

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311

EDN BZXZYB

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ****В.Ю. Давыдов**

ORCID: 0009-0006-0477-4363 e-mail: vladimirdavydov01@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева

Сибирского отделения Российской академии наук

*Иркутск, Россия***Н.В. Томин**

ORCID: 0000-0001-5898-9649 e-mail: tomin.nv@gmail.com

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева

Сибирского отделения Российской академии наук

*Иркутск, Россия***А.Б. Исаков**

ORCID: 0000-0001-6954-8179 e-mail: isk_alex@mail.ru

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова

Российской академии наук

Москва, Россия

Проведен сравнительный анализ возможностей специализированного программного обеспечения: *RastrWin3*, *PSS@E*, *ETAP*, *EnergyCS*, *PowerFactory*, *MATLAB/SimPowerSystems*, *SimInTech*, ПАК ЦДЭС, ПАК *RTDS*, *ENgee*, *Pandapower* и *SPICE*, а также системы оптимизации гибридной энергетики HOMER. Приводится детальное описание их функциональных возможностей, доступности (включая аспекты лицензирования и открытого кода) и практического применения для решения различных задач. Обосновано, что наиболее эффективным подходом для комплексного моделирования является комбинированное использование пакетов *Pandapower* и *SPICE*. Для экспериментального подтверждения выполнено моделирование коммутационных перенапряжений в кабельных линиях, вызванных работой силовой электроники объектов РГ. Доказано, что предложенная связка инструментов позволяет с высокой точностью моделировать как установившиеся режимы, так и сложные электромагнитные переходные процессы в активных распределительных сетях.

Ключевые слова: возобновляемые источники электроэнергии; моделирование; программное обеспечение; проектирование; распределенная генерация; распределительные сети.

Для цитирования: Давыдов В.Ю., Томин Н.В., Исаков А.Б. Сравнительный анализ программных средств моделирования распределительных сетей // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 2. С. 4-36. EDN BZXZYB

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE TOOLS FOR DISTRIBUTION NETWORK MODELING

V.Yu. Davydov

ORCID: **0009-0006-0477-4363** e-mail: **vladimirdavydov01@mail.ru**
Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences
Irkutsk, Russia

N.V. Tomin

ORCID: **0000-0001-5898-9649** e-mail: **tomin.nv@gmail.com**
Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences
Irkutsk, Russia

A.B. Isakov

ORCID: **0000-0001-6954-8179** e-mail: **isk_alex@mail.ru**
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences
of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

Abstract. This study conducts a comparative analysis of the capabilities of specialized software: RastrWin3, PSS®E, ETAP, EnergyCS, PowerFactory, MATLAB/SimPowerSystems, SimInTech, TsDES simulator, RTDS simulator, ENgee, Pandapower, and SPICE, as well as the hybrid energy optimization system HOMER. The article provides a detailed description of their functional capabilities, accessibility (including aspects of licensing and open-source code), and practical application for solving various tasks. Based on the conducted analysis, it is concluded that the most effective approach for comprehensive modeling is the combined use of the PandaPower and SPICE packages. To experimentally verify this thesis, a simulation of switching overvoltages in cable lines, caused by the operation of power electronics in distributed generation facilities, was performed. This research confirms that the proposed combination of tools allows for highly accurate modeling of both steady-state conditions and complex electromagnetic transients in active distribution networks.

Keywords: renewable energy sources; modeling; software engineering; design; distributed generation; distribution networks.

For citation: V.Yu. Davydov, N.V. Tomin and A.B. Iskakov, “Comparative analysis of software tools for distribution network modeling”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 4-36, 2026. EDN BZXZYB

I. Введение

Современные распределительные электрические сети в мире в целом, и в России в частности, перестают быть пассивными элементами энергосистемы, предназначенными лишь для доставки электроэнергии от магистральных сетей к конечным потребителям. На фоне устойчивого роста электропотребления, прогнозируемого *Энергетической стратегией РФ до 2035 года* [1], и структурных изменений в экономике распределительный сетевой комплекс сталкивается с качественно новыми вызовами. Ключевым является лавинообразное усложнение режимов работы и управления, вызванное несколькими взаимосвязанными факторами.

Прежде всего, речь идет об активном развитии распределенной и возобновляемой генерации (ВИЭ). По оценкам экспертного сообщества, сегодня в РФ 8,5-9 ГВт суммарной установленной мощности объектов распределенной генерации (РГ) расположены в изолированных энергорайонах, а также 14,5-15 ГВт – в централизованной зоне электроснабжения [2]. Соответственно, порядка 23-24 ГВт мощностей установлено на объектах РГ, что составляет около 10 % от суммарной величины генерирующих мощностей в ЕЭС РФ. По состоянию на 2025 г., совокупная мощность объектов ВИЭ в стране достигла 6,62 ГВт [3], динамика совокупной установленной мощности объектов ВИЭ представлена на рис. 1.

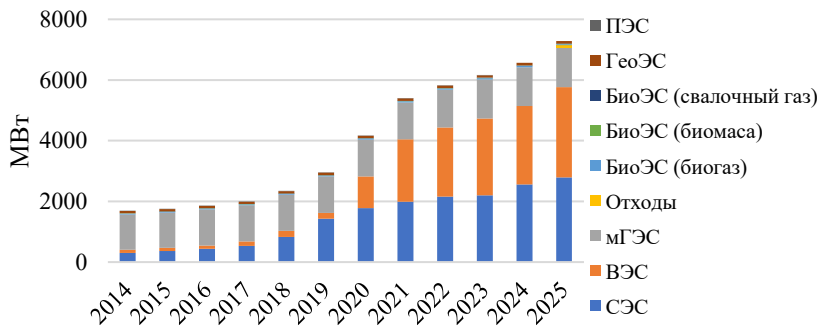


Рис. 1. Динамика совокупной установленной мощности объектов ВИЭ в России

Fig. 1. Dynamics of the total installed capacity of renewable energy facilities in Russia

Планы по достижению доли распределенной генерации в 15 % в производстве электроэнергии на тепловых электростанциях и увеличению

мощности ВИЭ до 20 ГВт к 2035 г. означают массовое появление малых и не всегда предсказуемых источников энергии непосредственно в распределительных сетях. Это приводит к явлениям, ранее нехарактерным для этого уровня электрических сетей: изменению направлений потоков мощности, колебаниям напряжения и проблемам с релейной защитой.

Следующий фактор – процессы цифровизации электроэнергетической отрасли, которые на уровне систем распределения энергии связаны с созданием «цифровых энергорайонов» или т.н. цифровых РЭС [4, 5]. Данная концепция подразумевает оснащение распределительных сетей интеллектуальными устройствами (интеллектуальные реле защиты и автоматики, «умные» выключатели и счетчики), а также развертывание систем сбора и анализа данных в реальном времени (АСКУЭ, SCADA, и т.п.). Это превращает традиционно пассивную сеть в активную, наблюдаемую и управляемую систему. Однако такая трансформация кардинально усложняет задачи моделирования и анализа. Теперь модели должны учитывать не только топологию и параметры линий, но и работу многоуровневых систем автоматики, алгоритмы адаптивного управления режимами, включая возможность самовосстановления после аварий, и обработку больших массивов телеметрии. Таким образом, цифровизация не просто сопровождает, а активно формирует новую архитектуру энергосистемы, где распределенные энергетические ресурсы становятся системообразующим элементом.

Данная ситуация показывает, что распределительные сети становятся сложной динамической системой с двусторонними потоками мощности, большим количеством управляемых элементов и стохастическим характером генерации. В этих условиях традиционные методы и инструменты моделирования, ориентированные на радиальные сети с детерминированными нагрузками, зачастую оказываются непродуктивными. Они не позволяют с достаточной точностью анализировать установившиеся и переходные процессы, оценивать устойчивость и прогнозировать развитие сети. Соответствующую научно-практическую проблему можно сформулировать как выбор и применение программных средств для моделирования распределительных сетей, которые были бы способны учесть современные тенденции их развития. Существует широкий спектр коммерческих и научных ПК, каждый из которых имеет свою идеологию, математический аппарат и область применения. Сравнительный анализ их возможностей применительно к задачам моделирования сетей с высокой долей РГ и элементами цифровизации представляет значительный интерес для проектно-конструкторских институтов, сетевых компаний и разработчиков энергетической политики.

Цель работы – сравнительный анализ современных программных средств для моделирования распределительных электрических сетей, с акцентом на их способность адекватно отражать режимы работы в условиях

высокой проницаемости РГ и использования технологий активного управления.

II. Анализ программных средств моделирования распределительных сетей

Для проведения сравнительного анализа программные продукты были сгруппированы по их целевому назначению и доминирующей функциональности. Это позволяет не только систематизировать обзор, но и выявить нишевые преимущества каждого класса решений применительно к задачам моделирования распределительных сетей с распределенной генерацией. В первую группу выделены мощные отраслевые комплексы, традиционно используемые для анализа крупных энергосистем (*RastrWin3*, *PSS@E*, *ETAP*, *EnergyCS*, *PowerFactory*). Во вторую группу входят *MATLAB/SimPowerSystems* и *SimInTech* в качестве универсальной научно-исследовательской среды. В третью группу включены мощные цифровые программно-аппаратные комплексы ЦДЭС (Цифровой Двойник Энергосистемы) и *RTDS* (Real Time Digital Simulator). К четвертой группе относятся *ENgee*, *Pandapower*, *SPICE*, *Homer* – специализированные решения для распределенной энергетики и микросетей.

Сравнение отраслевых комплексов (*RastrWin3*, *PSS@E*, *ETAP*, *EnergyCS*, *PowerFactory*)

Данные программные комплексы составляют «золотой стандарт» для задач планирования и эксплуатации электроэнергетических систем. Несмотря на схожий базовый функционал, они имеют принципиальные различия в акцентах и применимости к задачам распределительных сетей. Моделирование РГ является ключевым вызовом. *PSS@E* и *RastrWin3* традиционно используют упрощенные модели для ВИЭ, что достаточно для оценки их влияния на режимы ЕЭС, но может быть недостаточно для детального анализа микросетей, где доминирует силовая электроника. *PSS@E* потенциально позволяет моделировать различные конфигурации распределительных сетей с возможностями понятной визуализации расчета режимов (рис. 2). *ETAP*, будучи сильным в проектировании промышленных сетей, предлагает более развитые библиотеки для ВИЭ и накопителей, приближаясь к задачам распределенной энергетики [6-9]. *EnergyCS* позволяет решать вопросы расчета установившихся режимов, расчета токов короткого замыкания, определять технологический расход электроэнергии на ее транспорт при проектировании и реконструкции распределительных сетей [10-12]. *PowerFactory* является мощным программным продуктом для планирования и анализа режимов современных энергосистем, применяемым при планировании распределительных сетей, интеграции ВИЭ, анализе островных энергосистем и *Smart Grid*-проектов [13-15].

