

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ «ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭНЕРГОСИСТЕМЫ»

ВОЛОШИН А.А., ВОЛОШИН Е.А., ЛЕБЕДЕВ А.А., «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

В статье описывается архитектура и функциональные возможности программно-аппаратного комплекса (симулятора), осуществляющего моделирование энергосистем в реальном времени (ПАК РВ) «Цифровой двойник энергосистемы» (ЦДЭС), разработанного в Центре компетенций НТИ «Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем» на базе НИУ «МЭИ». Приводятся результаты испытаний разработанного ПАК ЦДЭС и его сравнение с ПАК RTDS. Также в статье описывается решение по использованию ЦДЭС в виде облачного сервиса.

Ключевые слова: моделирующий комплекс реального времени, цифровой двойник, релейная защита, цифровая подстанция, САПР

Один из наиболее эффективных инструментариев для разработки цифровых систем РЗА сегодня – программно-аппаратные комплексы (симуляторы), осуществляющие моделирование энергосистем в реальном времени (ПАК РВ). В качестве самого популярного ПАК РВ и в мире, и в России, без сомнений, можно назвать симулятор RTDS (Real Time Digital Simulator), разработанный компанией RTDS Technologies, Канада [1]. К числу ведущих российских пользователей ПАК RTDS относятся: научно-технические центры крупнейших энергокомпаний страны «НТЦ ЕЭС» и «НТЦ ФСК ЕЭС», ведущие разработчики и производители вторичного цифрового оборудования НПП «ЭКРА», «Прософт-Системы», «ВНИИР», ГК «Текон», «Ростелеком-Солар», а также широко известные в стране вузы: МЭИ, ТПУ, ИГЭУ, НГТУ, МФТИ, КНИТУ КАИ, Сколтех.

В 2022 г. компания RTDS Technologies ушла с российского рынка и больше не выполняет поставку нового оборудования, техническое обслуживание и обновление уже поставленного оборудования и программного обеспечения. В настоящее время в РФ отсутствуют собственные разработки и какие-либо альтернативные комплексы цифрового моделирования энергосистем в реальном времени, обладающие требуемым

набором функций и характеристиками. Через несколько лет из-за физического и морального устаревания имеющихся ПАК RTDS в РФ может сложиться ситуация, когда у отечественных разработчиков не окажется возможности на высоком качественном уровне разрабатывать и тестировать цифровые системы для электроэнергетики, что неизбежно приведет к снижению уровня научных исследований и разработок, снижению качества разрабатываемых устройств и систем, невозможности проводить аттестацию и сертификацию, и, как следствие, к увеличению числа случаев неправильной работы цифровых систем защиты и автоматики в Единой Национальной Энергосистеме.

Альтернативой созданию ПАК цифрового моделирования являются физические модели энергосистем в уменьшенном масштабе. В РФ существует всего пять таких комплексов, самые крупные из которых установлены в «НТЦ ЕЭС» и МЭИ. Но они не могут обеспечить требуемую функциональность и точность моделирования, а также требуемый темп и объем проведения испытаний. Поэтому для обеспечения технологического суверенитета в области создания цифровых систем РЗА необходимо создание российского программно-аппаратного комплекса моделирования электроэнергетических си-

стем в реальном времени. Кроме того, для обеспечения доступности функций по цифровому моделированию энергосистем для предприятий малого и среднего бизнеса, а также широкого применения в вузах требуется также создание соответствующей облачной платформы (с учетом известных ограничений по времени отклика при подключении через Интернет).

ОПИСАНИЕ ПАК «ЦДЭС»

К ПАК «ЦДЭС» для моделирования электроэнергетических систем были предъявлены требования не только в части работы в режиме реального времени и передачи данных по протоколам «цифровой подстанции». Помимо этого, ПАК ЦДЭС должен обеспечивать интеграцию в общий цифровой контур набора приложений для увеличения эффективности работы электроэнергетических систем. К таким приложениям относятся системы планирования режимов, оптимизации режимов, планирования ремонтов, планирования развития энергосистем, проактивного управления на основе прогнозов режимов. Важным функционалом, исходя из опыта работы с моделируемыми комплексами, является ввод данных о моделируемой энергосистеме, поэтому в составе комплекса программ предусматриваются модули импорта схем в формате CIM.

