

УДК 621.31.03

UDC 621.31.03

4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1 – Technologies, machines and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ SIMINTECH ИМИТИРУЮЩАЯ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В ЛИНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 0,4 КВ**

**SIMINTECH COMPUTER MODEL SIMULATING A SHORT CIRCUIT IN A 0.4 KV POWER SUPPLY LINE**

Баракин Николай Сергеевич  
к.т.н., доцент  
Scopus Author ID: 57200150182  
SPIN-код: 2129-5026

Barakin Nikolai Sergeevich  
Cand.Tech.Sci., docent  
Scopus Author ID: 557200150182  
RSCI SPIN-code: 2129-5026

Усков Антон Евгеньевич  
старший преподаватель  
[9184349285@mail.ru](mailto:9184349285@mail.ru)  
SPIN-код: 7461-9490

Uskov Anton Evgenievich  
senior lecturer  
[9184349285@mail.ru](mailto:9184349285@mail.ru)  
Spin-code 7461-9490

Гранкина Наталия Александровна  
к.т.н., доцент  
SPIN-код: 8782-5062

Grankina Natalia Alexandrovna  
Cand.Tech.Sci., docent  
SPIN-code: 2129-5026

Шаповалов Дмитрий Александрович  
студент  
*Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия*

Shapovalov Dmitry Alexandrovich  
Student  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Статья демонстрирует, что использование компьютерной модели в среде SimInTech для имитации короткого замыкания в сети 0.4 кВ представляет собой высокоэффективное практическое занятие. Оно позволяет преодолеть ограничения традиционных методов обучения, обеспечивая глубокое, наглядное, безопасное и мотивирующее изучение сложных переходных процессов в RL-цепях. Разработанная методика способствует формированию у студентов не только прочных теоретических знаний, но и практических навыков моделирования и анализа, необходимых современному инженеру-энергетику. Модель может быть легко адаптирована для изучения других видов переходных процессов в электроэнергетических системах. Материалы статьи будут полезны студентам бакалавриата и магистратуры направлений подготовки "Электроэнергетика и электротехника", "Электроснабжение", "Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем", "Агроинженерия" (электротехнологии)

The article demonstrates that using a computer model in a SimInTech environment to simulate a short circuit in a 0.4 kV network is a highly effective practical exercise. It allows you to overcome the limitations of traditional teaching methods, providing a deep, visual, safe and motivating study of complex transients in RL circuits. The developed methodology contributes to the formation of students not only solid theoretical knowledge, but also practical modeling and analysis skills necessary for a modern energy engineer. The model can be easily adapted to study other types of transients in electric power systems. The article's materials will be useful for undergraduate and graduate students in the fields of "Electric Power Engineering and Electrical Engineering," "Power Supply," "Relay Protection and Automation of Electric Power Systems," "Agroengineering" (electrical engineering)

Ключевые слова: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Keywords: COMPUTER MODELING, SHORT CIRCUIT, TRANSIENT PROCESSES, PRACTICAL TRAINING, ELECTRIC POWER ENGINEERING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-211-020>

<http://ej.kubagro.ru/2025/07/pdf/20.pdf>

**Введение.** Понимание переходных процессов, возникающих при коротких замыканиях (КЗ) в электрических сетях низкого напряжения (0.4 кВ), является фундаментальным для студентов электротехнических специальностей. Эти знания критически важны для проектирования, эксплуатации и защиты электроустановок. Однако изучение данных процессов традиционно сопряжено с трудностями. Проведение реальных испытаний режимов КЗ связано с высоким риском для оборудования и персонала, что делает их неподходящими для учебного процесса. Аналитический расчет переходных процессов в RL-цепях (основной компонент сетей 0.4 кВ) с использованием дифференциальных уравнений часто воспринимается студентами как оторванный от практики. Студентам трудно представить мгновенные изменения токов, напряжений, магнитных потоков и электродинамических сил во время короткого замыкания. Студенты, осваивая современный инструмент моделирования SimInTech, учатся строить и верифицировать модели, анализировать результаты сложных электромагнитных процессов, интерпретировать осциллограммы – навыки, востребованные в энергетике. Интерактивность и наглядность повышают интерес студентов к сложной теме.

