединений.

Для реализации цифровой передачи данных о параметрах, характеризующих состояние подстанции, в их состав введены оптические трансформаторы тока и напряжения [4].

Уровень присоединения состоит из интеллектуальных электронных устройств управления и мониторинга, представляющих собой терминалы релейной защиты, противоаварийную автоматику, счётчики АСКУЭ, системы мониторинга трансформаторного оборудования и др.

Станционный уровень состоит из серверов верхнего уровня, а именно сервера базы данных, сервера SCADA, сервера телемеханики, сервера сбора и передачи технологической информации и т.д., а также автоматизированного рабочего места (АРМ) персонала подстанции и шины станции.

Шина станции представляет собой информационную сеть, обеспечивающую аппаратный обмен сигналами между интеллектуально-электронными устройствами (ИЭУ) – устройствами защиты, автоматики, телемеханики, измерительными устройствами и др. Соответственно, данные устройства отвечают за защиту, управление и мониторинг первичных устройств (горизонтальный обмен информацией в соответствии с МЭК 61850-8-1 GOOSE), а также передачу информации на верхний уровень в соответствии с протоколом МЭК 61850-8-1 MMS (вертикальный обмен информацией). Отсюда

образуется одно из преимуществ цифровой подстанции, а именно то, что применение станционной шины значительно уменьшает количество медных проводов, что, соответственно, ведет к упрощению настройки, проектирования и эксплуатации системы в целом.

Кроме того, для точной синхронизации измерений во времени используются сервера точного времени, которые могут обеспечивать точную (несколько микросекунд) и грубую (несколько миллисекунд) синхронизацию.

Касательно вторичного оборудования, а именно систем релейной защиты (РЗ), противоаварийной автоматики (ПА), автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) – количество шкафов данных систем не уменьшилось. Кроме того, на существующих подстанциях большинство технологических параметров имеют аналоговый или дискретный вид. Для обеспечения связи между параметрами, представленными в аналоговом и цифровом видах, в современной АСУ ТП используются устройства связи с объектом (УСО). Модули УСО могут входить в состав датчиков (в этом случае датчики называют интеллектуальными) или промышленных компьютеров. Примером могут служить датчики, выдающие готовый цифровой сигнал. В этом случае неясная граница между первичным преобразователем и УСО проходит внутри датчика. С другой стороны, УСО могут быть выполнены в виде АЦП/ЦАП-плат [10].

На рис. 1 представлена структурная схема 3-уровневой системы ЦПС. Принцип функционирования 3-уровневой системы аналогичен общим принципам работы любого технологического процесса и заключается в том, что первичное высоковольтное оборудование обеспечивает преобразование электроэнергии одного класса напряжения в другой, оптические трансформаторы тока и напряжения обеспечивают измерение параметров электроэнергии, такие как значение тока и напряжения по фазам *A, B, C* и нейтрали. Интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) от оптических трансформаторов по шине процесса получают мгновенные значения токов и напряжений. В свою очередь, интеллектуальные электронные устройства осуществляют расчет таких параметров, как значения тока и напряжения по фазе *A, B, C* и среднего значения по сумме трех фаз, значения тока и напряжения нейтрали, значения линейного напряжения сети отдельно для каждой фазы *A, B, C* и среднего значения по сумме трех, значения частоты напряжения сети отдельно для каждой фазы *A, B, C* и среднего значения по сумме трех, значения активной, реактивной и полной мощности в фазе *A, B, C* и по сумме трех фаз, значения коэффициентов мощности в фазе *A, B, C* и среднего значения по сумме трех фаз, угла между током и напряжением в фазе *A, B, C*, а также осуществляется подсчет и накопление потребленной энергии. Помимо перечисленных параметров, осу-