Моделирование электроэнергетических систем может применяться не только для решения задач проведения испытаний оборудования, но и для решения задач связанных с планированием развития энергосистем и оптимальным управлением. В связи с этим было принято решение по использованию ПАК ЦДЭС как платформы для запуска приложений. Платформа ПАК ЦДЭС включает в себя набор приложений и шину передачи данных между ними. К таким приложениям относятся: редактор электрических схем моделируемых энергосистем, симулятор энергосистем, обеспечивающий наблюдение за процессом симуляции и оперативное управление симуляцией, редактор цифровой релейной защиты (системный конфигуризатор по стандарту МЭК 61850), редактор автоматизации (по стандарту МЭК 61131), конфигуризатор виртуальных устройств РЗА, конфигуризатор виртуальных программируемых логических контроллеров (ПЛК), конфигуризатор протоколов передачи данных для внешних цифровых систем и другие. Помимо прикладных программ, в составе платформы также предусмотрены сервисные приложения, такие как приложения синхронизации времени по протоколам РТР и NTP (SNTP), приложения мониторинга аппаратных средств и человеко-машинного интерфейса шкафов ПАК ЦДЭС, приложения мониторинга работы программных средств ПАК ЦДЭС, приложение централизованной аутентификации и авторизации доступа пользователей. Области применения ПАК ЦДЭС представлены на рис. 1.

Средний уровень системы включает в себя набор приложений, предназначенных для работы в режиме реального времени. Здесь и далее под термином «реальное время» будем понимать работу программных и аппаратных компонентов в режиме периодических расчетов режима энергосистем с периодом 30 мкс. Средний уровень выполняется на базе высокопроизводительных серверов со специализированными сетевыми контроллерами с поддержкой субмикросекундной передачи данных по технологии RDMA (remote direct memory access, удаленный прямой доступ к памяти). В настоящее время применяются сетевые контроллеры Ethernet с поддержкой технологии RoCE (RDMA over Conventional Ethernet, RDMA поверх обычной сети ethernet). Данная технология позволяет



Рис. 1. Области применения ПАК РВ ЦДЭС

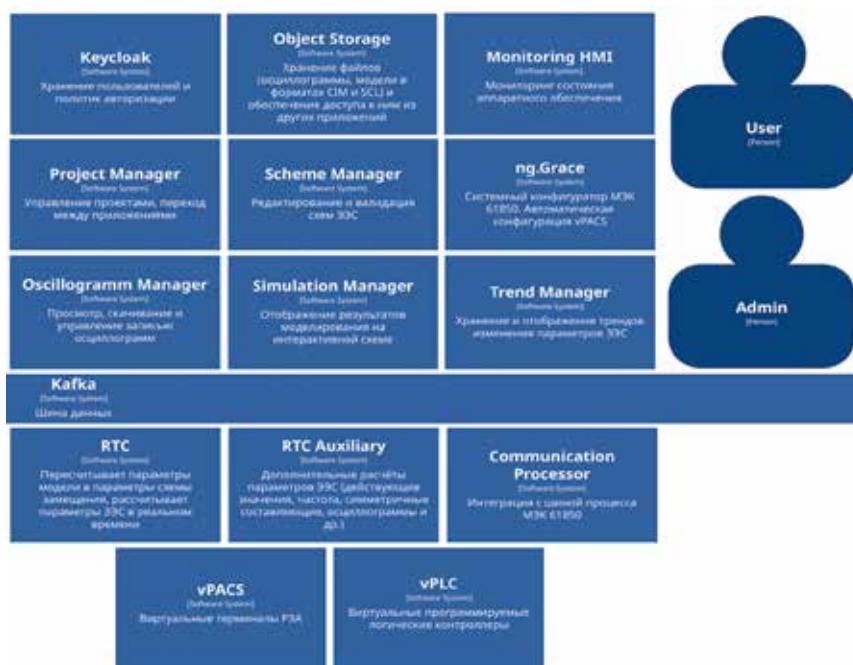


Рис. 2. Системный контекст ЦДЭС

достичь высокой скорости обмена данными между узлами сети путем передачи части оперативной памяти в управление сетевому контроллеру, который обеспечивает синхронизацию областей памяти между устройствами без задействования ядра операционной системы, таким образом снижая нагрузку на центральный процессор. В составе программных модулей среднего уровня предусматриваются модули расчета режимов энергосистем, модули дорасчета значений электрических параметров (действующие значения токов, напряжений, активной и реактивной мощности, значений потерь в трансформаторах и линиях электропередач), модули регистрации переходных