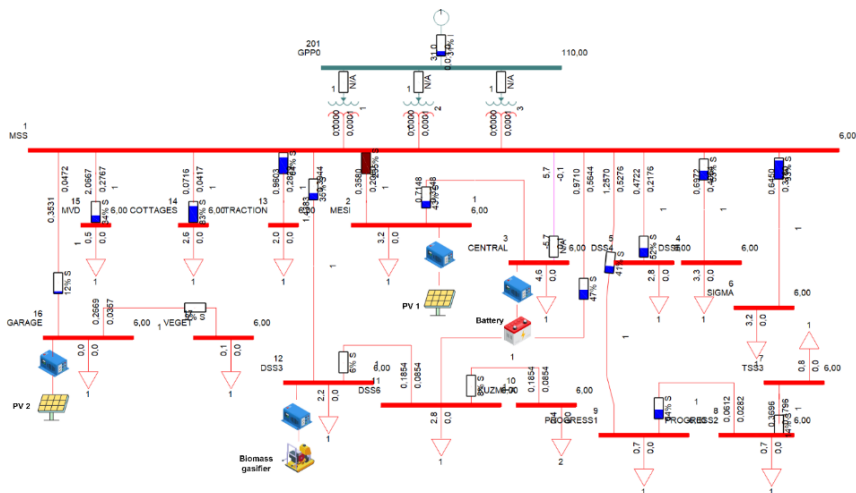


Рис. 2. Пример модели распределительной сети 110-6 кВ с различными источниками ПГ, построенной в PSS®E и визуализацией расчета устранившегося режима

Fig. 2. An example of a model of a 110-6 kV distribution network with various sources of RG, built in PSS®E and visualization of the power flow calculations

Доступность и поддержка в РФ – критически важный фактор. В этом аспекте *RastrWin3* и *EnergyCS* обладают неоспоримым преимуществом как отечественный продукт, с доступными учебными лицензиями и прямой поддержкой для российских вузов и проектных институтов. В России официальным представителем *PowerFactory* (производство *DigSILENT GmbH*) и эксклюзивным дистрибьютором является группа компаний «РТСофт», которая предоставляет однопользовательские, многопользовательские и серверные версии для образовательных организаций и бизнеса. Использование *PSS®E* и *ETAP* после 2022 г. сопряжено с серьезными правовыми и техническими рисками из-за отсутствия официальных поставок и поддержки.

Практическое применение: если *RastrWin3* – это инструмент системного оператора, стандартизированный под российские нормы, то *PSS®E* чаще используется для международных проектов и глубоких исследований динамики, а *ETAP* и *EnergyCS* сильны в сквозном проектировании объектов – от однолинейной схемы до кабельного журнала. *PowerFactory* находит широкое применение у операторов зарубежных национальных энергосистем при моделировании динамики, оценки пропускной способности сечений и анализе надежности. На рис. 3 представлена рабочая область *RastrWin3*, демонстрирующая основные панели управления. На данный момент *MATLAB* имеет статус ведущего программного обеспечения в области

научных и инженерных расчетов, предлагая постоянно развивающуюся и совершенствующуюся среду для моделирования. Особого внимания заслуживает специализированное расширение *SimPowerSystems*, входящее в состав *Simulink* и предназначенное для моделирования электротехнического оборудования и энергосистем высокой мощности.

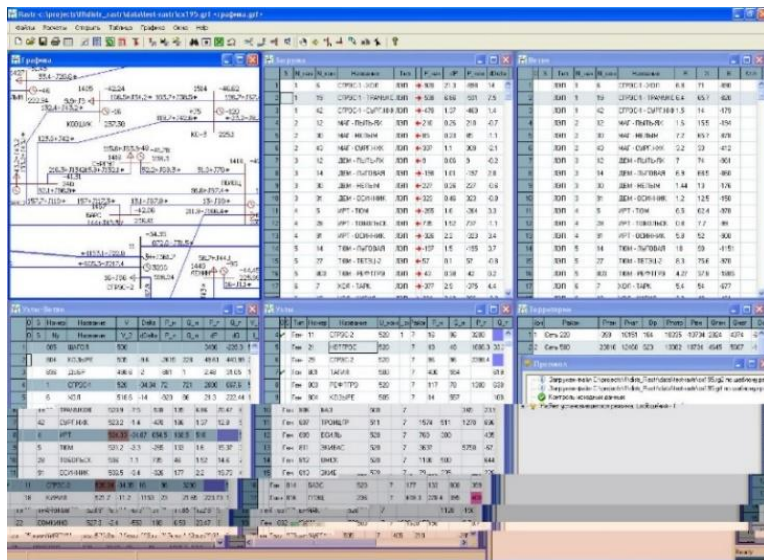


Рис. 3. RastrWin3 – рабочая область программы

Fig. 3. RastrWin3 – program workspace

Пакет *SimPowerSystems* содержит набор блоков, которые позволяют проводить моделирование как целой системы с внедрением ПГ, так и отдельных ее элементов, таких как ветрогенерирующие установки, турбогенераторные установки [16–18]. При моделировании крупных энергосистем в *SimPowerSystems* возникают сложности, так как *SimPowerSystems* не оптимизирован для работы с объединенными энергосистемами, содержащими значительное количество узлов. При превышении этого порога время расчета начинает расти нелинейно, а требования к оперативной памяти становятся критическими. На рис. 4 представлена модель, выполненная в пакете *SimPowerSystems*.

Универсальные научно-исследовательские среды (MATLAB/ *SimPowerSystems*, *SimInTech*)

Ограничения в промышленном применении связаны с вычислительной эффективностью и верификацией. Моделирование крупных сетей (более 10 000 узлов) становится крайне ресурсоемким. Кроме того, результаты,

полученные на собственных моделях, требуют тщательной валидации против отраслевых стандартов, что ограничивает прямое использование комплекса для проектной документации или диспетчерских расчетов.

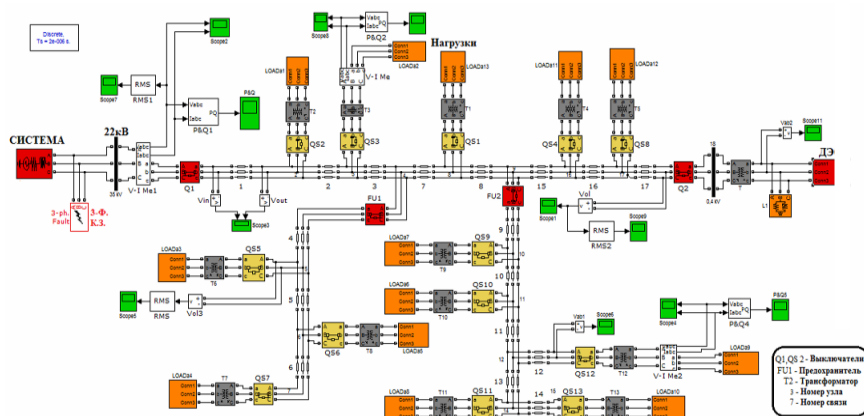


Рис. 4. *MATLAB* – модель распределительной сети района Там Ки провинции Куанг Нам с установкой РГ

Fig. 4. *MATLAB* – model of the distribution network of Tam Ky district, Quang Nam province, with a solar power installation

В связи с санкционными ограничениями официальные поставки продуктов *MathWorks* на территорию Российской Федерации приостановлены. Компания *MathWorks* публично заявила о прекращении продаж и технической поддержки в России, что делает легальное приобретение лицензий невозможным. Это касается как коммерческих организаций, так и учебных заведений. Бессрочные лицензии, приобретенные до 2022 г., продолжают работать, но без технической поддержки и обновлений.

MATLAB зачастую применяется в образовательных целях при изучении отдельных электротехнических дисциплин. Компания «Россети» использует *MATLAB* для создания детализированных модели подстанций и линий электропередачи, на которых тестируются уставки защитных устройств перед их внедрением в реальную энергосистему. Компания «РусГидро» использует *MATLAB* для реализации функций АСУ ТП для автономных гибридных энергокомплексов в Якутии, включающих дизельные электростанции, ветроэнергетические установки и системы накопления электроэнергии [19].

SimInTech (Simulation In Technic) – среда разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления и графических дисплеев.

SimInTech предназначен для детального исследования и анализа нестационарных процессов в различных объектах управления.

SimInTech является российской разработкой и выступает набирающим распространение аналогом для зарубежных программ, таких как *Simulink* и др. Программа построена на практическом редакторе структурных схем, эффективных численных методах, встроенном языке программирования и большом количестве типовых блоков, которые оформлены в виде библиотек, среди которых есть «Гидроавтоматика», «Механика», «Электромашин», «Электрика» и множество других. На основе библиотек программы возможно полноценное моделирование широкого спектра как отдельного оборудования (синхронные генераторы, ветрогенерирующие установки, инверторы, регуляторы, устройства релейной защиты), так и энергосистем различных классов напряжения в целом. Функционал программы позволяет рассматривать процессы, связанные с интеграцией возобновляемых источников электроэнергии, силовой электроники и других элементов, характерных для сетей с высоким уровнем внедрения распределенной генерации [20-23]. На рис. 5 представлена рабочая область *SimInTech*, демонстрирующая основные панели управления.