**Цель исследований.** Разработать компьютерную модель SimInTech имитирующую короткое замыкание в линии электроснабжения 0,4 кВ для проведения практического занятия, направленного на глубокое, наглядное и безопасное изучение студентами переходных процессов в RL-цепи при возникновении короткого замыкания в распределительной сети 0.4 кВ.

**Материалы и методы исследований.** В сетях напряжением до 1 кВ основными видами повреждений являются короткие замыкания между фазами и отдельных фаз на землю. При коротком замыкании резко уменьшается сопротивление цепи. Возникающий при этом переходный процесс в реальной электрической сети, где к шинам трансформаторной подстанции подключена электрическая нагрузка  $Z_H$ , с учетом сопротивления линии  $Z_L$  исследуется при

составлении схемы замещения (рисунок 1). Полное сопротивление трансформатора для стороны 0,4 кВ :

$$z_T = 10^4 \frac{U_k \cdot U_{н.т.НН}^2}{S_{н.т.}}$$

где  $S_{н.т.}$  - номинальная мощность трансформатора;

$U_{н.т.НН}$  – номинальное напряжение обмотки НН (низкого напряжения понижающего трансформатора);

$U_k$  - напряжение короткого замыкания.

Активное сопротивление трансформатора для стороны 0,4 кВ :

$$r_T = 10^6 \frac{P_k \cdot U_{н.т.НН}^2}{S_{н.т.}^2}$$

где  $P_k$  - активная мощность потерь КЗ в трансформаторе

Индуктивное сопротивление трансформатора для стороны 0,4 кВ:

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}$$

Для упрощения расчетов, значения активных  $r_{ш}$  и индуктивных  $x_{ш}$  сопротивлений шин и шинопроводов, можно использовать из [3] с учетом их длин  $l$

$$r_{ш} = r_{удш} l ; x_{ш} = x_{удш} l$$

Значения сопротивлений кабеля выбирается из [3] :

$$r_k = r_{удк} l ; x_k = x_{удк} l$$

Для упрощения расчетов, сопротивления трансформаторов тока мы пренебрегаем ввиду почти незаметного влияния на токи КЗ. Ток трехфазного КЗ ( $I_{кз}$ ) в конце кабельной линии рассчитывается по известной формуле [3]:

$$I_{кз} = \frac{U_{ср.НН}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}$$

где  $r_{1\Sigma}$ ,  $x_{1\Sigma}$  - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм;

$U_{\text{ср.нн}}$  - среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание, В.