режимов (осциллографы), а также коммуникационные процессоры для передачи данных на внешние устройства по протоколам GOOSE, SV соответствующим стандарту МЭК 61850, протоколу С37.118 для передачи синхронизированных векторных измерений, протоколу UDP с передачей «сырых» данных измерений, протоколу Auroга для связи с усилителями сигналов для релейной защиты и PHIL-усилителями.

Нижний уровень ПАК РВ «ЦДЭС» включает в себя набор коммуникационных устройств для организации шины процесса по стандарту МЭК 61850 и набор высокопроизводительных серверов для запуска виртуальных устройств

РЗА и виртуальных программируемых логических контроллеров (ПЛК), устройства ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов. К коммутаторам нижнего уровня подключаются внешние устройства РЗА.

Системный контекст ПАК РВ «ЦДЭС» представлен на рис. 2.

Применяемые при разработке ПАК РВ ЦДЭС технологии (шина данных, микросервисная архитектура приложения, централизованная система авторизации, контейнеризация приложений) позволяют осуществить масштабирование системы для применения в «облачном» окружении.

Приложение для расчета процессов в режиме реального времени PMPB (расчетный модуль реального времени) – наиболее сложное для реализации приложение. Оно основано на применении расчетного модуля, использующего метод Доммеля для решения задачи расчета режима электроэнергетической сети с нелинейными элементами. В общем случае решения задачи может быть описано следующим образом [2–5]:

- аппроксимация дифференциальных уравнений отдельных элементов цепей разностными уравнениями, с которыми сопоставляются чисто резистивные схемы замещения;

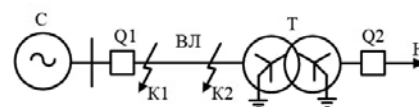


Рис. 3. Модель энергосистемы

- формирование на каждом шаге расчете систем алгебраических уравнений, соответствующих резистивным схемам замещения цепей;

- последовательное решение получаемых систем алгебраических уравнений.

В качестве основной верификационной модели была принята модель энергосистемы, показанная на рис. 3.

Модель энергосистемы содержит источник напряжения ограниченной мощности (С), линию электропередач (ВЛ), двухобмоточный трансформатор (Т), обмотки которого соединены по схеме Y0/Y0, и нагрузку (Н) на низкой стороне двухобмоточного трансформатора. В качестве коммутирующего оборудования установлены выключатели Q1 и Q2, замещающие сопротивлениями в разомкнутом и замкнутом состоянии.

В энергосистеме предполагается наличие двух точек короткого замыкания: в начале линии (точка K1) и в конце линии (точка K2).

Параметры элементов энергосистемы сведены в таблицу 1.

В соответствии с топологией рассматриваемой энергосистемы в ЦДЭС была построена электрическая цепь, вид которой показан на рис. 4.

В соответствии с представленной сетью в программном комплексе RSCAD FX была собрана модель, показанная на рис. 5.

В ходе испытаний сопоставлялись измерения мгновенных значений фазных напряжений на измерительных шинах BUS модели RSCAD (узлы «2», «9» и «16» PMPB) – далее именуемые, как напряжения на высшей стороне, – и на измерительных шинах BUS2 модели RSCAD (узлы «6», «13» и «20» PMPB) – далее именуемые, как напряжения на низшей стороне. Также сопоставлялись мгновенные значения фазных токов, протекающих через выключатель на высшей стороне трансформатора Q1 модели RSCAD (ветви «4», «14» и «24» PMPB) – далее именуемые, как токи на высшей стороне, – и протекающих через выключатель на низшей стороне трансформатора Q2 модели RSCAD (ветви «9», «19» и «29» PMPB) – далее именуемые, как токи на низшей стороне.

