

## Системы мониторинга, управления, защиты и диагностики распределительных сетей<sup>1</sup>

ШУЛЬГА Р.Н., ШУЛЬГА А.Р., КОВАЛЕВ Д.И., ВИНОКУРОВ В.Н., КОШЕЛЕВ М.А.

*Выполнен анализ систем мониторинга, контроля и управления распределительными энергосистемами по направлениям динамического рейтинга пропускной способности, систем векторных измерений, облачной информационной технологии, баз данных и устройств FACTS для повышения управляемости и устойчивости. В части динамического рейтинга пропускной способности используются многочисленные датчики тока, напряжения, метеоусловий, тензо- и температуры проводов и другие, которые с использованием терминалов на опорах и на подстанции, а также беспроводной связи осуществляют контроль для управления потоками мощности в сети, не допуская ложного отключения потребителей. Анализируется опыт разработок и эксплуатации интегрированных систем мониторинга зарубежных и отечественных производителей. В части применения синхронных векторных измерений напряжений и токов используются датчики углов фазных напряжений, которые позволяют повысить пропускную способность линий, не допуская нарушения устойчивости энергосистемы. В связи с недостаточной управляемостью и устойчивостью существующих распределительных систем предлагается их структурная схема с сочетанием устройств FACTS, датчиков метеоданных, систем динамического рейтинга пропускной способности, векторных измерений, формирования энергоинформационных сетей на базе облачной информационной технологии в реальном масштабе времени.*

**Ключевые слова:** *распределительная энергосистема, пропускная способность, система мониторинга, векторное измерение, облачная информационная технология, база данных*

Во всем мире все большую актуальность приобретает технология Smart Grid, особенно важно ее применение на подстанциях, где находится дорогостоящее оборудование, которое требует постоянного мониторинга и диагностики его состояния. В последнее время получил распространение мониторинг воздушных линий (ВЛ) электропередачи и распределения электроэнергии.

Используются многочисленные датчики тока, напряжения, метеоусловий, тензо- и температуры проводов и другие, которые с использованием терминалов на опорах и на подстанции, а также беспроводной связи осуществляют контроль для управления потоками мощности в сети, не допуская отключения потребителей.

Установка многочисленных датчиков на воздушных линиях — это огромный шаг вперед в направлении развития сетей переменного тока. При их комбинировании с современными средствами управления сетью процесс мониторинга приобретает новый аспект. Характеристики воздушных линий в режиме реального времени можно включить в прогноз, что значительно увеличит показатели производительности сети.

Разработка системы позволяет осуществить повышение пропускной способности существующих ВЛ и повысить надежность и устойчивость энергоснабжения.

В статье дано описание системы мониторинга, управления, защиты и диагностики (СМУЗ) для распределительных сетей, включая ВЛ и цифровую подстанцию с учетом использования новых технологий Smart Grid:

- 1) текущего измерения пропускной способности (DLR) взамен статического подхода к оценке допустимого объема передаваемой энергии (SLR);
- 2) применения синхронных векторных измерений напряжений и токов;
- 3) формирования энергоинформационных распределительных сетей и разработки облачной информационной технологии в реальном масштабе времени.

**Укрупненная принципиальная схема работы СМУЗ.** Укрупненная принципиальная схема СМУЗ представлена на схеме рис. 1 по данным АББ [1]. На рис. 1: PMU — регистраторы векторных параметров, синхрофазоры (фазоры) — измерители углов фазных напряжений; DSA — измерители аварийного расхождения углов; MMS — сетевой протокол передачи данных.

Указанная СМУЗ разработки АББ под названием PSGuard Wide Area Monitoring System содержит

<sup>1</sup> НИОКР выполняется в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 02.G25.31.0071 от 23.05.2013).



Рис. 1. Принципиальная схема СМУЗ

систему мониторинга температуры LTM и базу данных PSG. Регистраторы векторных параметров PMU наряду с широким диапазоном датчиков позволяют рассчитать фактический импеданс линии, поперечную полную проводимость и сопротивление, которые вместе с метео данными обеспечивают оператору создание модели сети в режиме реального времени. Устройства PMU обеспечивают интервалы измерений в промежутках до 1 с в заданной зоне. Система запоминает, передает и анализирует информацию со всех концов системы и позволяет оператору определить допустимую нагрузку линий.

Все датчики обладают высоким уровнем промышленного освоения, производятся серийно, что обеспечивает их дешевизну.