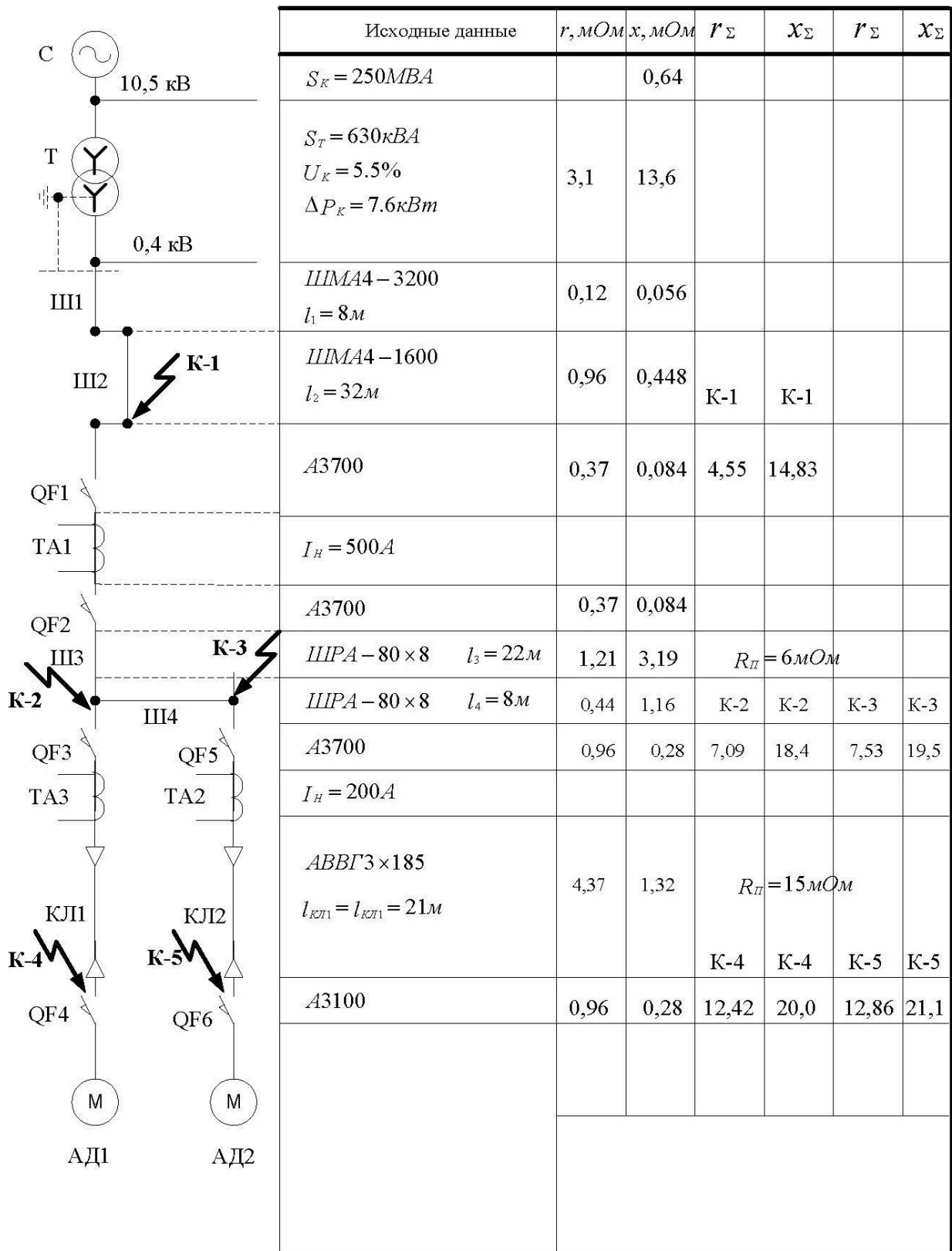


Рисунок 1 – Расчетная схема электрической сети 0,4 кВ [2].

Ток короткого замыкания от источника питания в точке К-1 (расчеты токов КЗ приведены из [2]):

$$I_{\text{кз(к1)}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{4,55^2 + 14,83^2}} = 14,91 \text{ кА}$$

Расчет междуфазного короткого замыкания в точке в К-2.

$$I_{\text{кз(к1)}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{7,09^2 + 18,4^2}} = 11,72 \text{ кА}$$

Среда динамического моделирования SimInTech выбрана как мощный инструмент для создания детализированных моделей электроэнергетических систем с возможностью: визуального блочного программирования (блок программирования PL) [1], моделирования непрерывных (электромагнитные процессы) и дискретных (логика защиты) процессов; реализации сложных математических моделей элементов (источники, линии, нагрузки, трансформаторы); гибкой параметризации модели; визуализации результатов в реальном времени с помощью мнемосхем, графиков, осциллографов; проведения экспериментов с разными начальными условиями и параметрами.

Как видно из схемы замещения (рисунок 1) линия электроснабжения представляет собой последовательно соединенные активные и индуктивные сопротивления формируя петлю. Таким образом возможно описать переходный процесс как в катушке индуктивности при подключении к источнику синусоидального напряжения.

Рассмотрим RL-цепь более детально для формирования теоретического описания практического занятия.

Составим согласно второму закону Кирхгофа дифференциальное уравнение цепи:

$$U_0 \cdot \sin(\omega t) = I \cdot R + L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Общее решение однородного уравнения:

$$R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} = 0$$

Решение этого уравнения:

$$I_{\text{одн}} = A \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t},$$

где  $A$  — постоянная интегрирования.

Для нахождения частного решения  $I_{\text{част}}(t)$  используем метод комплексных амплитуд. Представим напряжение в комплексной форме:

$$U(t) = U_0 \cdot e^{j\omega t}.$$

Тогда частное решение ищется в виде:

$$I_{\text{част}}(t) = I_0 \cdot e^{j\omega t},$$

где  $I_0$  — комплексная амплитуда тока.

