

## ИНТЕРАКТИВНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В SMATH STUDIO

Ушакова Н. Ю. ORCID ID 0000-0001-6566-6370,  
Быковская Л. В. ORCID ID 0009-0003-1273-2348

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет», Оренбург, Российская Федерация,  
e-mail: olaa56@mail.ru*

В условиях импортозамещения актуально применение отечественной системы компьютерной математики SMath Studio для моделирования электротехнических устройств, однако методические руководства по созданию интерактивных моделей в данной среде отсутствуют. Цель работы – разработка методологических рекомендаций по проектированию и реализации вычислительного ядра интерактивных верифицируемых моделей электротехнических устройств в SMath Studio и их апробация на примере разработанных моделей. Исследование базируется на анализе функциональных возможностей SMath Studio и ее плагинов. Систематизированы особенности плагинов визуализации, обоснована целесообразность построения вычислительного ядра в виде иерархической модульной структуры с множественными модулями валидации и ветвления. Сформулированы практические рекомендации по реализации модулей с учетом специфики встроенных вычислительных инструментов SMath Studio и используемых плагинов. На основе анализа базового функционала SMath Studio для решения систем уравнений показаны проблемы и ограничения использования ряда решателей в моделях электротехнических устройств при автоматизации расчетов. Предложена методика построения графических иллюстраций в относительных единицах, обоснована необходимость введения пользовательских функций, продемонстрированы особенности формирования интерфейса при сохранении программы в формате исполняемого файла. Практическая новизна и значимость работы заключается в адаптации принципов модульного построения вычислительного ядра к специфике среды SMath Studio для создания верифицируемых электротехнических моделей. Апробация модели подтвердила ее верифицируемость: расхождение с аналитическими решениями не превышает 0,1 %. Разработанные рекомендации могут быть применены в моделях для проектирования и прогнозирования режимов работы при эксплуатации электрических систем и комплексов.

**Ключевые слова:** моделирование электрических цепей, SMath Studio, плагины, интерактивные модели, элементы управления, имитационное моделирование

## INTERACTIVE MODELS OF ELECTRICAL DEVICES IN SMATH STUDIO

Ushakova N. Yu. ORCID ID 0000-0001-6566-6370,  
Bykovskaya L. V. ORCID ID 0009-0003-1273-2348

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
“Orenburg State University”, Orenburg, Russian Federation,  
e-mail: olaa56@mail.ru*

In the context of import substitution, the use of the domestic computer mathematics system SMath Studio for modeling electrical devices is relevant; however, methodological guidelines for creating interactive models in this environment are absent. The aim of this work is to develop methodological recommendations for the design and implementation of the computational core of interactive verifiable models of electrical devices in SMath Studio and to test them using developed models as examples. The research is based on the analysis of the functionality of SMath Studio and its plugins. The features of visualization plugins are systematized, and the feasibility of constructing the computational core as a hierarchical modular structure with multiple validation and branching modules is substantiated. Practical recommendations for implementing modules are formulated, considering the specifics of SMath Studio's built-in computational tools and the plugins used. Based on the analysis of the basic functionality of SMath Studio for solving systems of equations, the problems and limitations of using a number of solvers in models of electrical devices during calculation automation are shown. A technique for constructing graphical illustrations in relative units is proposed, the necessity of introducing user-defined functions is substantiated, and the features of interface formation when saving the program as an executable file are demonstrated. The practical novelty and significance of the work lies in the adaptation of the principles of modular construction of the computing core to the specifics of the SMath Studio environment for creating verifiable electrical engineering models. Testing of the model confirmed its verifiability: deviation from analytical solutions does not exceed 0,1 %. The developed recommendations can be applied in models for the design and forecasting of operating modes during the operation of electrical systems and complexes.

**Keywords:** modeling of electrical circuits, SMath Studio, plug-ins, interactive models, controls, simulation modeling

## Введение

Разработка и проектирование любого электротехнического устройства начинается с построения и исследования его математической модели. Подавляющая часть рассматриваемых в специальной литературе математических моделей электромеханических преобразователей, элементов электрических систем основана на замене реальных устройств их электрическими схемами замещения и использовании при определенных допущениях законов и методов электрических цепей. Такие модели универсальны, понятны, позволяют широко применять для их реализации не только языки программирования высокого уровня, но современные системы компьютерной математики (СКМ) [1, 2]. На протяжении долгого времени самой популярной СКМ оставался Mathcad [3, 4].