Таблица 1. Параметры энергосистемы

Параметр	Значение
Источник напряжения	
Линейная ЭДС, кВ	230
Начальная фаза, град	0
Полное сопротивление, Ом	10
Угол сопротивления, град	87
Форма сопротивления	R/L
Линия электропередач	
Длина линии, км	100
Погонное сопротивление постоянному току, Ом/км	0,118
Погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км	0,420
Удельная емкостная проводимость прямой последовательности, См/км	2,604·10 ⁻⁶
Отношение активного сопротивления нулевой последовательности к прямой	1
Отношение индуктивного сопротивления нулевой последовательности к прямой	3,5
Отношение емкостной проводимости прямой последовательности к нулевой	1,2
Двухобмоточный трансформатор	
Номинальная мощность, МВА	250
Напряжение короткого замыкания, %	10
Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	230
Номинальное напряжение вторичной обмотки, кВ	115
Нагрузка	
Активная мощность нагрузки, МВт	135
Выключатель	
Сопротивление в разомкнутом состоянии, Ом	1·106
Сопротивление в замкнутом состоянии, Ом	0,005
Короткое замыкание	
Сопротивление в месте КЗ, Ом	0,005

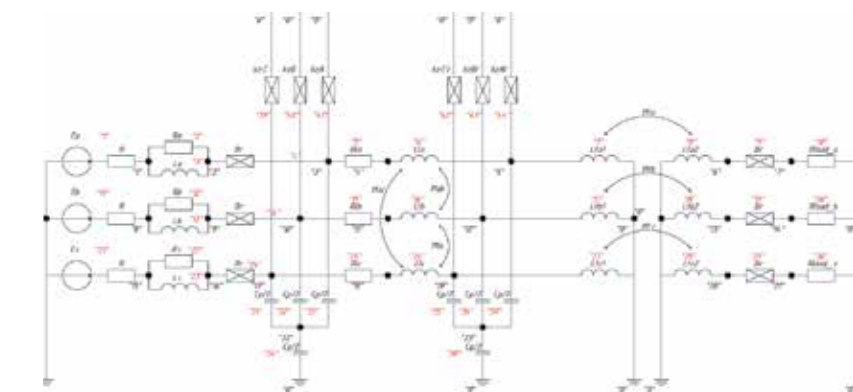


Рис. 4. Схема электрической цепи

Верификационные испытания проходили в следующих режимах:

- рабочий режим – выключатель Q2 изначально замкнут, включается выключатель Q1;
- трехфазное КЗ в точке K1 – выключатель Q2 изначально замкнут, включается выключатель Q1, через 0,08 с возникает трехфазное короткое замыкание;
- трехфазное КЗ в точке K2 – выключатель Q2 изначально замкнут, включается выключатель Q1, через 0,08 с возникает трехфазное короткое замыкание.

Далее показаны погрешности по каждой величине при последнем опыте в соответствии с описанной методикой и сравнительные осциллограммы по группам измерений (рис. 6, 7).

Сравнение показало схожие результаты для алгоритмов RTDS и PMPB и их высокую точность по отношению к аналитическим выражениям электрических величин в разных эталонных схемах.

Верификационные испытания на схемах электроэнергетической системе также показали малую погрешность PMPB по отношению к RTDS: интегральные отклонения первичных токов менее 0,15 %, первичных напряжений – порядка 0,07 %. Основная доля погрешности может быть связана с неточным сопоставлением событий по времени и различным подходом к заданию начальных