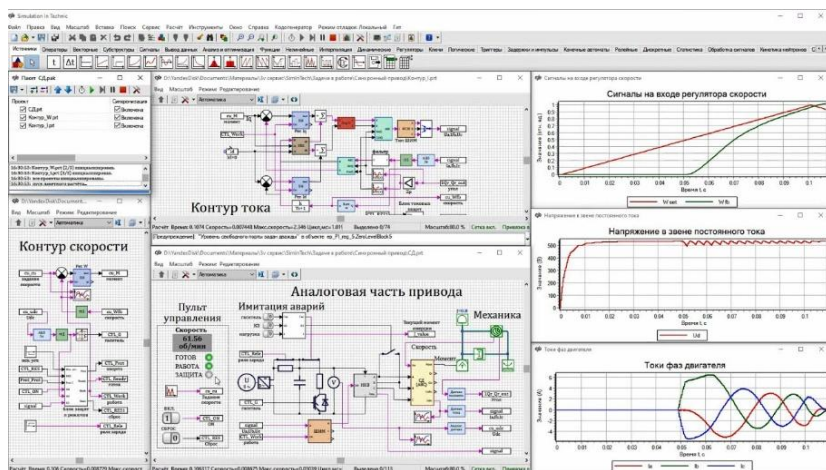


Рис. 5. *SimInTech* – рабочая область программы

Fig. 5. *SimInTech* – program workspace

Среди основных ограничений работы с *SimInTech* можно отметить небольшое количество блоков в модели (до 250 шт.), доступное в демоверсии. При работе с полноценной версией программы главным «ограничителем» становятся аппаратные параметры компьютера, что связано с высокими требованиями к оперативной памяти, количеству ядер процессора, а

также большими затратами по времени на сам процесс моделирования. Технология создания кода для реальных контроллеров имеет свои трудности. Например, если в модели параметр блока меняется динамически (скриптом), то при автоматической генерации кода он станет константой, что может сломать логику работы. Разработчику нужно явно и вручную указывать такие переменные, чтобы код работал корректно.

Сопроводительная и справочная документация, методическое обеспечение и интерфейс программы выполнены на русском языке, что снимает языковые ограничения для многих российских пользователей. Условия лицензирования зависят от типа организации (компания, учебное заведение) и целей использования (учебные, научные, коммерческие). *SimInTech* широко применяется в образовательных учреждениях при освоении курсов электротехнических дисциплин и теории автоматического управления и регулирования [24]. Программа также распространена в различных подразделениях компании «Росатома». Для вузов и образовательных учреждений могут предоставляться специальные условия, включая бесплатное использование в рамках совместных проектов.

Специализированные решения для распределенной энергетики и микросетей (*ENgee, Pandapower, SPICE, Homer*)

Engee содержит множество готовых математических моделей: генераторов, двигателей, трансформаторов, воздушных и кабельных линий электропередачи, активной и реактивной нагрузки, выключателей, полупроводников и преобразователей, компонентов для создания систем распределенной генерации. Архитектура программы поддерживает создание цифровых двойников гибридных энергообъектов, солнечные парки, ветрогенераторы, дизель-генераторные установки и системы накопления энергии [25]. Важно заметить, что *Engee* бесшовно интегрируется с КИМ РИТМ – российским программно-аппаратным комплексом для моделирования энергетических систем в реальном времени. Оборудование позволяет запускать модели энергосистем и силовой электроники различных размеров и сложности за счет мощных многоядерных процессоров и программируемых логических интегральных схем. Более того специализированные библиотеки *Engee* позволяют детально моделировать элементы силовой электроники так же, как и в *SPICE*. Силовая электроника является одним из основных компонентов, которые применяются при строительстве объектов генерации на основе ВИЭ.

Симулятор *SPICE* (англ. *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*), в свою очередь, относится к классу электротехнических программ (наряду с *NGSpice, LTSpice* и др.), которые позволяют проводить моделирование силовой электроники с учетом физики полупроводниковых приборов, что дает возможность проектировать системы управления инвер-

торами ВИЭ и преобразователями накопителей, преобразователи постоянного тока, системы компенсации (*STATCOM*, активные фильтры) [26]. Он позволяет детально исследовать физику полупроводниковых приборов (*IGBT*, *MOSFET*, диодов), анализировать электромагнитные помехи, гармонические искажения и тепловые режимы, что недоступно классическим сетевым комплексам, оперирующим усредненными моделями.

Библиотека *Pandapower*, в отличие от многих рассмотренных пакетов и программ, изначально разработана и оптимизирована именно для задач анализа распределительных сетей среднего и низкого напряжения (до 0,4 кВ) [27, 28]. Ее архитектура идеально подходит для моделирования сильно разветвленных, неоднородных сетей с большим количеством узлов, характерных для городского распределения и промышленных предприятий. Библиотека включает обширный каталог стандартных типов кабелей и оборудования для сетей низкого и среднего напряжения, поддерживает расчеты с учетом различных схем заземления нейтрали, что делает ее специализированным и эффективным инструментом для исследований в области цифровизации и развития активных распределительных сетей. *Pandapower* включает возможность расчетов и оптимизации потоков мощности, оценку состояния электрической сети и расчет токов коротких замыканий согласно стандарту *IEC 60909*.

Перспективной представляется связка функций *SPICE* и *Pandapower* для реализации сквозного проектирования гибридных энергокомплексов с высокой долей инверторной генерации. На этапе компонентного проектирования в *SPICE* отрабатываются динамические характеристики преобразовательной техники ВИЭ, анализируются гармонические искажения и электромагнитная совместимость. Полученные параметры переносятся в *Pandapower* для системного анализа влияния распределенной генерации на режимы работы сети, оценки потерь мощности и решения задач оптимального размещения генерации. Методология востребована при создании цифровых двойников микросетей с накопителями энергии и разработке алгоритмов адаптивного управления.

Программный комплекс «*Homer*», разработанный американской Национальной лабораторией ВИЭ, в настоящее время является наиболее известным и применяемым для решения задач автономного энергообеспечения. Программа предназначена для проектирования энергетических систем и сопоставления нескольких вариантов компоновки системы с различным составом оборудования на основе технико-экономического сравнения [29]. *HOMER* объединяет инженерные и экономические расчеты, моделируя работу энергосистемы поминутно либо почасово на протяжении года и оценивая тысячи конфигураций оборудования, чтобы найти решение с минимальной приведенной стоимостью жизненного цикла. На рис. 6 представлена рабочая область программы *HOMER*.

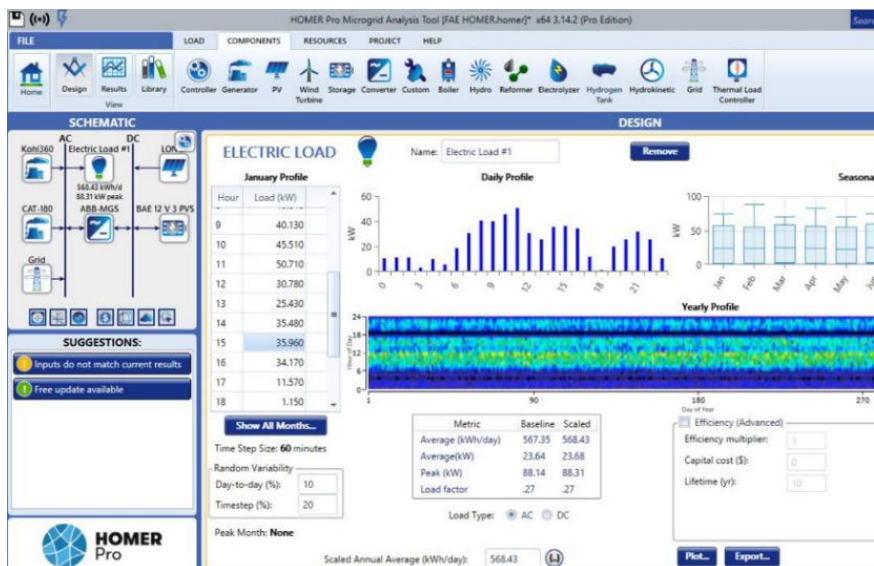


Рис. 6. HOMER – рабочая область программы

Fig. 6. HOMER – program workspace

Pandapower и *SPICE* полностью доступны как *open-source* решения. *HOMER* сохраняет облачную подписку через международные платежные системы. *ENgee* работает по российской юрисдикции с локализованной технической поддержкой. Ни одна программа, кроме *HOMER*, не имеет санкционных ограничений на использование. *Pandapower* применялся при оценке влияния гидроаккумулирующих станций на электроэнергетическую систему Монголии [30], моделировании автоматике управления нагрузкой в энергорайонах Амурской области [31]. *Engge* как программный комплекс моделирования может использоваться при создании цифровых двойников сетей и описания их режимов работы [32]. *SPICE* использовался МЭИ для моделирования силовой электроники ветрогенераторов. *HOMER* применялся при анализе использования ВИЭ в Армении [33], а также для выбора оборудования при проектировании изолированных микроэнергетических систем в Бурятии, Приморском и Хабаровском крае [34-36].

Мощные цифровые программно-аппаратные комплексы ЦДЭС и RTDS

Данные системы предназначены для численного моделирования в реальном времени и выполнения расчетов электрических, электромагнитных

и электромеханических процессов в заданной виртуальной (численной) модели энергосистемы.

ПАК ЦДЭС является разработкой Центра компетенции НТИ на базе НИУ «МЭИ» и представляет собой программно-аппаратную цифровую систему модульной конструкции на базе шкафа типоразмера 19” с возможностью установки вычислительных модулей и в оставшемся свободном пространстве модулей ввода/вывода. Процесс симуляции в жестком реальном времени проходит на основе алгоритма Доммеля с шагом расчета 2-50 мкс, что обеспечивает высокую точность расчетов. Симуляция электромагнитных переходных процессов происходит в диапазоне до 3 кГц и возможна при работе на постоянном токе.

ПАК ЦДЭС состоит из следующего набора компонентов:

- программные модули для симуляции режимов работы энергосистем (нормальных, аварийных, квази-переходных и переходных);
- модулей интеграции физических устройств РЗА, автоматики и управления по цифровым интерфейсам и аналоговым/дискретным каналам;
- виртуальные полнофункциональные модели цифровых терминалов РЗА, автоматики и управления;
- виртуальные SCADA-системы уровня ПС и уровня ЦУС;
- инструменты пользовательской логики по стандарту ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016.

Комплекс оснащен большим количеством аналоговых вводов и выводов (32 и 16 соответственно), еще большим количеством цифровых вводов и выводов (64 и 64 соответственно). Система обладает возможностью подключения до 20 вычислительных модулей, различными интерфейсами для связи с персональным компьютером пользователя. ПО разработано отечественными производителями. Лицензирование ПО осуществляется по корпоративной лицензии без ограничения числа рабочих мест в рамках одной организации. ПО обеспечивает среду разработки модели и Управление в ходе симуляции. Все этапы работы с ЦДЭС, от построения схемы модели до выполнения процесса симуляции, а также анализ полученных результатов выполняются в едином пользовательском графическом интерфейсе на управляющем ПК на базе отечественной операционной системы.