Однако сегодня, в контексте импортозамещения, актуальными являются популяризация и внедрение для моделирования в электротехнике отечественной СКМ SMath Studio [5, 6], зарегистрированной в Реестре Российского программного обеспечения (№ 12849 от 14.02.2022). SMath Studio [7, 8] имеет обширный базовый функционал, удобный и понятный интерфейс, переведенный на 46 языков, постоянно обновляется, бесплатен для личного использования.

В SMath Studio дополнительно к основному инструментарию разработано около ста дополнений (плагинов). Их использование позволяет разработчику не только формировать конфигурацию программы под индивидуальные запросы и задачи [9–11], но и расширять вычислительные ресурсы за счет сопряжения со специализированными программами моделирования, разрабатывать динамические модели, создавать компактные исполняемые симуляторы. Однако руководств по работе с плагинами и методологии разработки на их основе моделей электротехнических устройств практически нет.

**Цель исследования** – разработка методологических рекомендаций по проектированию и реализации вычислительного ядра интерактивных верифицируемых моделей электротехнических устройств в среде SMath Studio на основе анализа ее визуальных и вычислительных возможностей, а также апробация предложенного подхода на примере модели трехфазной цепи с динамической нагрузкой.

### Материалы и методы исследования

Поскольку функционирование электрических цепей строго регламентировано законами физики и математически формализовано, алгоритмы их анализа легко под-

даются унификации. Для конкретных типов электрических цепей возможны обобщенные алгоритмические решения, охватывающие сразу широкий спектр электротехнических задач и позволяющие проектировать модели для исследования выходных характеристик объекта при многообразных комбинациях параметров, топологии схемы, режимов ее работы.

Реализовать такие обобщенные алгоритмы в интерактивной форме можно путем интеграции в вычислительный документ SMath Studio специализированных плагинов, доступных в базовой версии программы. Дискретный выбор топологических конфигураций и видов режимов (например, типа соединения нагрузки или вида аварийного процесса) возможен с помощью плагинов RadioButtonList Region и ComboBoxList Region. Элемент Slider Region предназначен для плавного изменения физических параметров (сопротивлений, индуктивностей, напряжений) в заданном диапазоне. Включение/выключение элементов или параметров схемы реализуется через CheckBoxList Region. Использование эксклюзивного плагина ViewerFiles Type позволяет представить программный продукт в виде автономного исполняемого файла, внешне напоминающего виртуальный стенд. Для повышения наглядности и информативности графических иллюстраций (осциллограмм, векторных диаграмм) целесообразно использовать плагин X-Y Plot Region, обеспечивающий построение динамически обновляемых графиков в реальном времени, что позволяет увидеть определенные закономерности, неочевидные при расчетах со статическими значениями параметров [12, 13]. Каждый из перечисленных плагинов имеет особенности, которые необходимо учитывать при проектировании интерактивных моделей (табл. 1).

### Результаты исследования и их обсуждение

Предложенный модульный подход в сочетании с элементами визуализации SMath Studio реализован авторами в разработанных интерактивных моделях трехфазных цепей со статической и динамической нагрузкой [14, 15]. Структура вычислительного ядра модели трехфазной цепи с динамической нагрузкой показана на рис. 1.

Данная модель разработана на основе метода симметричных составляющих [16] и позволяет исследовать 27 комбинаций аварийных режимов и схем соединения нагрузки при одновременной возможности интерактивного изменения параметров элементов цепи в широких пределах.



