

## Устройства для проверки вторичного оборудования электрических станций и подстанций

Реклама

Приборы серии PW400 для проверки традиционных и цифровых устройств РЗА



Приборы серии PCT200 для экспресс анализа параметров ТТ и ТН



Анализатор PNS630 цифровых потоков сетей МЭК 61850



Традиционные и четырехквadrантные усилители сигналов для комплексов моделирования



**МОЙ  
БИЗНЕС**



Чувашская  
Республика

ЗАО «ЭнЛАБ» – официальный представитель PONOVO  
г. Чебоксары, ул. Нижегородская, д.4  
+7 (8352) 40 66 26  
[www.enlab.ru](http://www.enlab.ru), [mail@enlab.ru](mailto:mail@enlab.ru)

# Моделирование и исследование режимов работы энергосистем в ПАК ЦДЭС



В статье рассмотрены функциональные возможности, которые дает программно-аппаратный комплекс «Цифровой двойник энергосистем» и его новые приложения. Теперь доступны: разработка электрической схемы с применением пользовательских элементов и собственных геометрических моделей линий электропередачи, настройка шага расчета при выполнении симуляции режимов работы энергосистем, создание «снимка режима» и запуск моделирования с использованием «снимков», экспорт результатов расчетов и моделирования в различные форматы данных.

НИУ «МЭИ», г. Москва  
ЗАО «ЭнЛАБ», г. Чебоксары

## Введение

Моделирование режимов энергосистем относится к числу важных прикладных и исследовательских задач, поскольку позволяет анализировать и прогнозировать поведение электрических сетей и электротехнического оборудования в различных условиях, оптимизировать их работу, повышать их надежность и устойчивость к возмущениям и нарушениям.

Существует достаточно большое разнообразие зарубежных программных и программно-аппаратных комплексов для моделирования в энергетике [1], но зачастую их применение ограничено сравнительно узконаправленной функциональностью, что недостаточно для решения комплексных инженерных, образовательных и научных задач. Учитывая задачи обеспечения технологического суверенитета страны, в НИУ «МЭИ» разработали программно-аппаратный комплекс «Цифровой двойник энергосистем» [2] (ПАК ЦДЭС), позволяющий выполнять:

- ▶ моделирование электроэнергетической схемы в режиме реального времени с шагом расчета от 30 до 150 мкс;
- ▶ исследования электромагнитных и электромеханических процессов;
- ▶ испытания устройств силовой преобразовательной техники;

- ▶ испытания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА);
- ▶ испытания устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ);
- ▶ моделирование алгоритмов защиты и автоматики.

Используемая архитектура ПАК ЦДЭС с применением шины данных, микросервисной архитектуры, централизованной системы авторизации и контейнеризации приложений позволяет достаточно просто интегрировать новую функциональность [2]. В связи с этим для выполнения вышеописанных задач в состав ПАК ЦДЭС включен ряд различных приложений, обладающих следующим набором функций:

- ▶ разработка схем энергосистем или импорт готовых схем посредством CIM-модели;
- ▶ моделирование поведения энергосистем;
- ▶ разработка сценариев симуляции на языке программирования (ЯП) Python;
- ▶ создание пользовательских элементов посредством схем замещения или ЯП C/C++;
- ▶ разработка и моделирование одно- и двухцепных воздушных и кабельных линий электропередачи с различной топологией и конфигурацией;

- ▶ разработка, конфигурация и запуск виртуальных устройств защиты и автоматизации;
- ▶ расчет интегральных показателей надежности схемы (SAIDI, SAIFI и др.);
- ▶ конфигурация информационного обмена посредством протоколов передачи данных МЭК 60870-5-104, Modbus TCP, MQTT, UDP, МЭК 61850 (SV, GOOSE, MMS);
- ▶ управление входами/выходами аналоговых и дискретных сигналов.

В рамках статьи представлена новая функциональность ПАК ЦДЭС, предназначенная для разработки моделей воздушных и кабельных линий посредством геометрического параметрирования ЛЭП, для создания пользовательских элементов, «снимков» режима и экспорта результатов моделирования в различные общепринятые форматы. Функциональность, разработанная ранее, представлена в публикациях [3] и [4].