Система мониторинга и диагностики линий электропередачи и состояния подстанции состоит из двух основных блоков датчиков — датчики на опорах и линиях и датчики на подстанции, а также системы управления датчиками.

В состав блоков на линиях и опорах входят: датчики температуры, отклонения от горизонтали, фиксирующий вибрации, скручивания проводов, движения провода в привязке к погоде, с использованием технологии лазерной локации, обнаружения повреждений, кроме того — устройства измерения тока, напряжения, измерения стрелы провеса провода, контроля изоляции и регистратор импульсных токов.

Блоки датчиков на линиях и подстанциях описаны в [2].

**Опыт эксплуатации интегрированных СМУЗ<sup>2</sup>.** Компания Siemens объединила технологию дина-

мической оценки (DLR) и интегрированную схему мониторинга состояния подстанции (ISCM), которая стала платформой для подключения различных систем мониторинга линий электропередачи и распределения электроэнергии. Суть ISCM в том, что она анализирует состояние компонентов передачи из центрального пункта управления в режиме реального времени. Используемые датчики, расположенные по всей системе, позволяют следить за стрелой провеса, нагрузкой от обледенения, температурной оценкой линии и наличием резервных мощностей.

Для диагностики линий электропередачи Lindsey Manufacturing Co совместно с Idaho National Labs разработали технологию метеорологических лазерных локаторов в сочетании с другими датчиками, что позволяет измерить стрелу провеса проводов, температуру проводов, их наклон, скручивание, расстояние до любого объекта под линией, а также отслеживать вибрацию проводов под действием ветра и пляску проводов.

Объединенными усилиями Nexans и Alstom создали программные средства оптимизации сетей, в результате чего использование информации в режиме реального времени позволяет безопасно увеличивать оперативную пропускную способность ВЛ на 30%. Программное обеспечение Alstom выдает информацию оператору о том, какие нужно предпринять действия для достижения заданных условий без ущерба для надежности.

<sup>2</sup>По данным [2] на основе каталогов фирм-производителей.

Компания ABB [1] использует интегрированную систему PSGuard, в которой используются регистраторы векторных параметров, широкий диапазон датчиков для расчета фактического импеданса линии, поперечной полной проводимости и сопротивления, которые вместе с метеоданными обеспечивают оператору создание модели сети в режиме реального времени.

Все большее внимание уделяется центрально-сетевой оптимизации, которая включает оптимизацию уровня напряжения регулированием отпаек трансформаторов, управление активами в части капзатрат, обнаружением повреждений, прогнозом нагрузки и спроса на электроэнергию.

Отечественные разработки в области СМУЗ выглядят заметно скромнее. Так, группа компаний ОПТЭН предлагает онлайн-систему мониторинга ВЛ, использующую датчики температуры проводов, их положения и датчики тока, которые по сети GSM оценивают пропускную систему ВЛ. Такие системы в количестве 100 шт. установлены в МРСК, и зона их применения расширяется.

Более комплексным решением является система мониторинга, защиты, управления, диагностики (МЗУД), разработанная в НИУ «МЭИ» совместно с ВЭИ [3], приведенная на рис. 2, которая позволя-