Рис. 1. Модульная структура вычислительного ядра

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

## Особенности дополнений SMath Studio для визуализации расчетов

Элемент	Функционал	Особенности/Ограничения
Slider Region (ползунок)	Позволяет изменять указанный параметр с заданным шагом в заданных пределах в режиме реального времени, настраивать внешний вид	Нижний предел начинается от чисел ( $10^{-15}$ ), верхний предел практически ничем не ограничен. Не предусматривает ввод единицы измерения. В файле (.exe) установленное значение высвечивается только при наведении на движок курсора
CheckBoxList Region (список флажков)	Позволяет включать одновременно несколько флажков, выбирать формат выходных данных, настраивать внешний вид	При выборе в списке Output форматов данных «checked status», «checked indices», «checked items rows», «checked» число строк матрицы выходных данных не постоянно и равно числу включенных флажков
RadioButtonList Region (список радиокнопок)	Позволяет включать одновременно только одну кнопку, выбирать формат выходных данных, настраивать внешний вид	При большом числе строк матрицы, выбранной в качестве источника, занимает много места на поле расчета
ComboBoxList Region (список)	Позволяет выбрать одновременно только одну строку, выбирать вид списка, настраивать внешний вид	При выборе вида списка «Выпадающий список» имеет компактный вид. Поле списка имеет ограниченный размер, при числе пунктов $n > 5$ без движка увидеть одновременно все пункты нельзя
ViewerFiles Type (файлы просмотра)	Позволяет создавать компактные исполняемые файлы (виртуальные лабораторные стенды)	Executable files воспринимаются большинством антивирусных программ как вирус. Не позволяет настраивать интерфейс исполняемого файла
X-Y Plot Region (график X-Y)	Позволяет строить двумерные графики от любой переменной, устанавливать пределы осей	Автоматически не корректирует пределы осей

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Состав модулей вычислительного ядра определяется алгоритмом решения электротехнической задачи. При практической реализации модулей вычислительного ядра в SMath Studio выявляется множество осо-

бенностей, которые обусловлены в первую очередь спецификой применяемых плагинов визуализации и встроенных вычислительных инструментов среды. Рассмотрим их на примере разработанной модели.

*Модуль ввода данных.* При формализации исходных данных в SMath Studio (значения параметров источников и пассивных элементов исследуемой цепи) разработчик может использовать различные способы их задания:

- в виде действительного числа (индивидуально для каждого параметра);
- как выходной параметр элемента управления Slider Region;
- в матричной форме, с объединением значений нескольких параметров в вектор;
- в виде комплексных чисел.

Вычисления в SMath Studio корректно выполняются при любом из перечисленных форматов представления исходных данных. Однако при сохранении готовой программы в исполняемый файл (формат .exe) с помощью плагина ViewerFiles Type вывод на экран и интерактивное изменение данных в скомпилированном приложении будет возможным только для первых двух форматов (действительные числа и значения, переданные от Slider Region), которые и рекомендуется использовать в интерактивных моделях.

При работе с Slider Region следует принимать во внимание отсутствие в его свойствах поля для указания единицы измерения. Поэтому для выходных данных Slider Region в модуле должен быть предусмотрен ввод единиц с помощью стандартных математических операций SMath Studio.

*Модули валидации.* При разработке интерактивной модели в SMath Studio целесообразно предусматривать несколько уровней валидации данных, охватывающих все стадии обработки данных: от первичного ввода до финального вывода результатов.

В разработанной модели функционируют четыре специализированных модуля валидации, выполняющих следующие функции:

- проверка исходных параметров (источников и пассивных элементов) на соответствие допустимым диапазонам;
- верификация корректности преобразования при формировании схем замещения;
- анализ совместимости выбранных режимов, топологии и параметров нагрузки (блокировка физически невозможных комбинаций);
- проверка выходных данных для подтверждения адекватности модели.

Данный подход приобретает особую актуальность при компиляции проекта в исполняемый файл (.exe), поскольку после упаковки программа функционирует автономно, и все потенциальные ошибки должны быть обработаны на стороне разработчика заблаговременно.

*Модуль выбора схемы и режима.* Реализация данного модуля базируется на применении элементов управления CheckBoxList Region, RadioButtonList Region и ComboBoxList Region. Для каждого из них выполняется конфигурирование входной матрицы, настройка визуального представления и определение формата выходных данных.

В отношении элемента CheckBoxList Region установлено, что, несмотря на множественность поддерживаемых форматов вывода, наиболее пригодным для задач моделирования электрических цепей является матрица состояния флажков. Данный формат обеспечивает детерминированную размерность, поскольку количество строк в выходной матрице строго соответствует числу элементов списка.