Функциональность ПАК ЦДЭС базируется на совокупности специализированных приложений, взаимодействующих посредством единой шины передачи данных. В состав платформы входит широкий перечень прикладного программного обеспечения, предназначенного для всестороннего моделирования энергетических объектов и систем автоматизации. К числу таких приложений относится графический редактор для создания принципиальных электрических схем исследуемых энергосистем, а также симулятор, позволяющий в динамике наблюдать за протеканием расчетных

процессов и осуществлять оперативное управление ходом симуляции. Для целей проектирования систем защиты и автоматики платформа предоставляет редактор цифровой релейной защиты, функционирующий как системный конфигуратор в соответствии со стандартом МЭК 61850, и редактор алгоритмов автоматики, реализованный на базе языков стандарта МЭК 61131. Дополнительно в среде предусмотрены конфигураторы виртуальных устройств релейной защиты и автоматики, а также программируемых логических контроллеров, наряду с инструментарием для настройки протоколов обмена данными с внешними цифровыми системами. Помимо прикладных компонентов, ориентированных непосредственно на задачи моделирования, архитектура платформы включает ряд сервисных приложений, обеспечивающих ее бесперебойное и надежное функционирование. Среди них – модули синхронизации времени по протоколам *PTP* и *NTP*, средства мониторинга состояния аппаратных компонентов и контроля работы программного обеспечения шкафов комплекса. Завершают функциональную структуру платформы приложения для мониторинга производительности самих программных средств ПАК ЦДЭС и система централизованной аутентификации и авторизации пользовательского доступа.

В состав основных областей применения входит исследование переходных процессов, создание киберполигонов, моделирование *MicroGrid*, разработка новых алгоритмов, синтез и апробирование оптимальных алгоритмов, создание цифровых двойников ЭЭС, интеграция генерирующих мощностей на основе ВИЭ и систем накопления электроэнергии и решение множества других задач [37-39]. На рис. 7 представлено окно задания параметров ВЛ электрическим способом, которое демонстрирует процесс работы в приложении «Редактор ЭЭС».

Программно-аппаратные комплексы *RTDS* можно считать первыми в своем роде, которые являются общепризнанным эталоном для выполнения моделирования системы электроснабжения в реальном времени. *RTDS Simulator* является разработкой исследовательского центра Манитоба в Канаде, где впервые в мире в 1989 г. провели моделирование цифровых систем в режиме реального времени. Технически ПАК *RTDS* состоит из специально разработанного базового процессорного модуля параллельных вычислений. Конфигурация и состав симулятора определяется по усмотрению пользователя в зависимости от поставленных задач для моделирования, топологии и размера исследуемой энергосистемы. Его кассетно-модульная конструкция позволяет подключать от 1 до 6 процессорных модулей с *RISC* процессорами, 1 модуль интерфейса рабочей станции, несколько программируемых модулей сетевых интерфейсов, модули ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов для сопряжения с физическими устройствами, модуль синхронизации расчетов по сигналам точного времени и формирования тактовых сигналов для подключенных устройств РЗА.

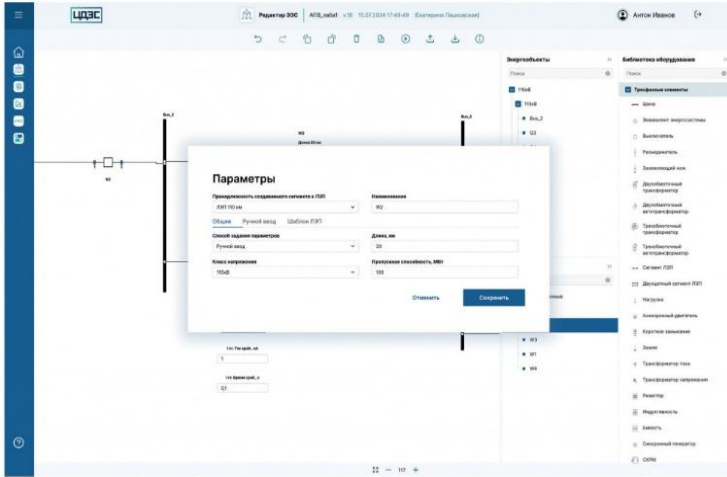


Рис. 7. ЦДЭС – окно задания параметров ВЛ электрическим способом

Fig. 7. CDES – transmission line parameter setting window using the electrical method

Через устройства ввода-вывода к *RTDS* подключается различное внешнее оборудование, такое как измерительные устройства, релейная защита и контроллеры, устройства управления регулируемых электроприводов или управляемых компенсаторов реактивной мощности. На рис. 8 представлена система параллельных вычислений комплекса *RTDS*. Участки схемы и компоненты модели распределяются между процессорными модулями *PB5*. Взаимосвязи (*IRC*) между вычислительными модулями позволяют использовать всю мощность комплекса *RTDS*.

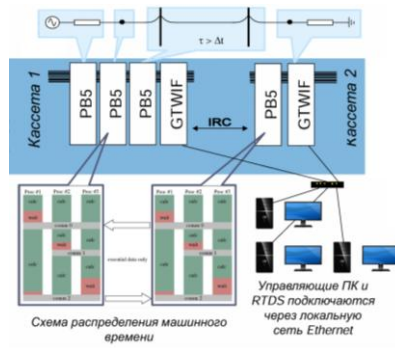


Рис. 8. *RTDS* – принцип параллельных вычислений

Fig. 8. *RTDS* – principle of parallel computing

ПАК *RTDS* получил широкое распространение благодаря различным возможностям применения как в производственной, так и в образовательной сферах. Цифровой симулятор реального времени моделирует электрические и электромеханические процессы, формирует соответствующие электрические сигналы, позволяет проводить исследования в сферах силовой электроники (проектирование энергосистем, исследование влияний различных воздействий на энергосистему), интеллектуальных сетей (исследование и интеграция ВИЭ, исследование *MicroGrid* и распределенной генерации), систем переменного тока, судовых энергосистем и программно-аппаратного моделирования с использованием силового оборудования *PHIL*. Комплексы *RTDS* нашли применение в России на предприятиях НТЦ ФСК ЕЭС, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт релестроения», научно-производственной организации «ЭКРА» и др. Разработчики *RTDS* осуществляют активную техническую поддержку, обратную связь с клиентами и постоянный контроль и обновление программного обеспечения [40-42].

Такие программно-аппаратные комплексы, как ЦДЭС, *RTDS* и др., представляют собой специализированные инструменты, доступность которых для большинства исследователей следует рассматривать в двух ключевых аспектах: во-первых, как доступ к приобретению и развертыванию самой системы, а во-вторых, как доступность для эффективной работы с ней специалистами узкого профиля. В первом приближении доступ к таким комплексам, как правило, ограничен в силу их высокой стоимости и ориентации на профессиональный сегмент рынка – крупные энергокомпании, научно-исследовательские институты и университеты. Это коммерческие продукты, требующие заключения дорогостоящих лицензионных соглашений и зачастую прохождения специализированного обучения для инженерного персонала. Что касается платформы ЦДЭС, разработанной в России, то ее доступность для пользователя может регулироваться иными нормами с учетом требований к импортозамещению в критической инфраструктуре, что делает ее более предпочтительной или даже обязательной для различных государственных и окологосударственных структур. Однако оба класса систем объединяет то, что они не являются программным обеспечением широкого потребления и распространяются по модели «бизнес для бизнеса».

Второй аспект доступности – это возможность эффективного применения комплекса большинством исследователей, не являющимися профессиональными программистами и инженерами-энергетиками. Современные цифровые модели энергосистем, подобные тем, что реализованы в ПАК ЦДЭС, требуют не только глубоких знаний в электроэнергетике, но и понимания принципов вычислительной математики, параллельных вычислений и языков программирования для настройки алгоритмов релейной защиты и

автоматики (согласно стандартам МЭК 61131 и МЭК 61850). Таким образом, доступность инструмента напрямую зависит от уровня подготовки пользователя: чем выше детализация модели и сложнее решаемая задача, тем более высокие требования предъявляются к его квалификации.

В итоге доступность таких ПАК обеспечивается сочетанием высокой стоимости входа и необходимости постоянного повышения квалификации пользователей.

Таблица 1.
Сравнение программ для моделирования энергосистем

Table 1.
Comparison of power system simulation software

Программа	Функциональные возможности	Практическое применение	Допущения и ограничения	Доступность
<i>MATLAB/SimPower Systems</i>	Моделирование электрооборудования, анализ переходных процессов, расчет установившихся режимов	Научные исследования, проектирование систем защиты, образование	Ограничение до 5-10 тыс. узлов, упрощенное моделирование ЛЭП	Санкционные ограничения, работа только с ранее приобретенными лицензиями
<i>RastrWin3</i>	Расчет установившихся и динамических режимов, анализ КЗ, оптимизация режимов	Диспетчерское управление (СО ЕЭС), проектные работы, образование	Упрощенные модели силовой электроники, ограниченная скриптовая автоматизация	Ознакомительные, студенческие и коммерческие лицензии
<i>PSS®E</i>	Комплексный анализ энергосистем, оптимизация потоков мощности, динамическое моделирование	Стратегическое планирование, оперативно-диспетчерская деятельность	Упрощенные модели преобразователей, высокие требования к ресурсам	Официальные поставки прекращены, стоимость 20 000-100 000 \$
<i>ETAP</i>	Сквозное моделирование систем, проектирование кабельных сетей, мониторинг в реальном времени	Проектирование промышленных систем, верификация схем электро-снабжения	Ограничения при моделировании наносекундных процессов	Ограниченная поддержка, стоимость 15 000-100 000 \$
<i>ENgee</i>	Моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов, разработка алгоритмов РЗА, проведение полунатурных испытаний	Разработка и проверка систем РЗА, создание ЦД, полунатурные испытания, разработка алгоритмов управления ВИЭ	Ориентация на задачи управления и защиты, менее приспособлен для расчета перспективных режимов ЕЭС	Облачная SaaS-платформа с исследовательскими тарифами, российская разработка

Продолжение табл. 1.

Сравнение программ для моделирования энергосистем

Table 1 continued.