## Разработка электрической схемы и моделирование поведения энергосистем

Для разработки схемы электрической сети ПАК ЦДЭС включает в себя приложение «Редактор ЭЭС». В приложении доступна функция импорта электрической схемы посред-

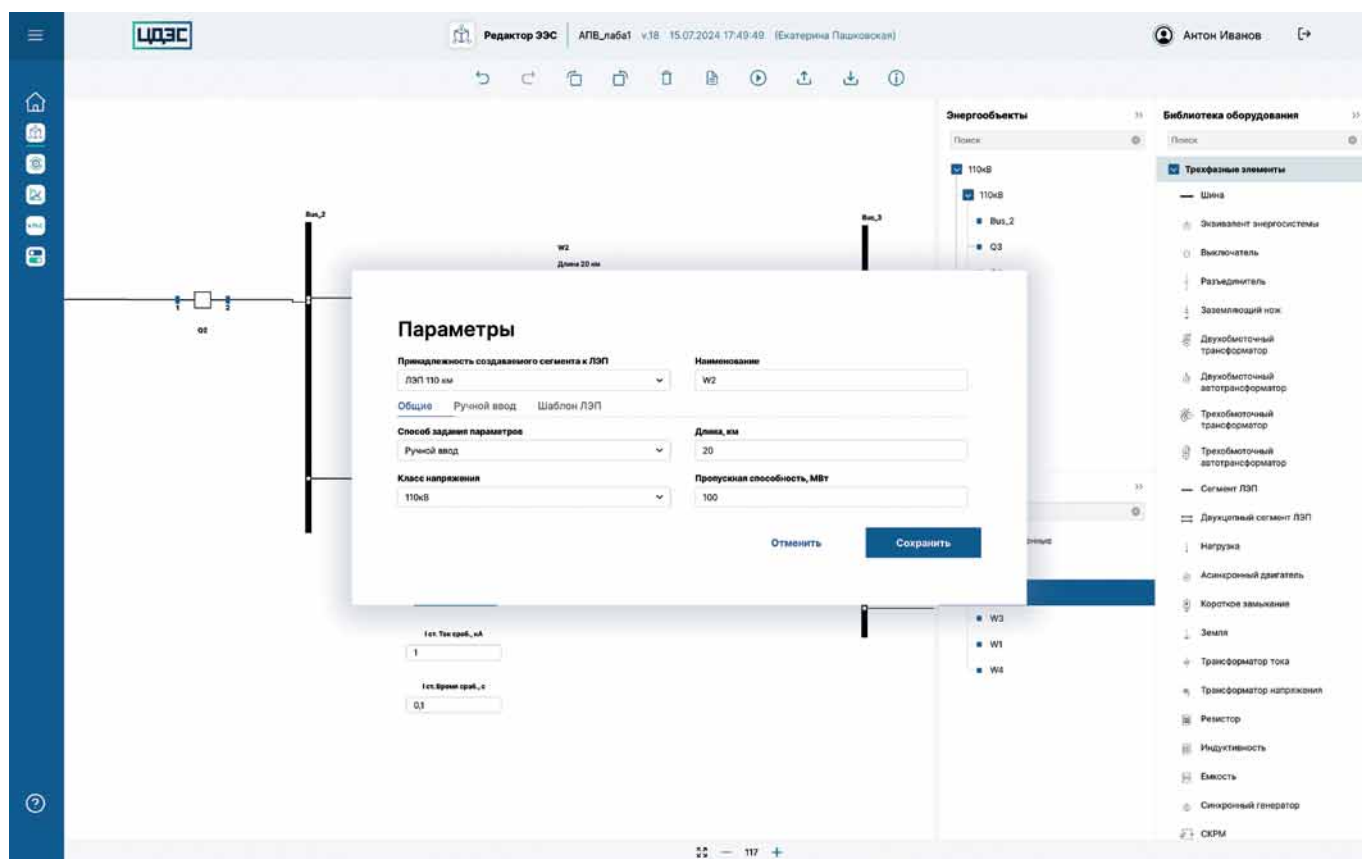


Рис. 1. Окно задания параметров ВЛ электрическим способом

вом СИМ-модели и разработки схемы с использованием встроенной библиотеки элементов. Библиотека элементов содержит одно- и трехфазные элементы следующих типов:

- источники электроэнергии (эквивалент энергосистемы и синхронный генератор);
- коммутационные аппараты (выключатель, разъединитель и т. д.);
- вращающиеся машины;
- потребители электроэнергии;
- измерительные средства;
- средства управления схемой (кнопка, индикатор, тумблер и другие).