Подставляем  $I_{\text{част}}(t)$  в дифференциальное уравнение:

$$U_0 \cdot e^{j\omega t} = R \cdot I_0 \cdot e^{j\omega t} + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot (I_0 \cdot e^{j\omega t}).$$

Производная:

$$\frac{d}{dt} \cdot (I_0 \cdot e^{j\omega t}) = j\omega I_0 \cdot e^{j\omega t}.$$

Подставляем:

$$U_0 \cdot e^{j\omega t} = R \cdot I_0 \cdot e^{j\omega t} + j\omega L \cdot I_0 \cdot e^{j\omega t}.$$

Сокращаем  $e^{j\omega t}$ :

$$U_0 = I_0 \cdot (R + j\omega L).$$

Отсюда комплексная амплитуда тока:

$$I_0 = \frac{U_0}{R + j\omega L}.$$

Модуль и фаза тока:

$$|I_0| = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \varphi = -\arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

Таким образом, частное решение:

$$I_{\text{част}}(t) = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Общее решение:

$$I(t) = I_{\text{одн}}(t) + I_{\text{част}}(t) = A \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} + \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Определим постоянную интегрирования А. Используем начальное условие: при  $t = 0$ , ток  $I(0) = 0$ . Подставляем  $t = 0$ :

$$0 = A + \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\varphi).$$

Отсюда:

$$A = -\frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\varphi).$$

Окончательное решение тока:

$$I(t) = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \left( \sin(\omega t + \varphi) - \sin(\varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \right). \quad (1)$$

**Результаты исследований.** На основании схемы замещения электрической сети разработана компьютерная модель, имитирующая короткое замыкание в линии электроснабжения 0,4 кВ в программном комплексе SimInTech.

Основные блоки для создания модели электрической схемы, расположенные в вкладке «ЭЦ-Динамика». В качестве ключа необходимо использовать «ключ переменного тока», для управления которого используется кнопка (вкладка «Ключи» - кнопка). В настройках «параметры расчета» достаточно указать время (максимальный и минимальный шаг) - 0.0001, метод интегрирования – метод Эйлера. Индуктивности в электрической сети пересчитываются согласно следующей формуле

$$L = \frac{X}{2\pi f}.$$

В разработанной компьютерной модели активные и индуктивные сопротивления шин проводов Ш1 и Ш2, а также Ш3 и Ш4 объединены.

При расчете использовались следующие параметры -  $L_T = 4.33 \cdot 10^{-5}$  Гн,  $R_T = 0.0031$  Ом,  $L_{ш1-2} = 1.6 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $R_{ш1-2} = 0.00108$  Ом,  $L_{ав1-2} = 5.3 \cdot 10^{-7}$  Гн,  $R_{ав1-2} = 0.00074$  Ом,  $L_{ш3-4} = 1.38 \cdot 10^{-5}$  Гн,  $R_{ш3-4} = 0.00165$  Ом,  $L_{ав5} = 8.9 \cdot 10^{-5}$  Гн,  $R_{ав5} = 0.00096$  Ом,  $L_{кл2} = 4 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $R_{кл2} = 0.0437$  Ом,  $R_H = 10$  Ом. Результатом расчета компьютерной модели имитирующей короткое замыкание в линии электроснабжения 0,4 кВ являются временные графики токов короткого замыкания (рисунок 3, 4). При включении ключа К1 (рисунок 2) имитируется режим короткого замыкания в точке К1 (рисунок 1) при этом ток короткого замыкания составляет 14,75 кА.