Comparison of power system simulation software

Программа	Функциональные возможности	Практическое применение	Допущения и ограничения	Доступность
<i>Pandapower</i>	Расчет установившихся режимов, анализ КЗ по IEC 60909, оптимизация потоков мощности	Прототипирование алгоритмов управления, анализ сценариев развития сетей	Отсутствие динамического моделирования, упрощенные модели электроники	Бесплатная открытая платформа с полной свободой модификации
<i>SPICE</i>	Моделирование электронных схем на компонентном уровне, анализ переходных процессов	Проектирование силовой электроники, исследование полупроводниковых приборов	Ограниченность сетевыми расчетами, требуется интеграция с другими инструментами	Бесплатные версии (<i>LTspice</i> , <i>NGspice</i>) с открытыми алгоритмами
<i>HOMER</i>	Технико-экономическое моделирование гибридных систем, оптимизация конфигурации	Планирование автономных энергосистем, сравнение технологий ВИЭ	Упрощенные сетевые модели, ориентация на экономические показатели	Условно-бесплатная версия, подписка от 1000 \$/год
<i>EnergyCS</i>	Расчет установившихся режимов, анализ КЗ, оптимизация потерь, моделирование переходных процессов	Проектирование систем электроснабжения, анализ режимов распределительных сетей	Ограниченная библиотека силовой электроники, фокус на сети напряжением 0,4-110 кВ	Российское ПО, свободное распространение базовой версии, коммерческие лицензии на расширенный функционал
<i>Power Factory</i>	Интегрированное моделирование электромеханических и электромагнитных процессов, анализ устойчивости, оптимизация	Расчеты режимов, проектирование защиты, моделирование ВИЭ и накопителей	Сложность освоения, чувствительность к параметрам модели	Санкционные ограничения, работа с ранее приобретенными лицензиями, высокая стоимость

Окончание табл. 1.

Сравнение программ для моделирования энергосистем

Table 1 (end).

Comparison of power system simulation software

Программа	Функциональные возможности	Практическое применение	Допущения и ограничения	Доступность
<i>SimInTech</i>	Моделирование динамических систем и электроприводов, разработка алгоритмов управления, кодогенерация для ПЛК, теплогидравлические расчеты	Разработка АСУ ТП, моделирование энергоустановок (в т.ч. атомных), создание тренажеров для АЭС, судостроение	Ограничения демоверсии по количеству блоков, методологические сложности при встраивании нейросетей	Полная версия (коммерческая) без ограничений на размер модели, демоверсия с лимитами, российская разработка
ПАК ЦДЭС	Моделирование энергосистем в реальном времени, интеграция с МЭК 61850, поддержка МЭК 61131, конфигураторы виртуальных устройств РЗА и ПЛК	Полунатурное моделирование, испытание устройств РЗА, цифровые двойники подстанций, исследование режимов	Требует специализированного аппаратного обеспечения, высокая стоимость развертывания	Доступен для организаций, занимающихся проектированием и исследованиями в энергетике, российская разработка
ПАК RTDS	Моделирование электромагнитных переходных процессов в реальном времени, аппаратно-замкнутый цикл (<i>HIL</i>)	Испытания систем защиты и управления (РЗА, ПЛК) в реальном времени, валидация оборудования	Высокая стоимость оборудования и лицензий, требует специально обученного персонала	Коммерческие лицензии, высокая стоимость, закрытая архитектура

Проведенный анализ (табл. 1) показывает, что наибольшим потенциалом для моделирования распределительных сетей с распределенной генерацией обладает совместное использование *Pandapower* и *SPICE*. Данная связка позволяет одновременно учитывать различные типы распределенной генерации: инверторные источники (солнечные фотоэлектрические преобразователи, ветрогенераторы, БЭС) моделируются в *SPICE* с физикой полупроводниковых процессов, тогда как дизельные генераторы и синхронные машины анализируются в *Pandapower* с учетом их электромеханических характеристик. Это особенно критично для микросетей, где необходимо моделировать взаимодействие разнотипных источников.

При работе в изолированном режиме ключевое значение имеют процессы переключения между источниками, пусковые токи двигателей и динамика изменения нагрузки. *SPICE* обеспечивает моделирование наносекундных процессов переключения силовой электроники, а *Pandapower* анализирует электромеханические переходные процессы при изменении конфигурации микросети. Это позволяет оценивать устойчивость системы при потере отдельных источников генерации.

Таким образом, можно утверждать, что комбинированное использование *Pandapower* и *SPICE* формирует гибридную вычислительную среду, наиболее адекватно отражающую физику сложных переходных процессов в современных распределительных сетях. С целью экспериментальной проверки этого тезиса и демонстрации практической ценности подхода было выполнено моделирование одного из наиболее сложных для прогнозирования явлений – коммутационных перенапряжений в кабельных линиях, вызванных работой силовой электроники объектов распределенной генерации. Методика и результаты эксперимента представлены ниже.

III. Экспериментальный пример совместного использования пакетов *Pandapower* и *SPICE* для моделирования коммутационных перенапряжений

Коммутационные перенапряжения представляют собой одну из наиболее распространенных проблем в современных распределительных сетях, особенно с ростом доли РГ. Эти кратковременные всплески напряжения, возникающие при коммутационных операциях (включение/отключение нагрузок, генераторов, КЗ), могут достигать значений в несколько киловольт и представлять серьезную угрозу для чувствительного электронного оборудования, систем автоматики и релейной защиты. Особую актуальность эта проблема приобретает в сетях с высокой проникающей способностью ВИЭ, где частые коммутации солнечных и ветроэнергетических установок создают дополнительные источники переходных процессов.

В качестве базовой модели была взята низковольтная распределительная сеть *CIGRE LV* рис. 9, состоящая из внешнего источника питания, набора нагрузок и кабельных линий с типовыми параметрами. Результаты расчета установившегося режима с использованием пакета *Pandapower* приведены на рис. 10.

Для анализа был выбран участок этой схемы, включающий:

- силовой кабель: одножильная линия типа *UG2* длиной 0,2 км, с активным сопротивлением 0,0529 Ом, индуктивностью 52,39 мГн и шунтирующей емкостью 40 нФ. Взята произвольно самая длинная линия, протяженностью 200 м.;
- контрольный кабель: линия аналогичного типа и длины, расположенная параллельно силовой, с идентичными собственными параметрами.

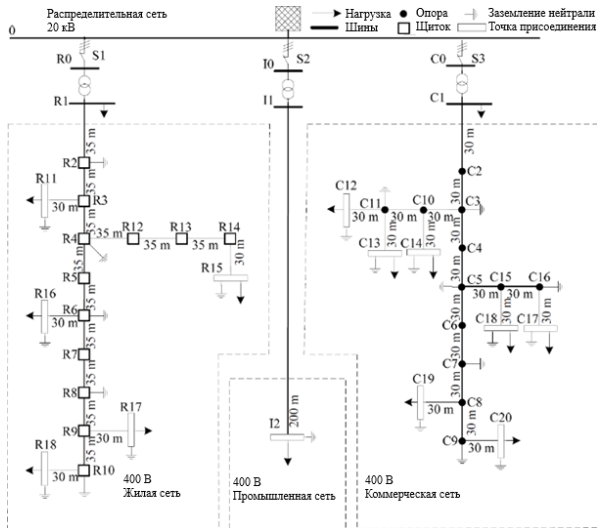


Рис. 9. Схема низковольтной распределительной сети CIGRE LV 20-0,4 кВ

Fig. 9. CIGRE LV 20-0.4 kV low-voltage distribution network diagram

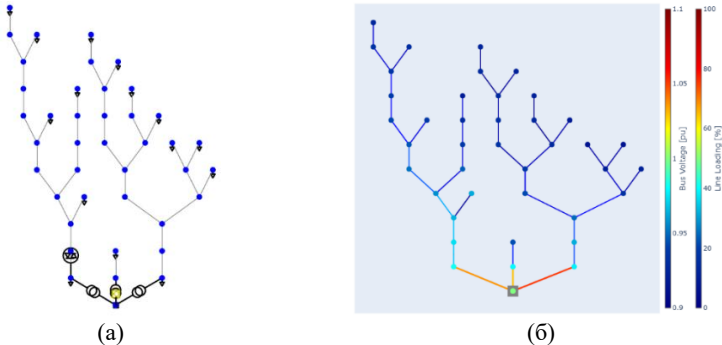


Рис. 10. Визуализация по рассмотренной схеме распределительной сети средствами пакета pandapower:

- (a) построенный граф сети с основным энергооборудованием;
 (б) визуализация расчета устранившегося режима

Fig. 10. Visualization of the considered distribution network diagram using the pandapower package:

- (a) constructed network graph with the main power equipment;
 (b) visualization of the steady-state power flow calculation

Между кабелями задана взаимная емкость $C_m = 4$ нФ и коэффициент взаимной индуктивной связи $K = 0,2$, соответствующие близкой прокладке в общем лотке.

В исходном установившемся режиме нагрузка питается от внешней сети через выбранный силовой кабель. Сценарий коммутации реализован путем отключения силового кабеля от источника (в пакете *Pandapower* – через изменение состояния в сервисной модели), что имитирует работу коммутационного аппарата (контактор/выключатель) в силовой цепи. В модели *PySpice* (реализация библиотеки *SPICE* в *Python*) [43] этот процесс представлен как воздействие на середину силового кабеля импульсным источником напряжения стандарта *IEC 61000-4-5*. Обе линии описаны последовательными элементами *R-L* и параллельной шунтирующей емкостью *C* на землю. Между ними введены: индуктивная связь (элемент *K* (L_1, L_2)) и распределенная взаимная емкость C_m , соединяющая середины кабелей. Контрольная линия нагружена эквивалентным сопротивлением 1 кОм (имитация входа аппарата или цепи управления).

Моделирование проведено в режиме анализа переходных процессов с временным шагом 0,1 мкс и общей длительностью 80 мкс. Регистрировались напряжения на середине силового кабеля (*mid_p*) и на середине контрольного (*mid_c*) для анализа формы импульса и наведенного сигнала. Таким образом, полученный сигнал на силовом кабеле имитирует реальное коммутационное перенапряжение в момент размыкания силовой цепи, а регистрируемое напряжение на контрольном кабеле отражает уровень паразитного наведения через взаимную индуктивность и емкость при совместной прокладке.

На графиках рис. 11 показаны результаты численного моделирования процессов коммутационного перенапряжения в двух параллельно проложенных кабельных линиях – силовой и контрольной – с учетом их взаимной электромагнитной связи (взаимная индуктивность и емкость).