Для элементов RadioButtonList Region и ComboBoxList Region в качестве оптимального способа представления выходной величины при последующей обработке в блоке условий рекомендуется использование формата «индекс элемента» (item's index), что позволяет однозначно идентифицировать выбранную пользователем альтернативу.

*Модули обработки условий и выбора ветви расчета.* В сложных иерархических моделях может функционировать несколько таких модулей, каждый из которых решает специфические задачи на определенном этапе вычислительного процесса. Реализация модулей осуществляется штатными средствами программирования SMath Studio с применением булевых операторов и условных конструкций.

В разработанной модели вычислительное ядро включает два модуля ветвления. На первом этапе, в зависимости от схемы соединения нагрузки и вида аварийного режима, производится коррекция параметров схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. На втором этапе, с учетом сочетания выбранного аварийного режима и конфигурации соединения нагрузки, формируются система уравнений и соответствующие матрицы коэффициентов.

*Модуль формирования математической модели.* Структура данного модуля определяется постановкой решаемой задачи и выбранным методом расчета. Применительно к анализу электрических цепей наиболее универсальной формой математического описания является система уравнений, составленная по законам Кирхгофа. Для рассматриваемой модели трехфазной цепи с динамической нагрузкой указанная система автоматически дополняется граничными условиями в месте возникновения аварии.

Таблица 2

Основные инструменты SMath Studio для решения уравнений и систем уравнений

Функция/метод	Назначение, особенности применения
solve(2)	Ищет только <i>действительные</i> корни уравнения в диапазоне, предварительно установленном во вкладке «Опции» – «Вычисление» – «Корни (диапазон)». Решение может быть некорректным при размерности уравнения $n \geq 3$
solve(4)	Ищет только <i>действительные</i> корни уравнения внутри предварительно задаваемого промежутка между a и b. Решение может быть некорректным при размерности уравнения $n \geq 3$
Команда «Найти корни» во вкладке «Вычисление»	Ищет только <i>действительные</i> корни уравнения в диапазоне, предварительно установленном во вкладке «Опции» – «Вычисление» – «Корни (диапазон)»
polyroots(v)	Ищет как <i>действительные</i> корни, так и <i>комплексные</i> корни полинома, заданного вектором (v) его коэффициентов. Опция автоматического формирования вектора коэффициентов в SMath Studio не предусмотрена
roots(2)	Может использоваться для решения линейных и нелинейных систем уравнений, но только с <i>действительными</i> корнями. В случае нескольких решений покажет только одно из них
roots(3)	Может использоваться для решения линейных и нелинейных систем уравнений, но только с <i>действительными</i> корнями. Требует задания приближенных значений неизвестных
Матричный метод (метод обратной матрицы)	Позволяет решать СЛАУ как с <i>действительными</i> , так и с <i>комплексными</i> корнями, в том числе в символьном виде. Поддерживает решение СЛАУ сразу для нескольких вариантов правой части уравнений
Метод Крамера	Позволяет решать СЛАУ как с <i>действительными</i> , так и с <i>комплексными</i> корнями, в том числе в символьном виде. Неудобен для автоматизированного расчета и решения СЛАУ большой размерности $n > 3$

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Формирование матрицы коэффициентов осуществляется в два этапа: сначала генерируется универсальная матрица для схем замещения (на основе законов Кирхгофа), затем она модифицируется путем включения корректирующей матрицы, которая соответствует конкретному аварийному режиму, идентифицированному модулем обработки условий.

*Модуль решения.* При реализации модуля решения необходимо учитывать особенности базового функционала SMath Studio для решений уравнений и систем уравнений, табл. 2.

Анализ табл. 2 показывает, что наиболее универсальным методом решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), лежащих в основе большинства линейных математических моделей электротехнических устройств, является матричный метод (метод обратной матрицы). Данный метод легко автоматизируется, не требует ручного изменения диапазонов корней или задания предварительных приближений, а также позволяет решать системы как с действительными, так и с комплексными коэффициентами. Использо-

вание других решателей SMath Studio требует доработки исходного алгоритма за счет введения дополнительных модулей выбора условий и валидации.

При реализации модуля решения необходимо учитывать, что для обеспечения устойчивости вычислительного процесса решение СЛАУ целесообразно проводить в безразмерных величинах. В связи с этим в программе на этапе решения должен быть предусмотрен переход к безразмерному представлению данных и последующий обратный переход для интерпретации результатов вычислений.