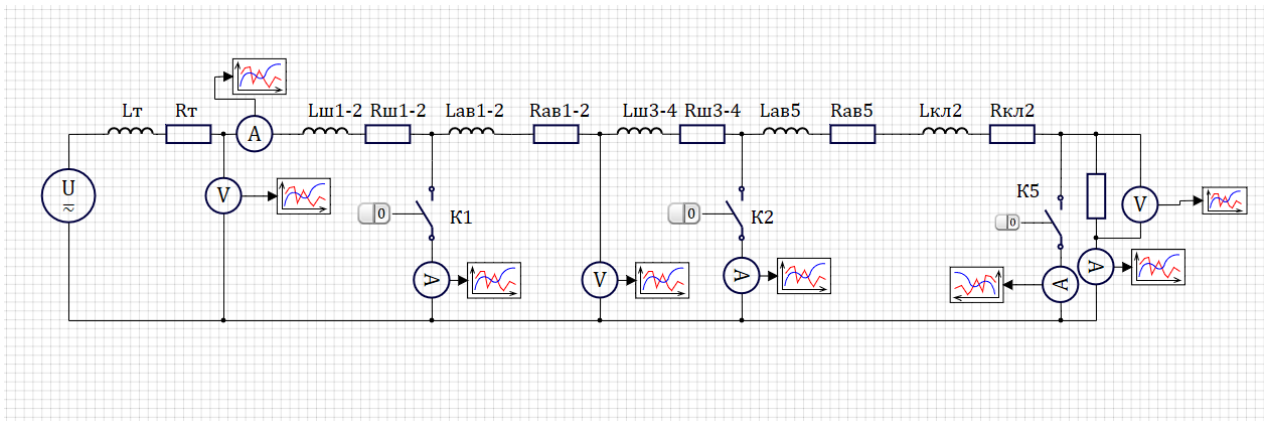


Рисунок 3 – Компьютерная модель, имитирующая короткое замыкание в линии электроснабжения 0,4 кВ.

Переходный процесс описывается формулой 1, тогда для схемы замещения с расчетными параметрами функция тока короткого замыкания в точке К1 определяется как:

$$I(t) = 15089 \cdot \left( \sin(314t + \varphi) - \sin(\varphi) \cdot e^{-\frac{0.00418}{0.0000469} t} \right).$$

На переходный процесс существенно влияет момент включения ключа К1, при разном моменте включения К1 наблюдается разная амплитуда тока (формируются разные начальные условия, амплитуда пускового тока может быть равна 14,75 кА, так и превышать его до величины 20,15 кА). Студентам необходимо указать, что на величину амплитуды пусково-



го тока влияет также соотношение активного и индуктивного сопротивления линии электроснабжения.

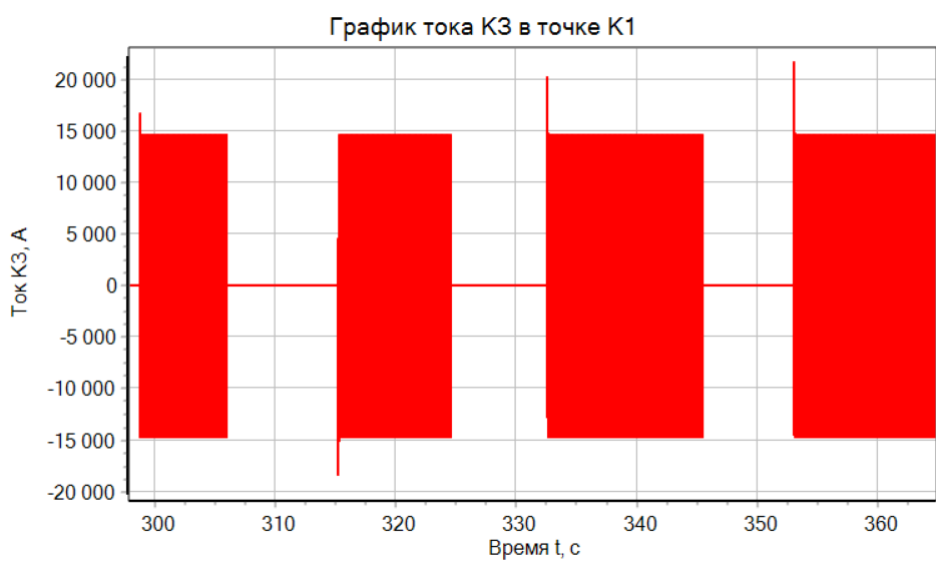


Рисунок 3 – График функции тока КЗ в точке К-1 в разный момент включения ключа К1.

При включении К2 и К5 формируется режим короткого замыкания в точках К2 и К5 соответственно. Результаты показывают, что чем ближе к трансформатору происходит короткое замыкание тем выше величина тока короткого замыкания.