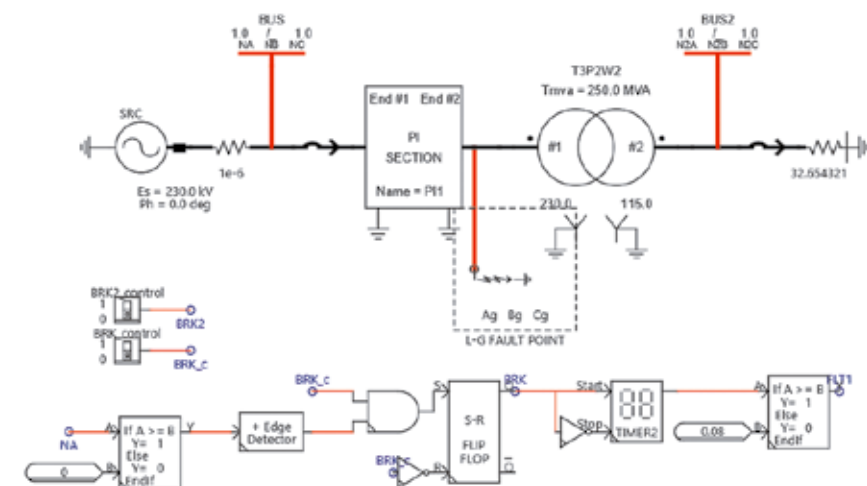
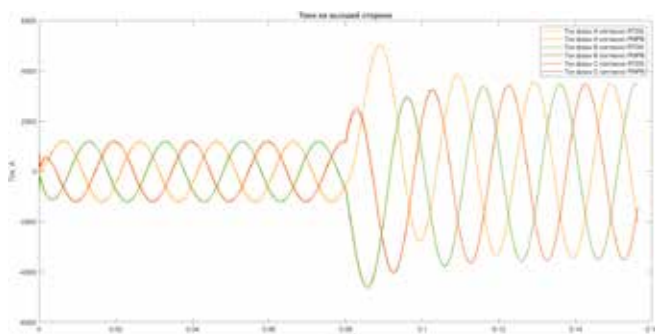


Рис. 5. Модель в RSCAD FX

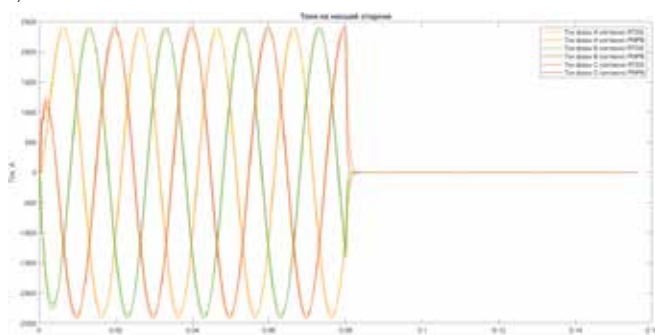
условий. Эти результаты говорят о работоспособности алгоритма и возможности его использования для больших моделей при наличии качественной библиотеки элементов электроэнергетических систем, что требует дальнейшей работы в этом направлении.

Важная особенность ПАК РВ ЦДЭС, заложенная на этапе проектирования комплекса – возможность работы в «облачном» режиме. В таком режиме работы производится моделирование не только первичного оборудования электроэнергетических объектов, но и комплекса оборудования вторичных

систем: терминалов релейной защиты, программируемых логических контроллеров, систем управления верхнего уровня (в том числе уровня центра управления сетями). Для реализации этого подхода были разработаны программные комплексы vPLC (virtual programmable logic controller, виртуальный программируемый логический контроллер) и vPACS (virtual protection, automation and control system, виртуальное устройство релейной защиты и автоматики). Данные программные комплексы поддерживают конфигурирование виртуальных устройств на основе существующих международ-

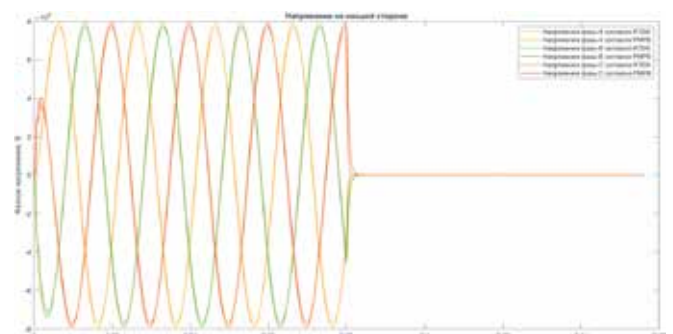


а)