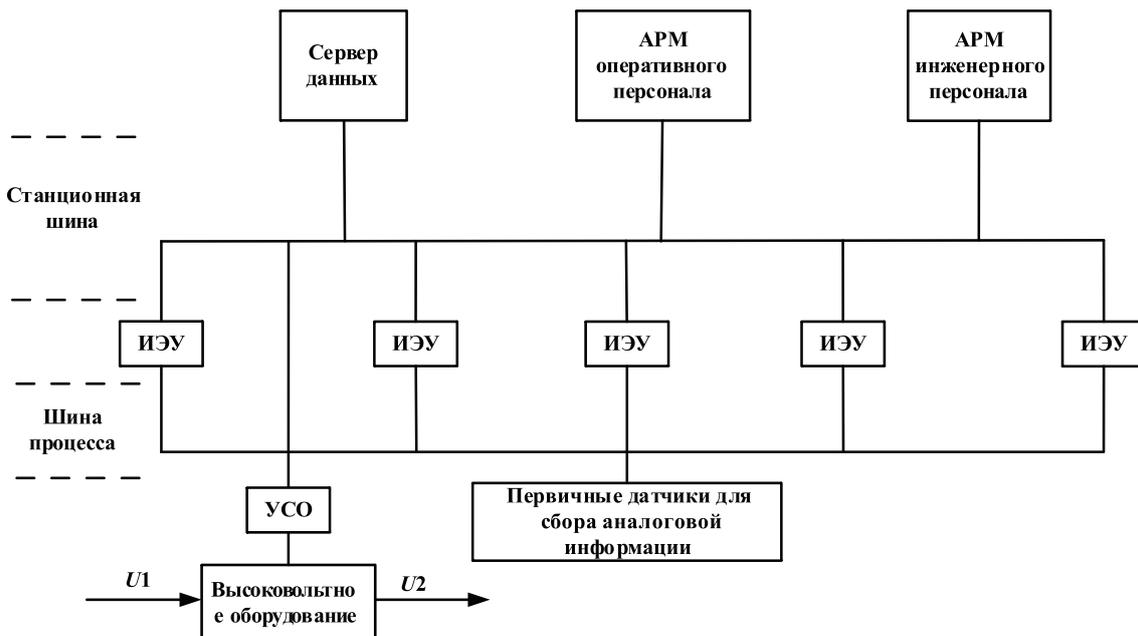


Рис. 1. Структура цифровой подстанции

ществляется расчет параметров качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ Р 54149-2010 [2], таких как среднеквадратичного значения тока и напряжения по фазам, отклонения среднеквадратичного значения напряжения, длительность провала напряжения, длительность временного перенапряжения.

режима рабочего процесса;  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k$  – факторы, действующие на технологическую систему и условия технологического процесса. Установление качественных и количественных связей между перечисленными величинами является задачей разработки математической модели. В общем математическую модель можно записать следующим образом:

$$K = f_1(a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_m; P_1, P_2, \dots, P_m; \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k);$$

$$C = f_2(a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_m; P_1, P_2, \dots, P_m; \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k; j),$$

где  $j$  – фактор, оказывающий влияние на себестоимость.

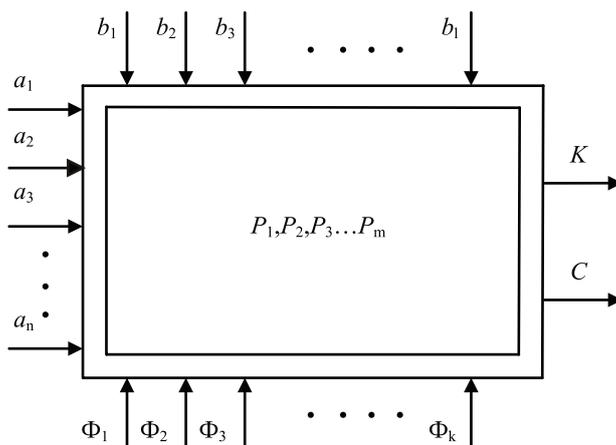


Рис. 2. Схема формирования выходных показателей технологического процесса

С интеллектуальных электронных устройств, обеспечивающих автоматическую диагностику элементов цифровых подстанций, информация передается на сервер с целью хранения информации и ее анализа (например, аварийной ситуации) и автоматизированные рабочие места, для дистанционного контроля подстанций.

На основании рассмотрения ЦПС как технологического процесса предлагается использование подходов данного направления для разработки математических моделей. Математическая модель технологического процесса [8] представляет собой совокупность уравнений, определяющих значение выходных его показателей, и ограничения на те или иные аргументы уравнений в виде конкретных значений или неравенств [1].

В общем виде технологический процесс можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 2.