Моделирование показывает резкий фронт с достижением амплитуды порядка 1,45 кВ на силовой линии, за которым следует экспоненциальный спад до уровней ~ 700 В к концу интервала наблюдения (80 мкс). На контрольном кабеле регистрируется наведенное перенапряжение до ~ 120 В, вызванное электромагнитной связью с силовой линией.

Спектральный анализ формы перенапряжения выявляет значительные высокочастотные компоненты в диапазоне от 1 МГц до нескольких сотен МГц, что соответствует характерным спектрам коммутационных импульсов. Амплитуды на контрольной линии на всем диапазоне частот ниже, чем на силовой, что подтверждает ослабление сигнала при индуктивно-емкостной передаче.

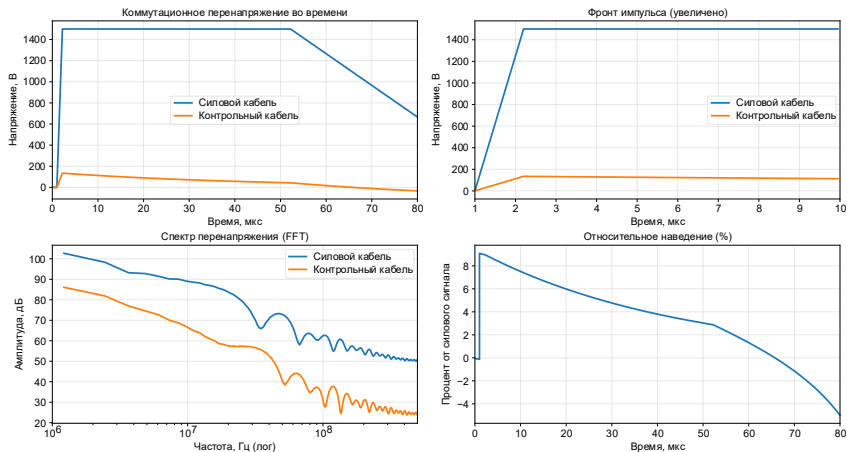


Рис. 11. Результаты численного моделирования процессов коммутационного перенапряжения, реализованное в пакете SPICE

Fig. 11. Results of numerical modeling of switching overvoltage processes implemented in the SPICE package

Таким образом, проведенное моделирование на базе использования открытых программных пакетов *PandaPower* и *SPICE* показывает, что при коммутации в силовой цепи возможно формирование кратковременных высоковольтных импульсов с существенными ВЧ-составляющими, которые через взаимную индуктивность и емкость могут наводить значительные паразитные напряжения в близко проложенных контрольных кабелях. Максимальный уровень относительного наведения в данном сценарии составил примерно 8-9 % от амплитуды силового импульса, что потенциально опасно для цепей РЗиА, особенно при отсутствии экранирования или гальванической развязки.

IV. Заключение

Современные распределительные сети РФ превращаются в активные управляемые системы, требующие новых подходов к моделированию, особенно в условиях роста доли РГ (достигающей уже порядка 10 % мощностей ЕЭС России) и глубокой цифровизацией. Проведенный сравнительный анализ программных средств для моделирования распределительных сетей показал, что в условиях их качественной трансформации – перехода от пассивной инфраструктуры к активным киберфизическим системам с высокой долей РГ – сформировалась новая экосистема инструментов, каждый из которых занимает свою стратегическую нишу.

Ключевой вывод заключается в том, что универсального решения,

адекватно покрывающего весь спектр современных задач (от технико-экономического обоснования и проектирования компонентов до анализа сетевых режимов и разработки систем управления), не существует. Отраслевые программные комплексы (*RastrWin3*, *PSS@E*, *ETAP*, *EnergyCS*, *PowerFactory*) сохраняют значение для решения узкоспециализированных, верифицированных задач в области планирования и эксплуатации электроэнергетических систем, однако их классические алгоритмы зачастую не учитывают специфику работы инверторных источников и сложного взаимодействия в распределительных сетях.

MATLAB/SimPowerSystems, несмотря на мощный функционал для моделирования электрооборудования, сталкивается с критическими ограничениями в РФ – прекращение официальной поддержки и сложности с масштабированием для больших энергосистем. Это существенно сужает его практическое применение в современных условиях. *SimInTech* является российской разработкой и обладает схожим с *MATLAB/SimPowerSystems* функционалом, что представляет значительный интерес для исследователей. Специализированные платформы демонстрируют целевой подход. *ENgee* предлагает комплексное моделирование гибридных энергообъектов с готовыми библиотеками компонентов. *HOMER* занимает нишу в технико-экономическом обосновании проектов.

Такие программно-аппаратные комплексы, как ЦДЭС, *RTDS* и другие, являются мощными специализированными инструментами, позволяющими решать широкий спектр задач по анализу и моделированию энергосистем. Однако их доступность для большинства исследователей остается ограниченной ввиду высокой стоимости и высоких требований по квалификации в процессе освоения работы с данными комплексами.

Для исследовательских и опытно-конструкторских работ, особенно в контексте импортозамещения, наиболее перспективными являются два направления. Связка открытых платформ *PandaPower* + *SPICE* демонстрирует наибольший потенциал для комплексного моделирования, сочетая анализ электромеханических переходных процессов и физику полупроводниковых приборов. Она позволяет проводить сквозное моделирование – от наносекундных переходных процессов в силовой электронике до электромеханической динамики в сети, что критически важно для проектирования гибридных систем и анализа электромагнитной совместимости. Для российских исследователей критически важна доступность инструментов: открытые платформы (*PandaPower*, *SPICE*) остаются оптимальным выбором в условиях ограниченной доступности коммерческого ПО. Специализированные отечественные разработки (на примере *ENgee*), предлагающие интегрированные среды для задач, где зависимость от зарубежного ПО стала критической: разработка алгоритмов РЗА, полунатурного моделирования и создание цифровых двойников активных сетевых элементов.

Таким образом, стратегия моделирования современных распределительных сетей должна быть комбинированной. Она предполагает использование отраслевых комплексов для базовых и нормативных расчетов, открытых инструментов (*Pandapower*, *SPICE*) для фундаментальных исследований и прототипирования, а также развитие отечественных сред типа *ENgee* для прикладных задач управления и защиты. Перспективным направлением является развитие методологий интеграционного моделирования, позволяющих корректно объединять результаты, полученные в разных программах в средах, для комплексной оценки развития цифровых энергорайонов и активных распределительных сетей.

Работа выполнена в рамках проектов государственного задания «Централизованно-распределенные многосубъектные киберфизические электроэнергетические системы: Теоретические основы, математические модели и методы формирования, развития, функционирования и управления» (FWEU-2026-0012).

The work was carried out within the framework of the state task «Centrally distributed multi-subject cyber-physical electric power systems: Theoretical foundations, mathematical models and methods of formation, development, operation and management» (FWEU-2026-0012).

© Давыдов В.Ю., 2026

© Томин Н.В., 2026

© Исакаов А.Б., 2026

Поступила в редакцию 12.01.2026

Принята к публикации 04.03.2026

Received 12.01.2026

Accepted 04.03.2026

Библиографический список

- [1] Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. N 1523-р «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> (дата обращения 01.01.2026).
- [2] Илюшин П.В. Перспективные направления развития распределительных сетей при интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 4 (67). С. 70-80.
- [3] Губанов М., Киушкина В., Широков А. О создании фонда развития локальных энергосистем // Энергетическая политика. 2023. № 9 (188). С. 70-83. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_9188_70
- [4] Вяткин В., Антипченко А. От автоматизации распределительной сети к полноценному цифровому РЭС // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № S1 (8). С. 10-13.

- [5] Моисеев М. Переход распределительных сетей 6-20 кВ к цифровым активно-адаптивным сетям с распределенной системой автоматизации // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № S1 (8). С. 14-21.
- [6] Тавлинцев А.С., Семененко С.И., Стаймова Е.Д., Шелюг С.Н. Электрические системы и сети. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2023. – 117 с.
- [7] Tran V-T., Tran T-N. Simulating the reliability of electrical distribution system using ETAP software // IJARIE. 2021. № 7 (5). P. 1334-1340.
- [8] Корнев В.А., Шмойлов А.В. О возможностях системы ETAP для электрических расчетов и моделирования // XX Всерос. науч.-тех. конф. «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность», Декабрь 2-4, 2014, Томск, Россия: ТПУ, 2014. С. 83-87.
- [9] PSS®E High-performance transmission planning and operations software for the power industry, Siemens AG, Energy Management Division Freyeselebenstrasse, 2017. – 15 p. [Электронный ресурс]. URL: [siemenspti-software-psse-brochure-2017.pdf](https://www.siemens.com/press/2017/01/01/pss-e-brochure-2017.pdf) (дата обращения 01.01.2026).
- [10] Ильичев Н.Б. Расчет и проектирование ВЛ, ОРУ и ВОЛС в среде EnergyCS Line // CADmaster. 2007. № 3. С. 12-16.
- [11] Ильичев Н., Дологов В., Мастраков Н. Опыт применения программного комплекса EnergyCS при проектировании электроэнергетических объектов в ОАО «Ивэлектроналадка» // CADmaster. 2007. № 5. С. 56-58.
- [12] Карпенко А.П., Кузьмина И.А. Математическая модель распределительной городской сети электроснабжения с учетом ее перспективного развития // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 5. С. 162-180. DOI: 10.7463/0514.0709781
- [13] Губин П.Ю., Малахов А.А., Рындина К.В. Оптимальное размещение средств компенсации реактивной мощности с помощью метода дифференциальной эволюции // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021. № 21 (2). С. 62-71. DOI: 10.14529/power210207
- [14] Карпенко А.П., Синяговская О.А. Глобальная оптимизация методом биогеографии // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 10. С. 373-398. DOI: 10.7463/1013.0605836
- [15] PowerFactory – комплексная система расчета и планирования электрических режимов. [Электронный ресурс]. URL: <https://asutp.ru/market/2018/07/10/powerfactory-kompleksnaja-sistema-rascheta-i-planirovaniya-jelektricheskikh-rezhimov> (дата обращения 01.01.2026).
- [16] Костюченко Л.П. Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB. Красноярск: Красноярский ГАУ, 2012. – 215 с.
- [17] Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование режимов работы систем электроснабжения с установками распределенной генерации и мощной асинхронной нагрузкой // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2018. № 4 (73). С. 101-114. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-101-114
- [18] Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Изолированная система электроснабжения с энергетическими роутерами и возобновляемыми источниками энергии // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. № 24 (2). С. 124-134. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-124-134