*Модуль постобработки результатов.* В данном модуле выполняется проверка соблюдения баланса активной и реактивной мощности, а также контроль выполнения законов Кирхгофа для полученного решения.

Поскольку в базовом функционале SMath Studio отсутствует встроенная функция для получения комплексно-сопряженного числа, при необходимости его вычисления следует предусмотреть пользовательскую функцию либо использовать операцию Conjugate из плагина Custom Functions.

**Сравнительная векторная диаграмма токов (в месте к.з., в генераторе, в нагрузке)**

Нормирующий коэффициент для построения векторной диаграммы в относительных единицах

$$k := \max(|IA_{kz}| |IB_{kz}| |IC_{kz}| |IA_g| |IB_g| |IC_g| |IA_n| |IB_n| |IC_n|) = 17,1923 \text{ A}$$

$$k := \lceil k \rceil = 18 \text{ A}$$

$$Ikz := [0 \quad IA_{kz} \quad 0 \quad IB_{kz} \quad 0 \quad IC_{kz}]^T \quad Ig := [0 \quad IA_g \quad 0 \quad IB_g \quad 0 \quad IC_g]^T \quad In := [0 \quad IA_n \quad 0 \quad IB_n \quad 0 \quad IC_n]^T$$

$$\text{Токи}_{kz} := \text{augment} \left( -\frac{\text{Im}(Ikz)}{k}; \frac{\text{Re}(Ikz)}{k} \right) \quad \text{Токи}_{g} := \text{augment} \left( -\frac{\text{Im}(Ig)}{k}; \frac{\text{Re}(Ig)}{k} \right)$$

$$\text{Токи}_{n} := \text{augment} \left( -\frac{\text{Im}(In)}{k}; \frac{\text{Re}(In)}{k} \right)$$

Рис. 2. Данные для построения векторной диаграммы токов в относительных единицах  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Результаты расчета комплексных напряжений и токов выводятся в SMath Studio в алгебраической форме записи, которая недостаточно наглядна для анализа. Поэтому для интерпретации результатов целесообразно вычислять модуль и аргумент (начальную фазу) комплексных величин. Стандартную функцию `xy2pol` перевода координат точки из прямоугольной системы координат в полярную для этих целей использовать не рекомендуется, так как при переводе радиан в угловые градусы она выдает некорректные результаты.

**Модуль визуализации.** В данном модуле выполняется построение временных и векторных диаграмм с использованием базовых графических средств SMath Studio либо плагина X-Y Plot Region. При формировании графика с помощью встроенных средств программы необходимо учесть, что при построении графика заданной аналитической функции одного переменного на поле графика эта переменная должна быть обязательно обозначена латинской буквой «x», при любом другом символе программа напишет, что он «не определен». Плагин X-Y Plot Region поддерживает любые обозначения переменной.

Поскольку SMath Studio не корректирует пределы осей автоматически, динамически изменяющиеся при вариации параметров диаграммы целесообразно строить в относительных единицах. При этом нормирующий масштаб должен пересчитываться для каждого нового режима и отображаться непосредственно на поле графика. Пример расчета нормирующего коэффициента для векторной диаграммы токов приведен на рис. 2.

**Модуль вывода результатов.** Результаты моделирования отображаются динамически, мгновенно реагируя на изменения входных данных:

- для численных результатов (токи, напряжения, мощности) выводятся модуль и начальная фаза;

- графические иллюстрации (векторные диаграммы) представляются в виде двумерных графиков.

Благодаря автоматическому пересчету любое изменение параметров или выбор пункта в списках приводит к обновлению графиков в реальном времени.

При выводе результатов следует учитывать, что в перечне единиц измерения SMath Studio отсутствуют некоторые электротехнические величины (круговая частота, реактивная и полная мощность). Для них в программе необходимо ввести пользовательские единицы измерения.

Для конечного пользователя, которому требуются только исходные данные, выбор режимов и результаты расчетов, наиболее удобной формой представления программы является автономный исполняемый файл (.exe), создаваемый с помощью плагина ViewerFiles Type и открываемый в SMath Viewer.