Математические модели элементов перед добавлением в библиотеку приложения «Редактор ЭЭС» прошли множество испытаний и проверились на сходимость с математическими моделями элементов всемирно признанного ПАК RTDS [3]. Различия результатов моделирования элементов при сравнении с ПАК RTDS во всех режимах составляло не более 0,01 %. Модели элементов библиотеки ПАК ЦДЭС позволяют моделировать такие явления, как бросок тока намагничивания, насыщение трансформаторов тока, феррорезонанс в трансформаторах напряжения и др.

Помимо уже готовой библиотеки элементов, для создания электрической схемы и последующего моделирования пользователю доступно создание собственных элементов и разработка воздушных и кабельных линий с произвольной конфигурацией и топологией.

Для моделирования пользовательских элементов разработано приложение «Редактор элементов», где пользователь составляет схему замещения из простых элементов: идеального трансформатора, источника тока, источ-

ника ЭДС, катушки индуктивности, конденсатора, резистора и взаимной неэлектрической цепи. После создания элемента (задания его параметров и составления валидной схемы замещения) необходимо описать алгоритм его работы во встроенном редакторе кода на языке программирования C/C++. Посредством редактора кода созданного элемента можно описывать различные физические процессы и логику работы данного элемента.

Эта функциональность позволяет создавать собственные специфические

Таблица 1. Параметры ВЛ при геометрическом методе задания параметров

Проводник	Грозозащитный трос	Опора	Земля
Координаты расположения проводников	Координаты расположения проводников	Емкостная проводимость, См/км	Удельное сопротивление земли, Ом·км
Удельное сопротивление постоянному току, Ом/км	Удельное сопротивление постоянному току, Ом/км		Магнитная проницаемость
Диаметр провода, мм	Диаметр грозотроса, мм		
Магнитная проницаемость	Количество грозотросов		
Стрела провеса, м	Стрела провеса, м		
Расщепления проводников фазы			
Количество проводников фазы			
Расстояние между проводниками фазы			

элементы с оригинальной логикой работы под различные технологические режимы и физические процессы и использовать их при моделировании поведения энергосистем.

### Разработка моделей воздушных и кабельных линий

В ПАК ЦДЭС для моделирования одно- и двухцепных воздушных линий (ВЛ) применяется модель Бергерона, так как данная модель линии разгружает параметры линии и позволяет достаточно легко производить моделирование ВЛ, в которых не происходит исследований процессов, связанных с изменением частоты. Существует два способа создания модели ВЛ: посредством задания электрических параметров и геометрическим способом.

При задании параметров электрическим способом необходимо указать значения активного и реактивного сопротивлений последовательностей (рис. 1). Также для ВЛ необходимо указать способ расчета: как длинную линию или PI-секцию (модель с сосредоточенными параметрами).

Для задания параметров ВЛ геометрическим методом разработано специальное приложение «Редактор ВЛ и КЛ». Для моделирования ВЛ необходимо определить тип линии: одноцепная или двухцепная. После этого задать параметры ВЛ, представленные в табл. 1.

На рис. 2 показаны скриншоты приложения «Редактор ВЛ и КЛ» при разработке модели одно- и двухцепных ВЛ.

Разработанные модели ВЛ доступны для использования в электрических схемах для последующей симуляции режима энергосистемы. Результаты параметрирования ВЛ отображаются в виде матриц:

- ▶ последовательностей продольных сопротивлений;
- ▶ последовательностей поперечных проводимостей;
- ▶ фазных продольных сопротивлений;
- ▶ фазных поперечных проводимостей.

