

Моделирование и анализ токов короткого замыкания системы тягового электроснабжения 1×25 кВ в программе SimInTech на различных ступенях регулирования напряжения устройства РПН

И.А. Худоногов, А.А. Галков✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉galkov16@gmail.com

Резюме

Расчеты токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения выполняют для правильного подбора характеристик оборудования как контактной сети, так и тяговых подстанций. Такие расчеты также необходимы для правильного выбора и настройки устройств релейной защиты. Поэтому моделирование режима короткого замыкания актуально. Короткое замыкание – аварийный режим, представляющий опасность для оборудования, и неправильный подбор характеристик влечет моментальный выход из строя устройств при первом же коротком замыкании. Важно выполнять расчет режима короткого замыкания наиболее точно, учитывая множество факторов и аппаратов, которые могут повлиять на протекающие токи. Одним из таких аппаратов является устройство регулирования напряжения под нагрузкой, позволяющее регулировать напряжение на обмотке низшего напряжения тягового трансформатора без вывода его из работы. Для моделирования режима короткого замыкания с учетом возможного изменяемого напряжения была выбрана среда динамического моделирования SimInTech. Данная программа помогает создавать комбинированные модели, учитывающие большое количество факторов, в том числе переходные процессы, которые могут возникать при коротких замыканиях. В результате проведенного моделирования получены осциллограммы токов в точке короткого замыкания на вводах высшего напряжения тягового трансформатора, фидерах контактной сети и непосредственно в точке короткого замыкания. В статье дается оценка программы как среды для моделирования систем тягового электроснабжения, анализируется влияние регулирования напряжения под нагрузкой на токи короткого замыкания и действие токов короткого замыкания на устройства регулирования напряжения под нагрузкой.

Ключевые слова

система тягового электроснабжения, моделирование, устройство регулирования под напряжением, короткое замыкание, тяговый трансформатор, контактная сеть

Для цитирования

Худоногов И.А. Моделирование и анализ токов короткого замыкания системы тягового электроснабжения 1×25 кВ в программе SimInTech на различных ступенях регулирования напряжения устройства РПН / И.А. Худоногов, А.А. Галков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 123–132. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).123-132.

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 10.04.2024 г.; принята к публикации: 12.04.2024 г.

Modeling and analysis of short-circuit currents of a 1×25 kV traction power supply system in the SimInTech program at various stages of voltage regulation of the OLTC device

I.A. Khudonogov, A.A. Galkov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉galkov16@gmail.com

Abstract

Calculations of short-circuit currents in traction power supply systems are performed for the correct selection of equipment characteristics of both the contact network and traction substations. In addition, such calculations are necessary for the correct selection and configuration of relay protection devices. Therefore, modeling the short circuit mode is relevant. Short circuit is an emergency mode that is dangerous for the equipment, and incorrect selection of characteristics entails instant failure of the equipment at the first short circuit. It is important to calculate the short circuit mode most accurately, taking into account the many factors and devices that can affect the flowing currents. One of these devices is a voltage regulation device under load, which allows to adjust the voltage on the lowest voltage winding of a traction transformer without disabling it. The SimInTech dynamic simulation environment was chosen to simulate the short circuit mode, taking into account the possible variable voltage. This program allows to create combined models that take into account many factors, including transients, which in particular occur during short circuits. As a result of the simulation, oscillograms of

currents at the short-circuit point, at the inputs of the high voltage of the traction transformer, on the feeders of the contact network and directly at the short-circuit point were obtained. The article evaluates the program as an environment for modeling traction power supply systems, analyses the effect of voltage regulation under load on short-circuit currents and the effect of short-circuit currents on the reliability of a voltage regulation device under load.

Keywords

traction power supply system, modeling, voltage regulation device, short-circuit, traction transformer, contact network

For citation

Khudonogov I.A., Galkov A.A. Modelirovanie i analiz tokov korotkogo замыкания системы тягового электроснабжения 1×25 kV v programme SimInTech na razlichnykh stupenyakh regulirovaniya napryazheniya ustroystva RPN [Modeling and analysis of short-circuit currents of a 1×25 kV traction power supply system in the SimInTech program at various stages of voltage regulation of the OLTC device]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 123–132. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).123-132.

Article Info

Received: April 3, 2024; Revised: April 10, 2024; Accepted: April 12, 2024.