- [19] Бердников Р.Н., Ачитаев А.А., Марков М.О. Повышение запаса динамической устойчивости генераторов АГЭЖ путем использования инвертора (Опыт ПАО «РУСГИДРО») // Энергоэксперт. 2025. № 2 (94). С. 40-45.
- [20] Platonova E.V., Toropov A.S., Kolovsky A.V., Shcherbachevich V.Yu. Modeling non-linear loads for low-voltage electric grids // Journal of Physics: Conference Series. 2024. № 2697 (1). P. 012075. DOI: 10.1088/1742-6596/2697/1/012075
- [21] Buchatskiy P.Y., Onishchenko S.V., Teploukhov S.V., Kuzmin K.A. Modeling of wind generator in the power supply system of an individual consumer using SimInTech // 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), October 1-5, 2024, Vladikavkaz, Russia: IEEE, 2024. P. 1-5. DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874937
- [22] Kotin D., Ivanov I., Shtukkert S. Modified Permanent Magnet Synchronous Generators for Using in Energy Supply System for Autonomous Consumer // Energies. 2021. № 14 (21). P. 7196. DOI: 10.3390/en14217196
- [23] Вайтеленок Л.В. Имитационное моделирование релейной защиты в среде SimInTech // XI Межд. науч.-тех. конф. «Энергетика, информатика, инновации-2021», Октябрь 28-29, 2021, Смоленск, Россия: Универсум, 2021. С. 83-88.
- [24] Лиходеев С.И. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде SimInTech. Владимир: Издательство ВлГУ, 2023. – 135 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/10792> (дата обращения 01.01.2026).
- [25] Engge. Российская платформа математических вычислений и динамического моделирования. [Электронный ресурс]. URL: <https://start.engge.com> (дата обращения 01.01.2026).
- [26] Антонов А.А., Быковский С.В., Кустарев П.В., Кормилицын К.А., Пинкевич В.Ю. Функциональная Схемотехника. Практикум. С.-Пб.: Университет ИТМО, 2019. – 97 с.
- [27] Ильичев В.Ю., Жукова Ю.М. Исследование режимов работы электрических сетей с использованием программной библиотеки PandaPower // Технические науки. 2024. № 1. С. 18-22.
- [28] Thurner L., Scheidler A., Schäfer F., Menke J-H., Dollichon J., Meier F., Meinecke S., Braun M. Pandapower—An open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. № 33 (6). P. 6510-6521. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2829021
- [29] Хайретдинов И.Р., Денисов К.С., Велькин В.И. Исследование эффективности зарубежных и отечественных прикладных программ для расчета комплексных энергетических систем на основе ВИЭ // Окружающая среда и энергосбережение. 2021. № 1 (9). С. 60-66. DOI: 10.5281/zenodo.4662973
- [30] Сидиков Ш.Н., Русина А.Г., Осгонбаатар Т., Арестова А.Ю., Буренцагаан Б. Оценка влияния гидроакмулирующей электростанции на нормальный режим работы электроэнергетической системы Монголии // Ipolytech Journal. 2024. № 28 (4). С. 583-596. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-583-596
- [31] Чулюкова М.В., Томин Н.В. Метод автоматического управления нагрузкой активных потребителей для послеаварийного восстановления электроснабжения

- // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 2025. № 76. С. 411-423.
- [32] Тимофеев Д.М., Еремеев Д.Г. Автоматизация испытаний устройств РЗА с помощью отечественных ПАК моделирования переходных процессов в режиме РВ // Релейщик. 2023. № 2 (46). С. 32-37.
- [33] Костик Н.Р., Тарасов С.А., Айвазян Г.Е. Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2023. № 26 (4). С. 106-122. DOI: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-106-122
- [34] Нефедов А.С., Яковкина Т.Н. Многокритериальный выбор мощности электростанций на основе возобновляемых источников энергии и местных видов топлива в составе локальной энергосистемы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. № 24 (6). С. 1255-1270. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-6-1255-1270
- [35] Погодаева И.Н., Шакиров В.А. Выбор компонентов гибридного энергокомплекса для удаленных районов с использованием методов многокритериальной оценки // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. № 2 (34). С. 99-111. DOI: 10.25729/ESI.2024.34.2.010
- [36] Томин Н.В., Шакиров В.А., Курбацкий В.Г., Попова Е.В., Сидоров Д.Н., Козлов А.Н., Корев Д.А. Энергетические сообщества с возобновляемыми источниками энергии: эффективное планирование и управление в условиях многокритериальности. Часть 1 // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 3 (78). С. 18-27.
- [37] Лебедев А.А., Волошин А.А., Волошин Е.А., Гэн Ш. Применение методов искусственного интеллекта для синтеза алгоритмов РЗА в ПАК ЦДЭС // Электрические станции. 2026. № 2 (1135). С. 46-54. DOI: 10.71841/ES.elst.2026.1135.02.06
- [38] Волошин А.А., Волошин Е.А., Лебедев А.А. Результаты разработки российского программно-аппаратного комплекса реального времени «цифровой двойник энергосистемы» // Энергоэксперт. 2023. № 2 (86). С. 48-52.
- [39] Иванов А.А., Волошин А.А., Лебедев А.А., Волошин Е.А., Шамис М.А. Моделирование и исследование режимов работы энергосистем в ПАК ЦДЭС // Журнал «ИСУП». 2024. № 4 (112). С. 41-45.
- [40] Мшар Д.И. Цифровые программно-аппаратные комплексы RTDS // 73-я науч.-тех. конф. студентов и аспирантов «Актуальные проблемы энергетики», Апрель 25-28, 2017, Минск, Беларусь: БНТУ, 2017. С. 79-82.
- [41] Рабушко П.С. RTDS – цифровые моделирующие комплексы реального времени // 73-я науч.-тех. конф. студентов и аспирантов «Актуальные проблемы энергетики», Апрель 25-28, 2017, Минск, Беларусь: БНТУ, 2017. С. 85-87.
- [42] Программно-аппаратный комплекс симулятор RTDS. Техническое описание, ЗАО «ЭнЛАБ», 2015. – 42 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://ennlab.ru/wp-content/uploads/2018/05/Tekhnicheskoye-opisaniye-kompleksa-RTDS-versiya-2015-09-28.pdf> (дата обращения 01.01.2026).

- [43] Gutiérrez V.S., Di Natale G., Vatajelu E.-I. Python Framework for Modular and Parametric SPICE Netlists Generation // *Electronics*. 2023. № 12 (18). DOI: 10.3390/electronics12183970

References

- [1] Order of the Government of the Russian Federation dated Jun. 9, 2020 no. 1523-r “Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda [Energy Strategy of the Russian Federation through 2035]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/> [Accessed: Jan. 01, 2026] (in Russian).
- [2] P.V. Ilyushin, “Perspektivnye napravleniya razvitiya raspredelitel'nykh setei pri integratsii lokal'nykh intellektual'nykh energeticheskikh system [Promising Directions for the Development of Distribution Networks with the Integration of Local Intelligent Energy Systems]”, *Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie [Electric Power. Transmission and Distribution]*, vol. 4, no. 67, pp. 70-80, 2021 (in Russian).
- [3] M. Gubanov, V. Kiushkina and A. Shirokov, “On the creation of a fund for the development of local energy system”, *Energy policy*, vol. 9, no. 188, pp. 70-83, 2023. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_9188_70
- [4] V. Vyatkin and A. Antipchenko, “Ot avtomatizatsii raspredelitel'noi seti k polnotsennomu tsifrovomu RES [From distribution network automation to a full-fledged digital RES]”, *Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie [Electric Power. Transmission and Distribution]*, vol. S1, no. 8, pp. 10-13, 2018 (in Russian).
- [5] M. Moiseev, “Perekhod raspredelitel'nykh setei 6-20 kV k tsifrovym aktivno-adaptivnym setiam s raspredelennoi sistemoi avtomatizatsii [Transition of 6–20 kV distribution networks to digital active-adaptive networks with a distributed automation system]”, *Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie [Electric Power. Transmission and Distribution]*, vol. S1, no. 8, pp. 14-21, 2018 (in Russian).
- [6] A.S. Tavlincev, S.I. Semenenko, E.D. Staimova and S.N. Shelug, *Elektricheskie sistemy i seti [Electrical systems and networks]*. Ekaterinburg: Ural University Press, 2023 (in Russian).
- [7] V.-T. Tran and T.-N. Tran, “Simulating the reliability of electrical distribution system using ETAP software”, *IJARIIIE*, vol. 7, no. 5, pp. 1334-1340, 2021.
- [8] V.A. Kornev and A.V. Shmoilov, “O vozmozhnostiakh sistemy ETAP dlia elektricheskikh raschetov i modelirovaniia [On the capabilities of the ETAP system for electrical calculations and modeling]”, in *proc. XX All-Russian scientific and technical conf. Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost' [Power Engineering: efficiency, reliability, safety]*, Dec. 2-4, 2014, Tomsk, Russia, pp. 83-87 (in Russian).
- [9] *PSS®E High-performance transmission Planning and operations Software for the power industry*, Siemens AG, Energy Management Division Freyeslebenstrasse, 2017. [Online]. Available at: [siemenspti-software-psse-brochure-2017.pdf](#) [Accessed: Jan. 01, 2026].
- [10] N.B. Ilyichev, “Raschet i proektirovanie VL, ORU i VOLS v srede EnergyCS Line [Calculation and design of overhead lines, open switchgears and fiber-optic communication lines in the EnergyCS Line environment]”, *CADmaster*, no. 3, pp. 12-16, 2007 (in Russian).