Помимо воздушных линий, ПАК ЦДЭС позволяет разрабатывать модели кабельных линий (КЛ) с использованием геометрического способа. Для конфигурации КЛ таким образом доступно задание следующих слоев:

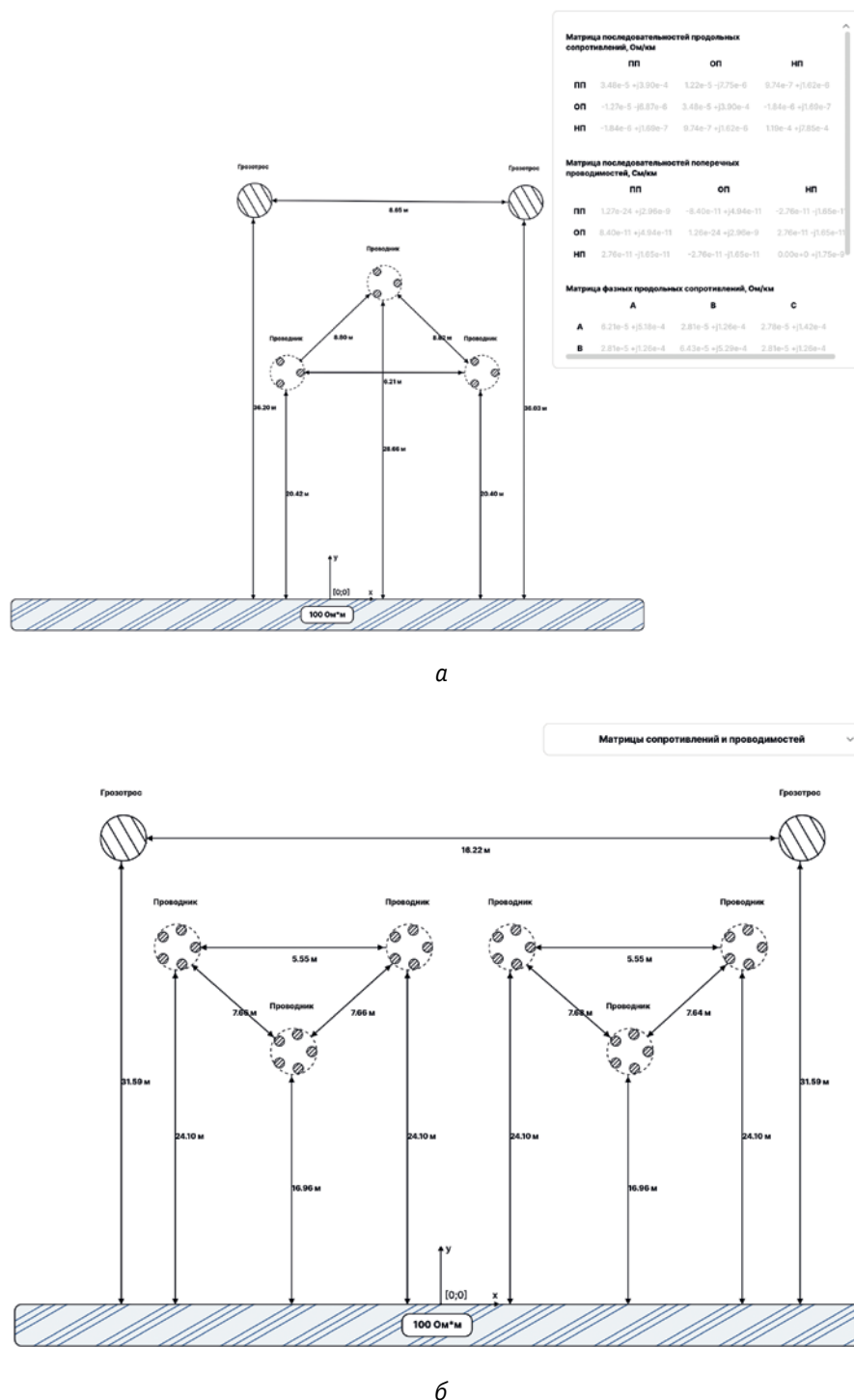


Рис. 2. Модели ВЛ в приложении «Редактор ВЛ и КЛ» при геометрическом способе параметрирования: а – одноцепная ВЛ; б – двухцепная ВЛ

- ▶ Жила | Изоляция;
- ▶ Жила | Изоляция | Экран | Изоляция;
- ▶ Жила | Изоляция | Экран | Изоляция | Экран | Изоляция;
- ▶ Жила | Изоляция | Экран | Изоляция | Экран | Изоляция | Экран | Изоляция.