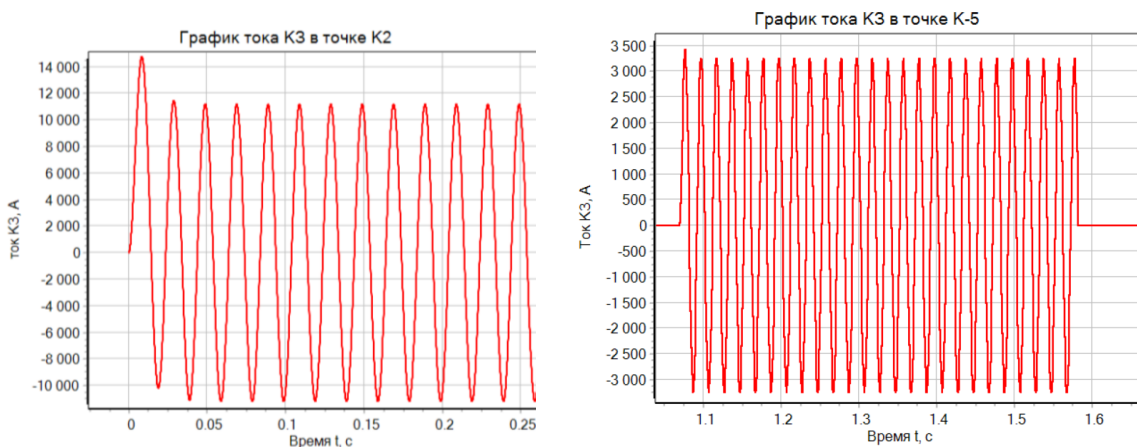


Рисунок 4 – График функции тока КЗ в точке К-2 и К-5.

**Выводы.** Разработанная компьютерная модель, имитирующая короткое замыкание в линии электроснабжения 0,4 кВ позволяет осуществить визуализацию мгновенных значений токов и напряжений в реальном времени моделирования на графиках и мнемосхемах с исключением рисков, связанных с высокими токами КЗ и напряжениями. Так в точке К1 (рисунок 1) ток короткого замыкания составляет 14,75 кА (расчетное значение 14,91 кА). Расхождение результатов составляет 1 % и связано с погрешностью вычислений. Возможно "увидеть" физическую суть процесса, влияние каждого параметра (R, L, момент включения) на ход переходного процесса, а легкость изменения параметров модели позволяет оперативно рассчитать несколько точек КЗ. Модель строится на основе реальных параметров сетей 0.4 кВ (трансформаторы, кабели), что демонстрирует студентам прямую применимость теории RL-цепей к реальным инженерным задачам проектирования и эксплуатации.

### Библиографический список

1. Баракин, Н. С. Имитационное моделирование цепи переменного тока / Н. С. Баракин, А. А. Кумейко, А. М. Караджиян // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 208. – С. 357-364.
2. Баженов В.Н. Релейная защита элементов электрической сети с напряжениями 110...0,4 кВ: пособие для практических расчетов / В.Н. Баженов. – Харьков: Планета-Принт, 2017. – 96 с. : ил.
3. ГОСТ 28249-93 – Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. ПРИНЯТ Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации 21 октября 1993 г. Дата введения 1995-01-01.

### References

1. Barakin, N. S. Imitacionnoe modelirovanie cepi peremennogo toka / N. S. Barakin, A. A. Kumejko, A. M. Karadzhijan // Politematiceskij setevoj jelektronnyj nauch-nyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. – № 208. – S. 357-364.
2. Bazhenov V.N. Relejnaja zashhita jelementov jelektricheskoy seti s naprjazhenijami 110...0,4 kV: posobie dlja prakticheskikh raschetov / V.N. Bazhenov. – Har'kov: Planeta-Print, 2017. – 96 s. : il.
3. GOST 28249-93 – Korotkie замыкания в jelektroustanovkah. Metody rascheta v jelektroustanovkah peremennogo toka naprjazheniem do 1 kV. PRINJaT Mezhgosudar-

stvennym Sovetom po standartizacii, metrologii i sertifikacii 21 oktjabrja 1993 g. Data vvedenija 1995-01-01.