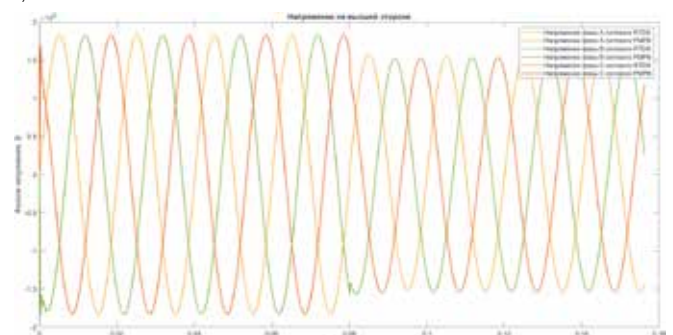


б)

Рис. 6. Токи на высшей а) и низшей б) стороне



а)



б)

Рис. 7. Напряжения на высшей а) и низшей б) стороне

ных стандартов МЭК 61131 и МЭК 61850 соответственно. Связь таких виртуальных устройств с моделью энергосистемы может производиться как по внутренним протоколам синхронизации данных для имитации физических дискретных и аналоговых входов, а так же с использованием применяемых в существующих системах защиты и автоматизации протоколов: МЭК 60870-5-104, С37.118, GOOSE, SV, ModbusTCP. Таким образом у пользователей системы появляется возможность проведения исследований и интеграции цифрового двойника энергосистемы в существующие системы управления без необходимости развертывания дорогостоящей инфраструктуры с использованием арендуемых «облачных» вычислительных ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время в России также наблюдается развитие ПАК РВ, однако их применение не всегда возможно, что связано с ограниченным функционалом представленных продуктов по сравнению с зарубежными разработками. Указанное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что программно-аппарат-

ный комплекс (программная платформа «Цифровой двойник энергосистемы»), будет востребован на рынке, поскольку позволит интегрировать как разработанное ранее, так и разрабатываемое в настоящее время Центром НТИ МЭИ программное обеспечение в единый программно-аппаратный комплекс для решения широкого круга задач.

Центром НТИ МЭИ разработан методический подход к созданию моделей замещения элементов энергосистемы, реализованы указанные модели и проведены лабораторные исследования релевантности разработанных моделей элементов энергосистемы, подтвердившие высокую точность расчетов, проведенных с использованием разработанных моделей. В качестве минимальных требований к аппаратному обеспечению, применяемому при выполнении расчетов, заявлены характеристики аппаратного обеспечения аналогичных зарубежных комплексов. Эти требования будут уточнены на последующих этапах работы с учетом результатов промежуточных испытаний.

Предложенный подход к работе ПАК РВ в «облачном» режиме позволяет

обеспечить дистанционный доступ к инструментам моделирования электро-энергетических систем для пользователей, не обладающих собственными устройствами РЗА и ПА для создания полномасштабных полигонов или испытательных центров.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Форсайт П., Шамис М.А., Иванов Ф.А.* Новая платформа NovaCor для симуляторов RTDS // Энергия единой сети, 2018, № 3(38), с. 20–24.
2. *Dommel H.W.* EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation, 4689 W. 12th Avenue, Vancouver, B.C. V6R 2R7, Canada, 2nd Edition, May 1992.
3. *Neville Watson, Jos Arrilaga.* Power Systems Electromagnetic Transients Simulation, The Institution of Engineering and Technology, 2003.
4. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи, М: 2016.
5. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. – 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. Питер, 2003. – 576 с.: ил.

Отраслевой журнал о последних изобретениях, разработках и тенденциях в области электротехники и электроэнергетики.

Главное отличие – всестороннее рассмотрение поднятой проблемы: от технологий до экономической эффективности и социальной значимости.

С нами сотрудничают специалисты и руководители энергетических предприятий, крупные ученые-электротехники, а также эксперты из смежных отраслей промышленности. Журнал не просто рассказывает о новинках электротехники, но и сравнивает оборудование между собой.

В сотрудничестве с зарубежными экспертами публикуются эксклюзивные материалы. При этом издание не продвигает западные технологии, а лишь рассказывает то, чем обладают иностранные коллеги.



Издательский дом «Вся электротехника»

ЭНЕРГОЭКСПЕРТ

информационно-аналитический журнал



000 «Издательский дом «Вся электротехника» ■ www.energyexpert.ru ■ e-mail: pvi@energyexpert.ru ■ тел.: (916) 591-94-24

на правах рекламы