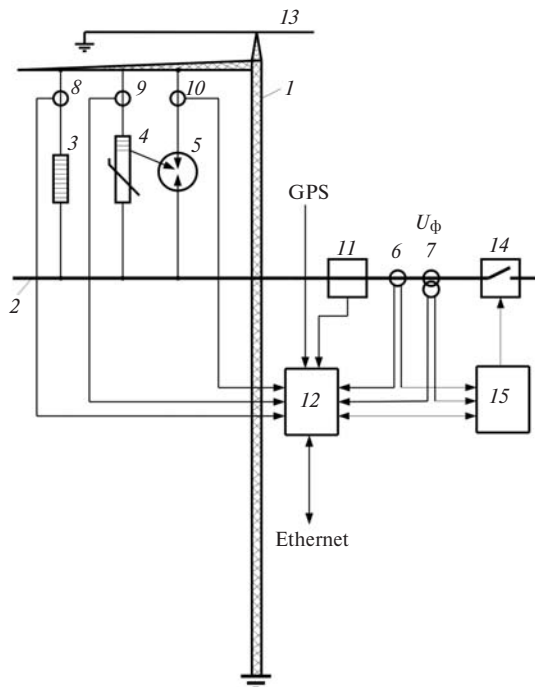


Рис. 2. Система МЗУД: 1 – заземленная опора ВЛ; 2 – провод; 3 – блок линейного изолятора с подвесным ОПН; 4 – ограничитель перенапряжений; 5 – управляемый разрядник; 6 – датчик тока на проводе; 7 – датчик напряжения на проводе; 8 – датчик тока блока линейного изолятора; 9 – то же ограничителя перенапряжений; 10 – то же управляемого разрядника; 11 – блок отбора мощности от провода; 12 – микропроцессорный терминал; 13 – грозозащитный трос; 14 – коммутационный модуль с вакуумным выключателем в расщепке провода; 15 – модуль релейных защит, установленный на опоре

ет получить в реальном масштабе времени данные по состоянию изоляции, токонесущей способности проводов, защищать от перенапряжений и сверхтоков и передавать данные на удаленный диспетчерский пункт по каналу Ethernet.

Для работы в реальном масштабе времени на микропроцессорный терминал поступают синхронимпульсы от системы GPS, а выходы терминала связаны через Ethernet с диспетчерским пунктом.

Наиболее оптимальной топологией для построения сети сбора данных является концепция «соты», а протокол для передачи данных – ZigBee. При этом устройства приема–передачи могут быть унифицированными для ряда задач, в том числе для реализации функций логических оперативных блокировок безопасности на подстанции.

Указанная система, дополненная реклоузерами, датчиками метеоусловий, пляски и провеса проводов позволяет осуществить полноценный контроль, защиту и управление распределительной сетью.

Основными элементами системы являются подвесной ОПН с параллельно подключенным управляемым разрядником, которые позволяют отказаться от грозозащитного троса, хотя он показан на рис. 2, и выгодно отличаются от мультикамерных защитных систем разработки ОАО «Стример» (Санкт-Петербург). Защитная характеристика последних зависит от внешних условий и полярности приложенного импульса и, хотя система достаточно автономна, никак не связана с мониторингом ВЛ.

Для мониторинга подвесных ОПН разработаны различные регистраторы импульсных токов (РИТ) и токов утечки. Наиболее распространенной разработкой является Excount-2 (ABB), который регистрирует импульсные токи, разделяя их на пять диапазонов (до 10 кА). Выполненная разработка РИТ [4] позволяет в реальном масштабе времени дистанционно получать реально измеренные амплитуды токов ОПН до 20 кА и параметры фронта и длительности грозовых и коммутационных импульсов, что позволяет оценить ресурс ОПН и составить представление о грозопоражаемости трассы и района.

Разработанные по тематике МЗУД подвесной ОПН и РИТ показаны на рис. 3.

Основными элементами датчиков тока являются катушки Роговского на печатных платах для измерения импульсных токов и датчики Холла для измерения малых токов утечки. Для измерения напряжений наиболее перспективны емкостные металлопленочные делители напряжения.

Наиболее перспективными устройствами для высоковольтных измерений являются цифровые (электронные) трансформаторы напряжения ЦДН 110 кВ, а также тока и напряжения ЦДТН [5], при-

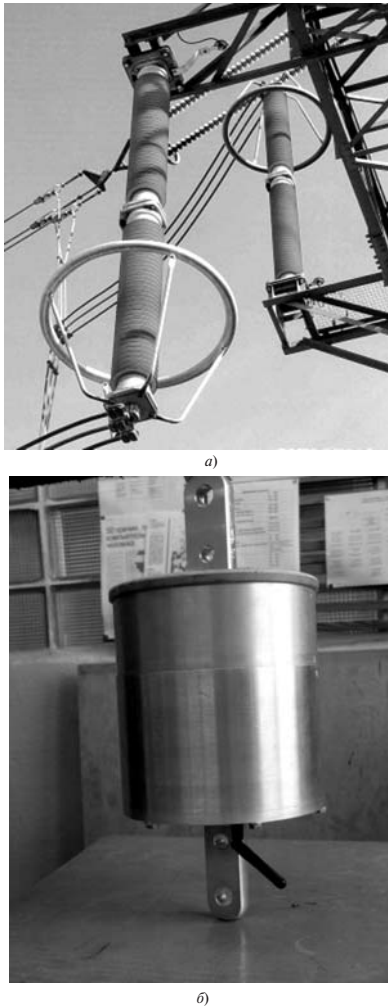


Рис. 3. Подвесной ОПН (а) и РИТ (б)

веденные на рис. 4,а и б, которые предназначены для применения на традиционных и цифровых подстанциях и выгодно отличаются по стоимости и условиям применения от оптических аналогов, например, производства ЗАО Профотек (г. Москва) и NXTRPhase (США). Основными элементами ЦДТН являются катушки Роговского, емкостные делители, микроэлектроника и волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Выходные сигналы указанных устройств соответствуют протоколу МЭК 61850. На рис. 4,в показаны емкостные делители (ЕДН) на 110 и 35 кВ, на рис. 4,г — фото катушек Роговского (КР).