При сохранении файла в формате `executable files` следует учесть следующее:

- при задании исходных параметров программа располагает каждый из них построчно, поэтому они занимают много места на поле выводимого экрана. Задать параметры более компактно в матричной форме или в комплексных числах здесь нельзя;
- аналогично, друг под другом, на поле экрана будут располагаться и все использу-

емые в программе элементы управления, графики. Скорректировать их расположение нельзя. Поэтому практичнее выбирать элементы компактного вида, например вместо `RadioButtonList Region – ComboBoxList Region` с «выпадающим списком»;

– чтобы на экран не выводилась лишняя информация, всю внутреннюю логику программы в пользовательском интерфейсе целесообразно скрыть в закрытых областях.

На рис. 3 представлен фрагмент интерфейса программы «Интерактивное моделирование аварийных режимов в трехфазной линии с динамической нагрузкой» [14] в SMath Viewer.

Пользователь может изменять исходные параметры источника и элементов, выбирать вид короткого замыкания (к. з.), схему нагрузки и конфигурацию цепи. При любом изменении в режиме реального времени пересчитываются токи, напряжения, мощности и динамически перестраивается вектор-

ная диаграмма. В приведенном фрагменте для компактности отображены только токи в месте короткого замыкания и соответствующая векторная диаграмма. В полной версии модели выводятся 18 значений токов и напряжений, включая их симметричные составляющие (в месте к. з., в генераторе и в нагрузке), потребляемая мощность, а также строятся 6 соответствующих векторных диаграмм.

Таким образом, разработанная в SMath Studio интерактивная модель трехфазной цепи с динамической нагрузкой подтвердила работоспособность иерархической модульной архитектуры вычислительного ядра с множественными модулями валидации и ветвления. Благодаря модульной структуре модель легко масштабируется: например, при расширении списка аварийных режимов до 15 пунктов данная модель позволит рассчитать до 45 комбинаций режимов работы и параметров цепи.