В табл. 2 перечислены параметры КЛ. Стоит отметить, что параметры слоев КЛ зависят от выбранной конфигурации.

На рис. 3 представлен скриншот приложения «Редактор ВЛ и КЛ» при параметрировании кабельных линий.

По окончании параметрирования ВЛ и КЛ модели ЛЭП готовы к использованию при разработке электрических схем в приложении «Редактор схемы ЭЭС». После того как схема электрической сети разработана, необходимо выполнить валидацию, в рамках которой данное приложение проверяет схему на наличие источ-

ников электроэнергии и отсутствие островных изолированных участков. После успешной валидации разработанная схема сети автоматически передается в другие приложения ПАК ЦДЭС, например, в приложение «Симулятор ЭЭС», где происходит запуск симуляции разработанного решения. Стоит отметить, что в приложении «Симулятор ЭЭС» схема недоступна для редактирования и автоматически окрашивается в соответствии со стандартом «Правила оформления нормальных схем электрических соединений подстанций и графического отображения информации посредством ПТК и АСУ ТП» (СТО 56947007-25.040.70.101-2011) (рис. 4).

### Настройка шага расчета при выполнении симуляции режимов работы энергосистем

При моделировании режимов работы энергосистем часто требуется изменение шага расчета режима в зависимости от количества элементов, состава технологических элементов и сложности моделируемой схемы.

В связи с этим в ПАК ЦДЭС имеется возможность изменения шага расчета режимов работы энергосистемы. В приложении «Симулятор ЭЭС» по умолчанию задан шаг расчета 50 мкс. При необходимости более точного моделирования допустимо установить шаг расчета 30 мкс. Увеличение шага расчета до 100 или 150 мкс позволяет расширить пользовательские возможности по моделированию и повысить, например, количество элементов в со-

Таблица 2. Параметры КЛ при геометрическом методе задания параметров

Проводник	Слой КЛ	Земля
Координаты расположения проводников	Внешний радиус проводника изоляции и полупроводящего слоя, м	Удельное сопротивление земли, Ом·км
Удельное сопротивление, Ом/км	Относительная магнитная проницаемость изоляции и полупроводящего слоя	Магнитная проницаемость
Внешний радиус проводника, м	Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции и полупроводящего слоя	
Относительная магнитная проницаемость	Толщина внешнего полупроводящего слоя, м	
	Толщина внутреннего полупроводящего слоя, м	
	Для второго и последующего слоев задаются следующие параметры: <ul style="list-style-type: none"> <li>• внешний радиус проводника, м;</li> <li>• относительная магнитная проницаемость;</li> <li>• удельное сопротивление, Ом/км</li> </ul>	

ставе моделируемой энергосистемы без изменения аппаратных ресурсов. В настоящий момент проведены нагрузочные испытания ПАК ЦДЭС, в рамках которых одновременно смулировались режимы работы 12 электрических схем, каждая из которых содержала 673 однофазных топологических узла, включая 56 генераторов при шаге расчета 50 мкс.

### Создание «снимка режима» и запуск моделирования

При моделировании больших энергосистем, содержащих множество синхронных генераторов или вращающихся машин с системами автоматического регулирования, требуется значительное время для выхода энергосистемы на установившийся режим. Это связано с возникновени-

ем переходных процессов и их последующим длительным затуханием, механической инерцией вращающихся машин и генераторов, большими постоянными времени автоматических регуляторов.

В ПАК ЦДЭС реализована функциональность создания «снимков» текущего мгновенного состояния симуляции для возможности запуска симуляции с нужного предварительно сохраненного момента. Все «снимки» режима симуляции сохраняются в памяти ПАК ЦДЭС. Использование данной функциональности позволяет существенно ускорить проведение исследований при работе со сложными моделями энергосистемы.