Изобилие и дешевизна датчиков различного назначения приводят к радикальному изменению комплектования опор и ВЛ. Так, на рис. 5 показана конструкция ВЛ NYPA, снабженная многочисленными датчиками тока и оборудованием для мониторинга, которые позволяют определить динамическую пропускную способность линии (DLR) в реальном времени [1].

Возможности повышения пропускной способности ВЛ за счет охлаждения проводов под напо-

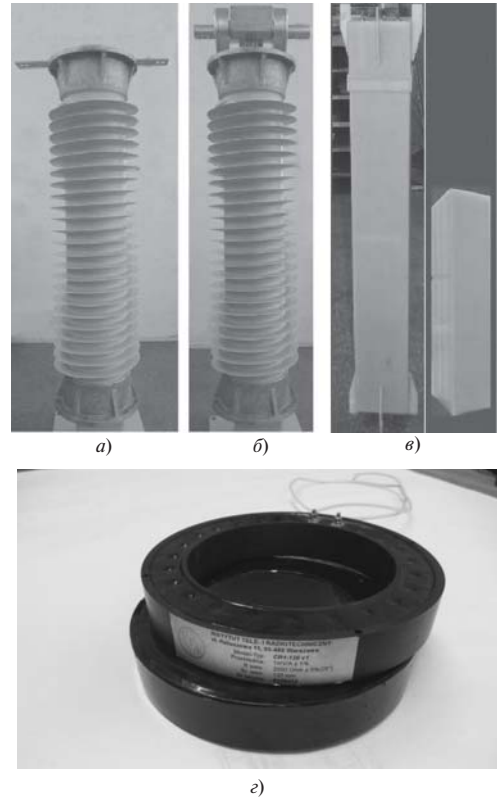


Рис. 4. ЦДН (а), ЦДТН 110 (б), ЕДН 110 и 35 (в), КР (г)

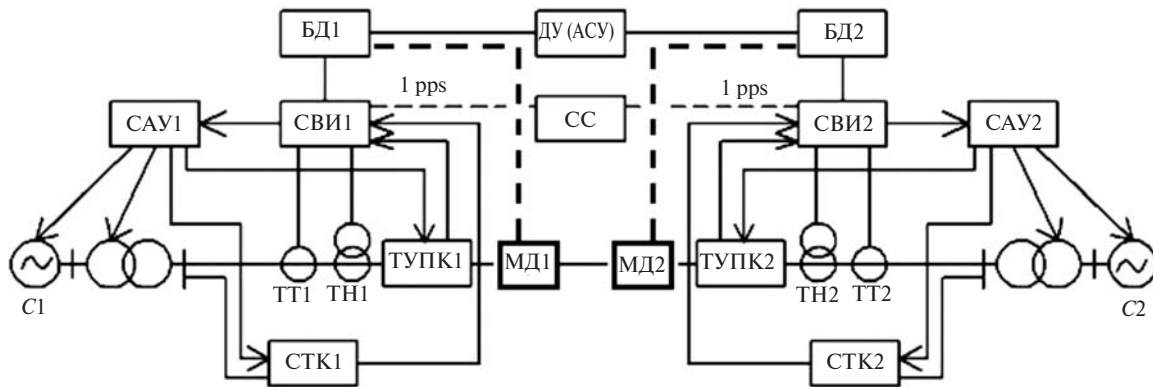
ром ветра достаточно актуальны, однако недостаточная управляемость традиционных сетей переменного тока делает эту задачу малоперспективной. Решение задачи в полном объеме может быть достигнуто применением устройств FACTS не только на подстанциях, но и на опорах линий.

Наиболее простым решением, предлагаемым компанией TVA, является введение распределенных и последовательно включенных в провода индуктивных сопротивлений, что позволяет управлять потокораспределением в сети [1].