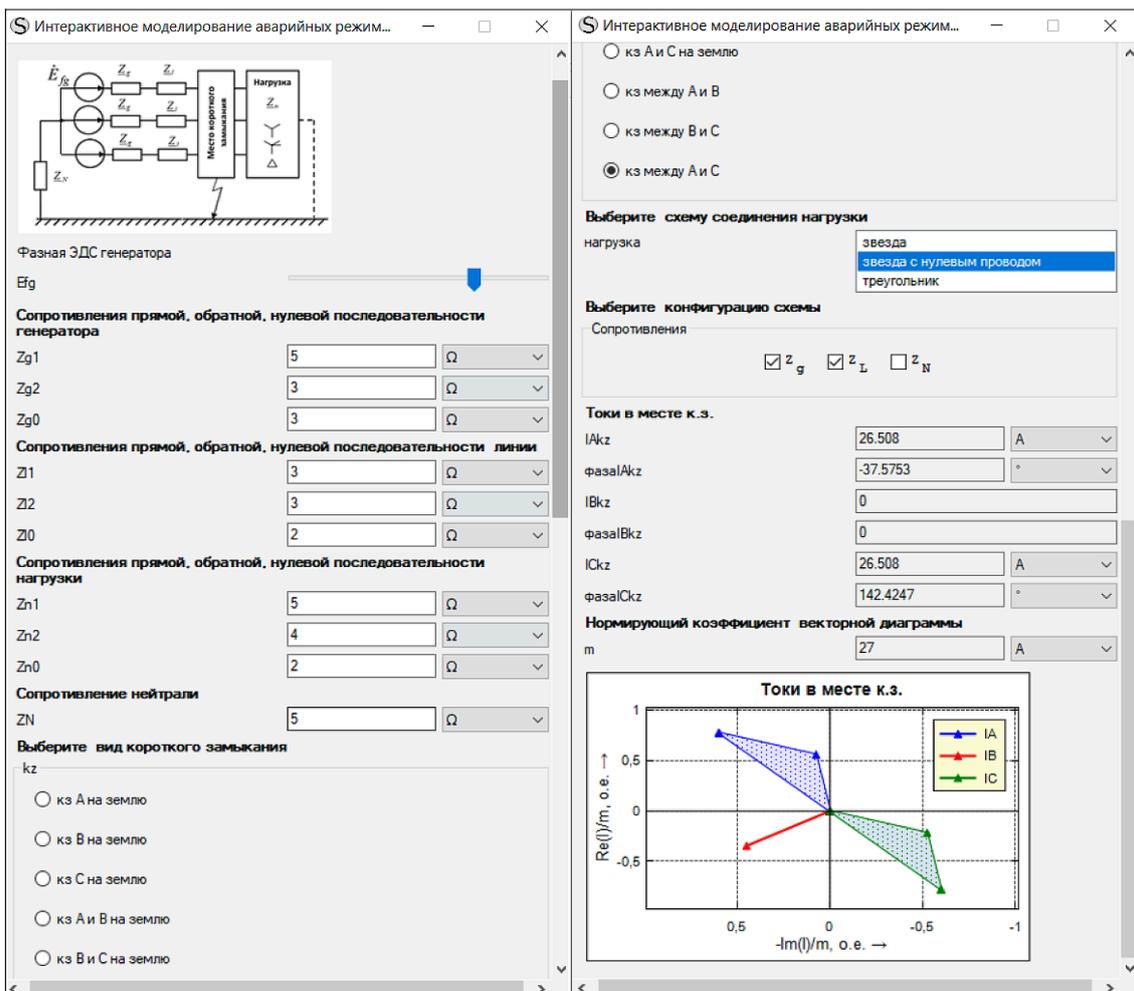


Рис. 3. Пример интерфейса интерактивного файла в формате executable files  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для подтверждения достоверности разработанной модели по каждому аварийному режиму были выполнены аналитические расчеты методом симметричных составляющих, а также проведено моделирование в среде Mathcad [17]. Для всех контрольных режимов расхождение значений токов и напряжений не превысило 0,1 % относительной погрешности, что свидетельствует о корректности предложенного разветвленного алгоритма, реализованного на основе модульной структуры вычислительного ядра.

### Выводы

1. В результате исследования установлено, что функционал российской системы компьютерной математики SMath Studio, расширенный за счет специализированных плагинов, позволяет разрабатывать интерактивные верифицируемые модели электротехнических устройств для исследования выходных характеристик объектов при многообразных комбинациях параметров, топологии схемы и режимов их работы.

2. Архитектуру вычислительного ядра интерактивных электротехнических моделей целесообразно проектировать на основе модульного подхода, предусматривающего модули валидации на каждом этапе расчета: от ввода данных до вывода результатов. Модульная конструкция ядра позволяет изменять набор модулей, модернизировать отдельные составляющие, повторно использовать разработанный код в аналогичных моделях, а также ускоряет процесс отладки.

3. На основании исследования функциональных возможностей SMath Studio и его плагинов систематизированы особенности плагинов визуализации (Slider Region, CheckBoxLayout Region, RadioButtonList Region, CheckBoxLayout Region, ViewerFiles Type, X-Y Plot Region), которые необходимо учитывать при проектировании интерактивного пользовательского интерфейса.

4. Разработаны обобщенные рекомендации по реализации модулей в программной среде SMath Studio: определены способы ввода исходных данных, обеспечивающие интерактивность модели при любом формате конечного файла; предложена методика построения динамически изменяющихся графиков в относительных единицах с автоматическим масштабированием; для недостающих вычислительных операций и единиц измерения рекомендовано введение пользовательских функций; даны указания по формированию интерфейса модели в SMath Viewer.

5. Обоснован выбор матричного метода решения систем линейных алгебраических уравнений как наиболее универсального и автоматизируемого для линейных задач электротехники. Показаны недостатки других решателей SMath Studio (ограниченность области поиска корней только действительными числами, необходимость ручного задания диапазонов и предварительных приближений). При решении СЛАУ целесообразно предусматривать переход к безразмерным величинам.

6. Экспериментальная апробация предложенного подхода на примере модели трехфазной цепи с динамической нагрузкой подтвердила его работоспособность и верифицируемость: расхождение результатов моделирования с аналитическими решениями не превысило 0,1 %.

7. Сформулированные рекомендации могут быть использованы при разработке интерактивных обучающих, исследовательских и инженерных программных продуктов в области электротехники.