- [11] N. Ilyichev, V. Dolotov and N. Mastrakov, “Opyt primeneniia programmnoho kompleksa EnergyCS pri proektirovanii elektroenergeticheskikh obiektov v OAO “Ivelektroanaladka” [Experience in applying the EnergyCS software package for designing electric power facilities at JSC “Ivelektroanaladka”]”, *CADmaster*, no. 5, pp. 56-58, 2007 (in Russian).
- [12] A.P. Karpenko and I.A. Kuzmina, “Matematicheskaiia model raspreditelnoi gorodskoi seti elektrosnabzheniia s uchetom ee perspektivnogo razvitiia [Mathematical model of an urban distribution power supply network considering its prospective development]”, *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana [Science and education: scientific publication of Bauman Moscow State Technical University]*, no. 5, pp. 162-180, 2014 (in Russian).
- [13] P.Yu. Gubin, A.A. Malakhov and K.V. Ryndina, “Metaheuristic differential evolution for optimal placement of reactive power compensation devices”, *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 62-71, 2021. DOI: 10.14529/power210207
- [14] A.P. Karpenko and O.A. Sinyagovskaya, “Global optimization with the use of a biogeography-based method”, *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana [Science and education: scientific publication of Bauman Moscow State Technical University]*, no. 10, pp. 373-398, 2013 (in Russian). DOI: 10.7463/1013.0605836
- [15] PowerFactory – kompleksnaia sistema rascheta i planirovaniia elektricheskikh rezhimov [PowerFactory – comprehensive system for calculation and planning of electrical operating conditions]. [Online]. Available at: <https://asutp.ru/market/2018/07/10/powerfactory-kompleksnaja-sistema-rascheta-i-planirovaniia-jel-ektricheskikh-rezhimov> [Accessed: Jan. 01, 2026] (in Russian).
- [16] L.P. Kostyuchenko, *Imitatsionnoe modelirovanie sistem elektrosnabzheniia v programme MATLAB [Simulation modeling of power supply systems in the MATLAB program: a textbook]*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk SAU [Krasnoyarsk State Agrarian University], 2012 (in Russian).
- [17] Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov and V.H. Nguyen, “Modeling of power supply system operating modes with distributed generation plants and a powerful asynchronous load”, *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, vol. 4, no. 73, pp. 101-114, 2018. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-101-114
- [18] Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov and K.V. Suslov, “Isolated power supply system with energy routers and renewable energy sources”, *Vestnik IzHGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 24, no. 2, pp. 124-134, 2021. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-124-134
- [19] R.N. Berodnikov; A.A. Achitaev and M.O. Markov, “Povyshenie zapasa dinamicheskoi ustojchivosti generatorov AGEK putem ispol'zovaniya invertora (Opyt PAO «RUSGIDRO») [Increasing the dynamic stability margin of AGEK generators by using an inverter (Experience of PJSC RUSHYDRO)]”, *Energoekspert [Energexpert]*, vol. 2, no. 94, pp. 40-45, 2025 (in Russian).
- [20] E.V. Platonova, A.S. Toropov, A.V. Kolovsky and V.Yu. Shcherbachevich, “Modeling non-linear loads for low-voltage electric grids”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2697, no. 1, pp. 012075, 2024. DOI: 10.1088/1742-6596/2697/1/012075

- [21] P.Y. Buchatskiy, S.V. Onishchenko, S.V. Teploukhov and K.A. Kuzmin, “Modeling of Wind Generator in the Power Supply System of an Individual Consumer Using SimInTech”, in proc. *2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, Oct. 1-5, 2024, Vladikavkaz, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874937
- [22] D. Kotin, I. Ivanov and S. Shtukkert, “Modified Permanent Magnet Synchronous Generators for Using in Energy Supply System for Autonomous Consumer”, *Energies*, vol. 14, no. 21, pp. 7196, Nov. 2021. DOI: 10.3390/en14217196
- [23] L.V. Vaiteleonok, “Imitacionnoe modelirovanie relejnoj zashchity v srede SimInTech [Simulation modeling of relay protection in the SimInTech environment]”, in proc. *XI Int. sci.-tech. Conf. Energetika, informatika, innovacii-2021 [Energy, informatics, innovations-2021]*, Oct. 28-29, 2021, Smolensk, Russia, pp. 83-88 (in Russian).
- [24] S.I. Likhodeev. *Osnovy modelirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i elektrotekhnicheskikh sistem v srede SimInTech [Fundamentals of modeling automatic control systems and electrical systems in the SimInTech environment]*, Vladimir: VISU Publishing House, 2023. [E-book] Available at: Safari e-book, <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/10792> (in Russian).
- [25] Engee. Rossiiskaia platforma matematicheskikh vychislenii i dinamicheskogo modelirovaniia [Russian platform for mathematical computing and dynamic modeling]. [Online]. Available at: <https://start.engee.com> [Accessed: Jan. 01, 2026] (in Russian).
- [26] A.A. Antonov, S.V. Bykovskiy, P.V. Kustarev, K.A. Kormilitsyn, and V.Yu. Pinkevich, *Funktsional'naiia Skhemotekhnika. Praktikum [Functional Circuit Design. A Practical Guide]*. St. Petersburg: ITMO University, 2019 (in Russian).
- [27] V.Yu. Ilyichev and Yu.M. Zhukova, “Investigation of operation modes of electric networks using PandaPower software library”, *Technical sciences*, no. 1, pp. 18-22, 2021.
- [28] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer, J-H. Menke, J. Dollichon, F. Meier, S. Meinecke and M. Braun, “Pandapower—An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6510-6521, Nov. 2018. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2829021
- [29] I.R. Khayretdinov, K.S. Denisov and V.I. Vel'kin, “Research on the efficiency of foreign and domestic applications for calculating energy systems based on renewable sources”, *Journal of environmental earth and energy study*, vol. 1, no. 9, pp. 60-66, 2021. DOI: 10.5281/zenodo.4662973
- [30] Sh.N. Sidikov, A.G. Rusina, T. Osgonbaatar, A.Yu. Arestova and B. Burentsagaan, “Assessing the impact of a pumped-storage power station on the normal operation of the Mongolian power system”, *Ipolytech Journal*, vol. 28, no. 4, pp. 583-596, 2024. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-583-596
- [31] M.V. Chulyukova and N.V. Tomin, “Metod avtomaticheskogo upravleniya nagruzkoy aktivnykh potrebitel'ey dlya posleavariynogo vosstanovleniya elektrosnabzheniya [A method for automatic load management of active consumers for post-emergency power supply restoration]”, *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki [Methodological issues of studying the reliability of large energy systems]*, vol. 76, pp. 411-423, 2025 (in Russian).

- [32] D.M. Timofeev and D.G. Ereemeev, “Avtomatizatsiya ispytaniy ustroystv RZA s pomoshch'yu otechestvennykh PAK modelirovaniya perekhodnykh protsessov v rezhime RV [Automation of Protection Relay and Automation Device Testing Using Domestic Transient Process Simulation Software Packages in Real-Time Mode]”, *Relyshchik [Relayman]*, vol. 2, no. 46, pp. 32-37, 2023 (in Russian).
- [33] N.R. Kostik, S.A. Tarasov and G.E. Aivazyan, “Study of Renewable Potential of the Republic of Armenia for Implementation of Hybrid Autonomous Power Supply System Using Solar Photovoltaic Modules”, *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics* vol. 26, no. 4, pp. 106-122, 2023. DOI: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-106-122
- [34] A.S. Nefedov and T.N. Yakovkina, “Multi-criterial choice of capacity of power plants based on renewable energy sources and local fuels within local energy system”, *Proceedings of Irkutsk state technical university*, vol. 24, no. 6, pp. 1255-1270, 2020. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-6-1255-1270
- [35] I.N. Pogodaeva and V.A. Shakirov, “Selection of components of a hybrid energy complex for remote areas using multi-criteria assessment methods”, *Information and mathematical technologies in science and management*, vol. 2, no. 34, pp. 99-111, 2024. DOI: 10.25729/ESI.2024.34.2.010
- [36] N.V. Tomin, V.A. Shakirov, V.G. Kurbatsky, E.V. Popova, D.N. Sidorov, A.N. Kozlov, D.A. Korev, “Renewable energy communities: effective design and management under multicriteria conditions. Part 1”, *Electric power. Transmission and distribution*, vol. 3, no. 78, pp. 18-27, 2023.
- [37] A.A. Lebedev, A.A. Voloshin and E.A. Voloshin, “Application of artificial intelligence methods for the synthesis of RPA algorithms in the hardware and software complex “digital twin of a power system””, *Elektricheskie stancii [Electric power stations]*, vol. 2, no. 1135, pp. 46-54, 2026 (in Russian). DOI: 10.71841/ES.elst.2026.1135.02.06
- [38] A.A. Voloshin, E.A. Voloshin and A.A. Lebedev, “Rezultaty razrabotki rossiiskogo programmno-apparatnogo kompleksa realnogo vremeni “tsifrovoi dvoynik energosistemy” [Results of the development of the Russian real-time software and hardware complex “digital twin of the power system”]”, *Energoekspert [Energoexpert]*, vol. 2, no. 86, pp. 48-52, 2023 (in Russian).
- [39] A.A. Ivanov, A.A. Voloshin, A.A. Lebedev, E.A. Voloshin and M.A. Shamis, “Modelirovanie i issledovanie rezhimov raboty energosistem v PAK TsDES [Modeling and investigation of power system operating conditions in the PAK TsDES software and hardware system]”, *Zhurnal “ISUP” [Journal “ISUP”]*, vol. 47, no. 112, pp. 41-45, 2024 (in Russian).
- [40] D.I. Mshar, “Tsifrovyye programmno-apparatnye komplekсы RTDS [Digital software and hardware complexes RTDS]”, in proc. *73rd scientific and technical conf. Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]*, Apr. 25-28, 2017, Minsk, Belarus, pp. 79-82 (in Russian).
- [41] P.S. Rabushko, “RTDS – tsifrovyye modeliruiushchie komplekсы realnogo vremeni [RTDS – digital real-time simulating complexes]”, in proc. *73rd scientific and technical conf. Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]*, Apr. 25-28, 2017, Minsk, Belarus, pp. 85-87 (in Russian).

- [42] *Programmno-apparatnyi kompleks simulator RTDS. Tekhnicheskoe opisanie [RTDS software and hardware simulator complex. Technical description]*, EnLAB JSC, 2015. [Online]. Available at: <https://ennlab.ru/wp-content/uploads/2018/05/Tekhnicheskoye-opisaniye-kompleksa-RTDS-versiya-2015-09-28.pdf> [Accessed: Jan. 1, 2015] (in Russian).
- [43] V.S. Gutiérrez, G. Di Natale and E.-I. Vatajelu, “Python Framework for Modular and Parametric SPICE Netlists Generation”, *Electronics*, vol. 12, no. 18, 2023. DOI: 10.3390/electronics12183970

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Давыдов Владимир Юрьевич, аспирант Института систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация.

Vladimir Yu. Davydov, postgraduate student of the Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russian Federation.

Томин Никита Викторович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник Института систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация.

Nikita V. Tomin, Cand. Sci. (Eng.), head of lab, senior researcher of the Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russian Federation.

Искаков Алексей Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация.

Alexey B. Iskakov, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, head of the lab of the V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.