Возможно решение по установке на опорах небольших по мощности статических тиристорных компенсаторов СТК, успешно применяемых в Япо-



Рис. 5. Конструкция ВЛ NYPA



**Рис. 6.** Структурная схема синхронного векторного измерения СВИ на переменном токе при наличии элементов FACTS (ТУПК или СТК):  $C1, C2$  – отправная и приемная энергосистемы;  $ТТ1, ТТ2$  – датчики тока;  $ТН1, ТН2$  – датчики напряжения;  $БД1, БД2$  – базы данных подстанций;  $МД1, МД2$  – метеоданные;  $СС$  – спутник связи;  $СВИ1, СВИ2$  – системы синхронного векторного измерения напряжений подстанций;  $САУ1, САУ2$  – системы автоматического управления подстанций;  $ДУ (АСУ)$  – диспетчерское управление или автоматизированное управление

нии, которые позволяют компенсировать перетоки реактивной мощности, существенно снижая потери в сети.

Еще более радикальным устройством как для компенсации потерь, так и управляемости линий являются устройства тиристорно-управляемой продольной компенсации (ТУПК), которые обычно устанавливаются на подстанциях по концам ВЛ.

На рис. 6 приведена предлагаемая структурная схема ВЛ переменного тока, оборудованная устройствами FACTS (ТУПК и СТК), системой синхронных векторных измерений (СВИ), системой мониторинга метеоданных (МД), которая позволяет реализовать облачную информационную топологию для контроля, мониторинга и управления линией и энергосистемой [6, 7].

Система работает следующим образом: от электронных измерительных трансформаторов тока  $ТТ$  и напряжения  $ТН$  сигналы непрерывно поступают в систему СВИ каждой подстанции, причем обновление происходит при поступлении сигнала 1 pps от спутника связи  $СС$  через систему GPS (ГЛОНАСС).

В системе СВИ происходит обработка, преобразование и выдача сигналов в базы данных каждой подстанции  $БД$ , где они сохраняются и обновляются. С выхода  $БД$  каждой подстанции ежесекундно или по запросу данные от трех до восьми параметров ВЛ поступают на диспетчерское управление  $ДУ$  или  $АСУ$ . Кроме того, указанные текущие параметры поступают в  $САУ$  каждой подстанции, выходы которой связаны с медленным (минутный диапазон) регулированием мощности  $P$ , напряжения  $U$  с помощью отпаек трансформаторов и быстрым (миллисекундный диапазон) сеточным регулированием углов управления ТУПК и/или СТК, которые безынерционно изменяют режим их работы относительно номинальных значений параметров. В

случае глубоких и длительных отклонений режима  $САУ$  каждой подстанции осуществляет воздействие на регуляторы генераторов в примыкающих системах, которые осуществляют их разгрузку в аварийных режимах, а также размыкают выключатели со стороны переменного тока. В аварийных режимах  $САУ$  подстанций осуществляют блокировку или форсировку тиристорных компенсаторов.

При изменении метеоусловий, например температуры, скорости ветра и других, сигналы от датчиков  $МД$  поступают в базы данных, откуда передаются на  $ДУ$  и  $САУ$  с целью изменения уставок напряжения  $U$  и мощности  $P$  каждой подстанции.

Указанная система – перспективное направление развития разработанной сети сбора данных в рамках комплекса оперативных блокировок безопасности с использованием существующих линий связи и программно-аппаратных комплексов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вульф Д. Чем больше информации о состоянии сети, тем выше ее пропускная способность. — Transmission and Distribution World (Russian Edition), 2014, январь–февраль, с. 32–35.
2. Вульф Д. Мониторинг передачи и распределения электроэнергии в реальном времени. — Transmission and Distribution World (Russian Edition), 2014, январь–февраль, с. 26–31.
3. Патент на ПМ № 124850 от 10.02.2013. Устройство защиты, измерения, диагностики линий передач/ И.М. Соловьева, А.Р. Шульга, Р.Н. Шульга.
4. Патент на ПМ № 119536 от 20.08.2012. Регистратор импульсных токов ограничителя перенапряжений/ С.И. Хренов, С.В. Измайлов, К.А. Змиева, А.Р. Шульга.
5. Ермилов И.В., Шульга А.Р., Шульга Р.Н., Змиева К.А., Ковалев Д.И. Электронные трансформаторы напряжения для распределительных сетей. — Электротехника, 2014, № 7, с. 26–31.
6. Измайлов С.В., Шульга А.Р., Шульга Р.Н., Змиева К.А. Новые подходы к созданию энергоинформационных распределительных сетей. — Электротехника, 2014, № 2, с. 39–44.
7. Измайлов С.В., Шульга А.Р., Шульга Р.Н. Реализация облачной энергоинформационной технологии для контроля, мо-

мониторинга и управления распределительными энергосистемами. — Электротехника, 2013, № 12, с. 39—43.