### Список литературы

1. Горский А. В. О возможностях использования систем компьютерной математики в учебном процессе // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. 2017. № 3–1 (95). С. 90–99. EDN: ZIDMVF.
2. Ушакова Н. Ю., Быковская Л. В. Облачные WEB-приложения для организации лабораторных работ по электротехническим дисциплинам // Современные проблемы науки и образования. 2021. № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30927> (дата обращения: 16.01.2026). DOI: 10.17513/spno.30927.
3. Назарова И. Л. Сравнительный анализ систем компьютерной алгебры SMath Studio и Mathcad // Перспективы науки. 2023. № 6 (165). С. 26–29. EDN: ZEVAEP.
4. Пустынный С. В. Исследование работы индуктивно-импульсного генератора // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 3. С. 65–70. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=34927> (дата обращения: 16.01.2026). EDN: TNFDZJ.
5. Бобровских А. В., Урывская Т. Ю., Алимов А. П. Свободное программное обеспечение. Математические продукты // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9 (60). С. 7. EDN: LOKJDN.
6. Ананьин Н. С., Перелыгин С. В. Российские аналоги инженерного программного обеспечения // Инновационные научные исследования. 2022. № 3–2 (17). С. 84–89. DOI: 10.5281/zenodo.6613234. EDN: ZJYGKK.
7. Российский реестр программного обеспечения. [Электронный ресурс]. URL: <https://reestr.digital.gov.ru/> (дата обращения: 13.01.2026).
8. Очков В. Ф., Тихонов А. И., Леонова Д. С., Шубина М. А., Кулишов А. Р., Зайцев М. Д., Островский М. А., Лымарев Д. А. Математика и новые информационные технологии // Математическое образование. 2021. № 1 (97). С. 38–50. URL: <https://www.mathnet.ru/links/0f9110d62add2bc2e3ae14f07979b761/mo740.pdf> (дата обращения: 11.02.2026). EDN: BUGGCN.
9. Макова Н. Е. Решение уравнений средствами SMath Studio // Наука и образование. 2024. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/reshenie-uravneniy-sredstvami-smath-studio> (дата обращения: 16.01.2026). EDN: NVGVOE.

10. Уразбахтина А. Ю., Гвызин А. А. Разработка модулей систем автоматизированного проектирования с помощью программно-информационного комплекса SMATH Studio (Solver) // Наука Удмуртии. 2022. № 4 (99). С. 117–132. EDN: FPMQJA.
11. Tvrdá K. Computer Support in Statics // International Journal of Education and Information Technologies. 2021. Vol. 15. P. 353–363. DOI: 10.46300/9109.2021.15.37. EDN: VVWTAY.
12. Ушакова Н. Ю., Быковская Л. В. Расчет электрических цепей в SMATH Studio Оренбург: ОГУ, 2024. 110 с. ISBN 978-5-7410-3269-5.
13. Похилко С. П., Панченко Ю. Ю. Имитационное моделирование динамики скатывания плохого бегуна в программе SMATH Studio // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. 2016. № 42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-dinamiki-skatyvaniya-plohogo-beguna-v-programme-smath-studio> (дата обращения: 29.01.2026).
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669308 Российская Федерация. Программа для автоматизации расчетов режимов короткого замыкания в трехфазной линии с динамической нагрузкой: № 2022668873: заявл. 17.10.2022; опубл. 19.10.2022 / Н. Ю. Ушакова, Д. С. Домаев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет». EDN: TILXHI.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683609 Российская Федерация. Симулятор для исследования режимов работы трехфазных цепей со статической нагрузкой: заявл. 11.07.2025; опубл. 05.09.2025 / Н. Ю. Ушакова, Д. О. Кужамбетов, А. В. Смирнова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет». EDN: NBMJZI.
16. Кобзистый О. В. Развитие метода симметричных составляющих для расчета электрических сетей с неоднородной нагрузкой // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 5. С. 50–54. DOI: 10.17213/0136-3360-2018-5-50-54. EDN: YLFBAL.
17. Ушакова Н. Ю., Быковская Л. В. Трехфазные цепи Оренбург: ОГУ, 2015. 112 с. ISBN 978-5-7410-1214-7. EDN: XPFAGF.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.