Введение

Расчеты токов короткого замыкания (КЗ) необходимы для определения параметров оборудования как контактной сети, так и тяговых подстанций. При этом необходимо учитывать множество факторов, включая характеристики контактной сети, тип и мощность тяговых трансформаторов, схему подключения и параметры релейной защиты, наличие устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Одним из факторов, существенно влияющим на величину токов короткого замыкания, является присутствие в системе тягового электроснабжения устройства РПН, предназначенного для регулирования напряжения на обмотке высокого напряжения тягового трансформатора без вывода его из работы. При регулировании напряжения переключением ответвление обмоток трансформаторов изменяют их коэффициент трансформации.

Для моделирования режима КЗ с учетом возможного изменения напряжения, обусловленного работой РПН, была выбрана среда динамического моделирования SimInTech. Эта программа позволяет создавать комбинированные модели, учитывающие множество факторов, в том числе переходные процессы, возникающие при КЗ. В результате моделирования были получены выводы, анализ которых позволил оценить влияние РПН на токи КЗ. Было установлено, что при работе РПН токи КЗ могут существенно изменяться в зависимости от положения переключателя РПН.

В рамках исследования была оценена надежность РПН при возникновении КЗ. Проведенное моделирование режима КЗ с учетом устройства РПН позволило получить значимые

результаты и сделать заключения о том, что РПН существенно влияет на токи КЗ и его необходимо учитывать при проектировании систем тягового электроснабжения. Программное обеспечение SimInTech является эффективным инструментом для моделирования систем тяги электроснабжения, в частности – для проведения расчетов токов КЗ.

Также стоит отметить, что токи КЗ влияют на надежность РПН, поэтому немаловажным аспектом исследования является разработка мероприятий по увеличению устойчивости к аварийным режимам данного устройства.

Целью статьи является рассмотрение путей повышения надежности технической эксплуатации силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций с устройствами РПН в среде динамического моделирования технических систем SimInTech.

Режим короткого замыкания

КЗ в контактной сети – это аварийный режим работы, при котором величина тока многократно превышает его номинальный размер, из-за чего происходит значительное падение напряжения. Причиной возникновения является непосредственное соединение контактной сети (фаза А или В) с рельсовой цепью, подключенной к отсасывающему проводу (фаза С).

Примерами возникновения такого режима могут являться обрывы проводов или тросов контактных подвесок из-за их износа, набросы проволоки на контактный провод, нарушение изоляции контактной сети и даже неисправности на подвижном составе.

КЗ бывают устойчивые и неустойчивые. Также при КЗ возможно появление дуги, что

приводит к дуговому пробою [1, 2].

Любое КЗ приводит к отжигу проводов, повреждениям электрооборудования, поэтому анализ данного режима актуален для дальнейшего изучения способов выявления местонахождения КЗ выбора характеристик аппаратов и проводников проектирования и настройки устройств релейной защиты и комплексного изучения работы системы электроснабжения.

Особо опасны для электроустановок и их узлов ударные нагрузки и возникающий вследствие этого ударный ток. Устройство РПН не является исключением, в процессе работы устройства в нормальном и особенно в аварийном режимах токи протекают через контактор и избиратель, что приводит к нагарам и локальным нагревам этих узлов. В результате протекания больших значений тока происходит нагрев изоляции, что влечет за собой ухудшение ее диэлектрических свойств. Поэтому необходимо исключить возможность переключения устройства при протекании тока большой величины, так как возникающие дуговые явления влекут за собой дополнительный износ контактов [3, 4].

Под ударным током КЗ I_y понимают наибольшее мгновенное значение полного тока КЗ в фазе через 0,01 с после возникновения КЗ:

$$i_y = i_{k(0,01)} = \pm I_{nm} \cos \omega t_{0,01} \pm I_{nm} e^{-0,01/T_a}. \quad (1)$$

Из формулы (1) получим:

$$i_y = I_{nm} + I_{nm} e^{-0,01/T_a} = I_{nm} \cdot K_y,$$

где

$$K_y = 1 + e^{-0,01/T_a},$$

является ударным коэффициентом. Он показывает во сколько раз ударный ток КЗ больше начальной амплитуды периодической слагающей тока КЗ.

Если принять $T_a = 0,05$ с, то $K_y = 1,8$. Рассматривая возможные пределы изменения K_y для электрических цепей с активно-индуктивным характером, получим:

– если $L_k = 0$, то $T_a = 0$, отсюда следует, что $K_y = 1 + e^{-\infty} = 1$;

– если $r_k = 0$, то $T_a = \infty$, отсюда следует, что $K_y = 1 + e^{-0,01/\infty} = 2$.