[17.04.15]

**А в т о р ы :** **Шульга Роберт Николаевич** окончил МГТУ им. Баумана в 1963 г. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование переходных процессов в ППТ 1500 кВ Экибастуз-Центр». Начальник отдела Всероссийского электротехнического института.

**Шульга Андрей Робертович** окончил Институт тепловой и атомной энергетики Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» — НИУ «МЭИ» в 2014 г. Системный аналитик ООО «Евроком».

**Ковалев Дмитрий Игоревич** окончил НИУ «МЭИ» в 2007 г. Старший преподаватель кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» (ТЭВН) НИУ «МЭИ».

**Винокуров Виталий Николаевич** окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ — ныне НИУ «МЭИ») в 1996 г. Ведущий инженер кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

**Кошелев Михаил Алексеевич** окончил ЭЭФ МЭИ в 1980 г. В 1991 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка метода создания заряженных аэрозольных областей, способных иницировать искровые разряды». Старший преподаватель кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 11, pp. 12–17.*

## Systems of Monitoring, Control, Protection and Diagnostic of Distribution Networks

**SHUL'GA Robert Nikolayevich** (*All-Russian Electrical Engineering Institute, Moscow, Russia*) — *Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)*

**SHUL'GA Andrei Robertovich** (*LLC «Evrocom», Moscow, Russia*) — *Systems analyst*

**KOVALEV Dmitrii Igorevich** (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia*) — *Senior Lecturer*

**VINOKUROV Vitalii Nikolayevich** (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — *Leading Engineer*

**KOSHELEV Mikhail Alekseyevich** (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — *Senior Lecturer, Cand. Sci. (Eng.)*

*The analysis systems of monitoring, control and management of the distribution power systems in the areas: dynamic load rating, vector measurements, cloud information technology, databases and FACTS devices to enhance controllability and stability. Regarding a dynamic load rating numerous sensors of current, tension, meteoconditions, tenzo- and temperatures of wires, etc. which with use of terminals on support and on substation, and also a wireless communication control power streams in a network are used, without allowing shutdown of consumers. Experience of development and operation of the integrated systems for monitoring foreign and domestic producers is analyzed. As part of the application of synchronous vector measurements of voltage and current sensors of angles of phase voltages are used, which allow to increase the capacity of lines, avoiding violations of power system stability. Due to the insufficient controllability and stability of existing distributive systems their block diagram with a combination of FACTS devices, sensors of meteoconditions, systems of a dynamic load rating, vector measurements, formations of power information networks on the basis of cloudy information technology in real time is offered.*

**Key words:** *distribution power system, load, system of monitoring, vector measurement, cloud information technology, database*

### REFERENCES

1. **Vul'f D.** *Transmission and Distribution World (Russian Edition)*, 2014, January–February, pp. 32–35.

2. **Vul'f D.** *Transmission and Distribution World (Russian Edition)*, 2014, January – February, pp. 26–31.

3. **Patent No. 124850** ot 20.08.2012. *Ustroystvo zashchity, izmereniya, diagnostiki linii peredach* (Apparatus protection, measurement, diagnosis transmission line)/I.M. Solov'yeva, A.R. Shul'ga, R.N. Shul'ga.

4. **Patent No. 119536** ot 20.08.2012. *Registrator impul'snykh tokov ograniचितelya perenapryazhenii* (Registrar pulse current surge arrester)/S.I. Khrenov, S.V. Izmailov, K.A. Zmiyeva, A.R. Shul'ga.

5. **Ermilov I.V., Shul'ga A.R., Shul'ga R.N., Zmiyeva K.A., Kovalev D.I.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2014, No. 2, pp. 26–31.

6. **Izmailov S.V., Shul'ga A.R., Shul'ga R.N., Zmiyeva K.A.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2014, No. 2, pp. 39–44.

7. **Izmailov S.V., Shul'ga A.R., Shul'ga R.N.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2013, No. 12, pp. 39–43.