### Экспорт результатов расчета и моделирования в различные форматы данных

После выполнения моделирования ПАК ЦДЭС позволяет экспортировать следующие результаты моделирования в различные форматы:

- ▶ осциллограммы (формат COMTRADE);
- ▶ схема энергосистемы и состояние режима симуляции (формат SVG);
- ▶ графики (формат CSV, PNG);
- ▶ журнал событий (формат CSV);
- ▶ CIM-модель энергосистемы (формат XML);
- ▶ однолинейная схема ПС (формат SSD);
- ▶ результаты расчетов параметров надежности энергосистемы (XLSX).

Широкий список поддерживаемых и общепринятых форматов экспорта позволяет быстро и удобно использовать результаты моделирования

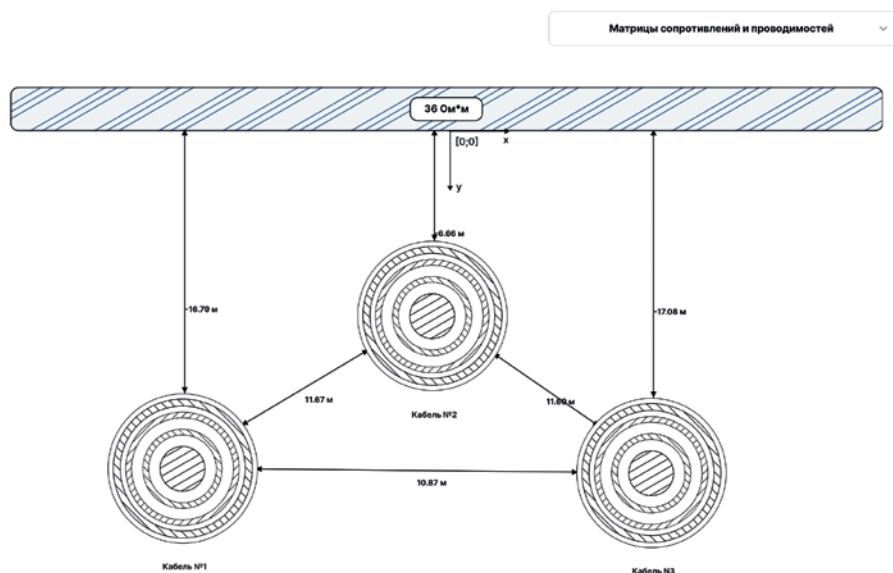
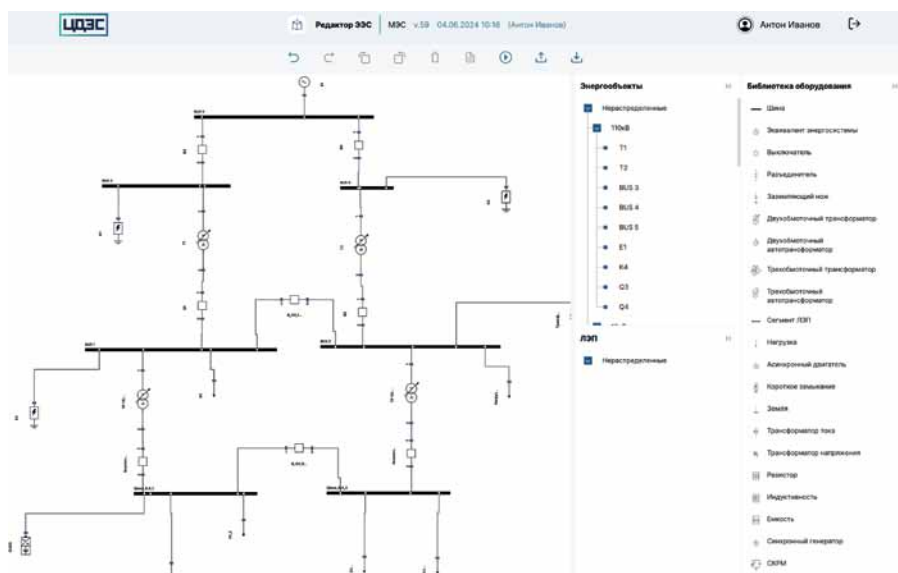
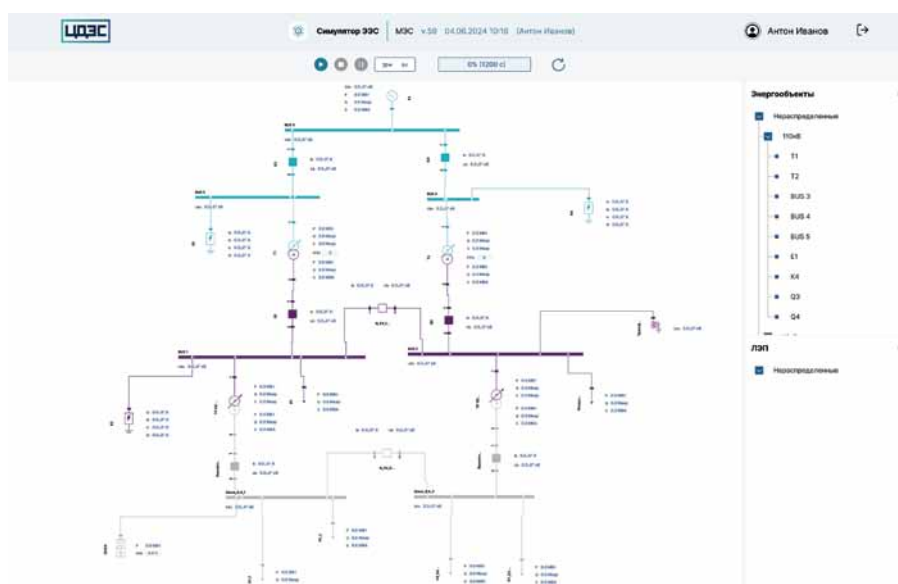