Обозначим выходные показатели через  $K$  и  $C$  ( $K$  – качество преобразования электроэнергии;  $C$  – себестоимость электроэнергии);  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – характеристики поступающей электроэнергии;  $b_1, b_2, \dots, b_m$  – характеристики технологической системы;  $P_1, P_2, \dots, P_m$  – элементы

Для решения данной задачи наиболее эффективными являются методы теории планирования эксперимента [3]. Стоит отметить, что разработка модели технологического процесса может быть выполнена с применением метода главных компонент [6]. Данный подход позволяет сократить количество факторов, используемых для построения модели за счет выделения только наиболее значимых.

### Заключение

Переход на цифровые унифицированные интерфейсы сбора и обмена информацией обеспечивают следующие преимущества ЦПС:

- 1) упрощение вторичных присоединений, в результате замены электрических кабелей на волоконно-оптические линии связи;
- 2) повышение качества измерения, в результате перехода на цифровой формат, передача данных осуществляется без дополнительных погрешностей, упрощается вопрос электромагнитной совместимости, что вызывает сокращение погрешностей измерения тока и напряжения;

3) отсутствие электрической связи между первичным и вторичным оборудованием, электромагнитные помехи с первичного оборудования не передаются во вторичные цепи;

4) единая информационная платформа обеспечивается тем, что построение цифровой подстанции основано на протоколе МЭК 61850, в котором сделан большой акцент на унификацию всех устройств.

Перечисленные преимущества обуславливают предпосылки создания цифровых подстанций, а именно:

1) в результате замены электрических кабелей на оптические снижаются капитальные затраты по его монтажу;

2) устраняется монополия поставщика терминального оборудования за счет стандартизации и унификации благодаря протоколу МЭК 61850;

3) снижение эксплуатационных расходов за счет того, что осуществляется дистанционный контроль состояния оборудования, а также повышение надежности работы подстанции благодаря средствам самодиагностики.

Рассмотрение процессов на ЦПС с точки зрения теории организации технологических процессов является перспективным подходом к разработке математических моделей ЦПС, которые могут быть в дальнейшем эффективно использованы при проектировании подстанций, а также для диагностики их состояния.

*Результаты работы получены при поддержке гранта РФФИ № 16-38-60175 «Разработка и исследование математических моделей, методов и алгоритмов решения обратных задач диагностики сложных технических систем на примере цифровых подстанций». Работы были выполнены с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ(НПИ).*

#### Список литературы

1. Базров Б.М. Технология газонефтяного и нефтехимического машиностроения. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

2. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2010–12–21. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

3. Гусейнов Ф.Г. Планирования эксперимента в задачах электроэнергетики / Ф.Г. Гусейнов, О.С. Мамедяров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 151 с.

4. Измерительные оптические трансформаторы тока и напряжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/KPD-5/proline.pdf> (дата обращения 01.06.2016).

5. Информационная модель устройства в соответствии с МЭК 61850 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://digitalsubstation.ru/blog/2012/12/10/informatsionnaya-model-ustrojstva-v-s/> (дата обращения 01.06.2016).

6. Ланкин М.В. Приборы и методы контроля магнитных свойств постоянных магнитов: монография; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2007. – 292 с.

7. Отраслевые новости: энергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ruscable.ru/news/2016/02/04/Potreblenie\\_elektroenergii\\_v\\_EES\\_Rossii\\_v\\_yanvare/](http://www.ruscable.ru/news/2016/02/04/Potreblenie_elektroenergii_v_EES_Rossii_v_yanvare/) (дата обращения 01.06.2016).

8. Пономарев В.Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / В.Б. Пономарев, А.Б. Ложкарев. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 129 с.

9. Распределенная мультиагентная система контроля и управления энергокластером [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gridology.ru/projects/103> (дата обращения 01.06.2016).

10. Устройства связи с объектом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zavantag.com/docs/index-17511098-1.html> (дата обращения 01.06.2016).

11. Цифровые подстанции сэкономят энергию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rg.ru/2013/06/14/stancii.html> (дата обращения 01.06.2016).

12. Цифровая подстанция. NR Electric Co., Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ntc-power.ru/media/files/Presentation\\_CPS.pdf](http://www.ntc-power.ru/media/files/Presentation_CPS.pdf) (дата обращения 01.06.2016).

13. Цифровая подстанция. МЭК 61850 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://etz-vektor.ru/products/buklet\\_MEK\\_61850.pdf](http://etz-vektor.ru/products/buklet_MEK_61850.pdf) (дата обращения 01.06.2016).

14. Цифровая подстанция. Подходы к реализации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energосmi.ru/archives/9450> (дата обращения 01.06.2016).

15. Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 228 с.