Рис. 3. Геометрическая модель кабельной линии в приложении «Редактор ВЛ и КЛ»



а



б

Рис. 4. Отображение электрической схемы: а – в приложении «Редактор ЭЭС»; б – в приложении «Симулятор ЭЭС»

для составления отчетов, протоколов исследования и т. д. Например, формат экспорта однолинейной схемы ПС SSD необходим для разработки решений по РЗА и АСУ ТП для цифровых подстанций (ЦПС), а такие форматы, как COMTRADE, CSV и XLSX, предоставляют возможность произ-

водить дополнительные вычисления и исследования на основе полученных данных из ПАК ЦДЭС.

#### Заключение

Представленная в статье функциональность расширяет ранее имеющиеся возможности ПАК ЦДЭС в части

моделирования режимов энергосистемы. Моделирование длинных линий, различных топологий ВЛ и КЛ, создание «снимков» режима и экспорт результатов моделирования в различных форматах – все это необходимо при выполнении как инженерных, так и научных задач. Широкие функциональные возможности комплекса позволяют использовать ПАК ЦДЭС как единую многофункциональную и комплексную платформу взамен сразу нескольких ведущих программных и программно-аппаратных комплексов зарубежной разработки.

#### Литература

1. Форсайт П., Шамис М. А., Иванов Ф. А. Новая платформа NovaCog для симуляторов RTDS // Энергия единой сети. 2018. № 3.
2. Волошин А. А., Волошин Е. А., Лебедев А. А., Лебедева Н. С. Архитектура программного-аппаратного комплекса «Цифровой двойник энергосистемы» // Электрические станции. 2023. № 10.
3. Волошин А. А., Волошин Е. А., Лебедев А. А. Результаты разработки российского программно-аппаратного комплекса реального времени «Цифровой двойник энергосистемы» // Энергоэксперт. 2023. № 2.
4. Волошин А. А., Волошин Е. А., Шамис М. А., Лебедев А. А., Малютин М. С., Рыжков А. К. Применение программно-аппаратного комплекса «Цифровой двойник энергосистемы» для подготовки научных и инженерных кадров в электроэнергетике // Энергоэксперт. 2024. № 1.

А. А. Иванов, ст. преподаватель,  
А. А. Волошин, к. т. н., доцент,  
А. А. Лебедев, к. т. н., ст. преподаватель,  
Е. А. Волошин, ст. преподаватель,  
НИУ «МЭИ», г. Москва,

М. А. Шамис,  
к. т. н., генеральный директор,  
ЗАО «ЭнЛАБ», г. Чебоксары,  
тел.: +7 (8352) 40-6626,  
e-mail: mail@ennlab.ru,  
сайт: www.ennlab.ru