Таким образом, получаем, что величина ударного коэффициента может находиться в пределах 1–2.

Под действующим значением полного тока КЗ понимают среднеквадратичный ток КЗ

за период, в центре которого расположен рассматриваемый момент времени. Значение этого тока определяют по выражению:

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_{kt}^2 dt}. \quad (2)$$

Если в формуле (2) значение i_{kt} выразить через составляющие i_{akt} , i_{nkt} и произвести преобразования, то получим следующее:

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}, \quad (3)$$

где I_{nt} – действующее значение периодической слагающей тока КЗ; I_{at} – действующее значение аperiodической слагающей тока КЗ в момент времени t .

При этом мы можем записать:

$$I_{nt} = I_{nm}/2; I_{at} = i_{at}.$$

Практический интерес представляет действующее значение тока КЗ в течение первого периода КЗ, а именно в том периоде времени, где расположен ударный ток КЗ. В таком случае действующее значение тока КЗ принято обозначать I_y .

Согласно формуле (3) можно записать следующее:

$$I_t = \sqrt{I_n^2 + I_{a(0,01)}^2},$$

где $I_{a(0,01)} = I_n$ (так как цепь с КЗ подключена к источнику неограниченной мощности);

$$I_{a(0,01)} = -I_{nm} \cdot e^{-0,01/T_a} = \sqrt{2} I_n \cdot e^{-0,01/T_a}.$$

Тогда

$$I_y = I_n \sqrt{1 + \frac{2}{(K_y - 1)^2}}. \quad (4)$$

Зная, что K_y может изменяться от 1 до 2, получаем, что I_y по формуле (4) может находиться в пределах:

$$I_n \leq I_y \leq \sqrt{3} I_n.$$

Как мы видим из формул, действующее значение ударного тока КЗ может находиться в определенном диапазоне, а если добавить к этому переключаемые уровни напряжения (благодаря РПН), то разброс величины ударного тока становится очень большим.

Среда динамического моделирования SimInTech

Расчет режима КЗ в системе тягового электроснабжения позволяет выполнить программный комплекс «КОРТЭС», однако режим характеризуется переходными процессами, которые невозможно визуализировать в данном

программном комплексе. Поэтому для моделирования режима КЗ было решено выбрать среду динамического моделирования SimInTech.

SimInTech (сокр. от Simulation In Technic) является разработкой ООО «ЗВ Сервис». Это универсальная среда, позволяющая разрабатывать математические модели, различные алгоритмы управления и исследовать динамические процессы. Данная среда помогает производить моделирование в разных отраслях (в том числе в электроэнергетике) и даже комбинировать их при необходимости.

Проектирование в данной среде происходит в виде логико-динамических систем, которые описываются входными и выходными соотношениями как системы дифференциальных уравнений или дифференциально-алгебраические уравнения. Для расчета электрических процессов в программе существуют две библиотеки: ЭЦ-Динамика и ЭЦ-Статика.

ЭЦ-Статика при моделировании производит расчеты в виде комплексных чисел действующих значений токов и напряжений. Синусоидальные сигналы заменяются постоянными, значение которых равно $\sqrt{2}/2$ от амплитудного значения синусоиды.

Данная библиотека применяется для установившихся режимов больших энергетических систем, или переходных процессов, дли-

тельность которых значительно больше частоты сети.

ЭЦ-Динамика производит расчеты мгновенных значений токов и напряжений в виде систем дифференциальных уравнений. Данную библиотеку целесообразно применять для исследования переходных процессов, длительность которых меньше частоты сети. Именно эта библиотека применима для моделирования КЗ с шагом интегрирования не более 0,001 с для достаточной точности расчетов.

Была построена модель системы тягового электроснабжения 1×25 кВ, которая позволяет менять различные характеристики: тяговых трансформаторов (ТТ), напряжения линий электрических передач, длины межподстанционной зоны (МПЗ) и задавать ступени регулирования РПН ТТ. Замыкание в модели происходит между контактной сетью и рельсами на различном удалении от подстанций. Фрагмент модели представлен на рис. 1.

Моделирование устройства регулирования напряжения под нагрузкой

В работе рассмотрен режим КЗ на различных положениях переключателя РПН. Для этого в программу были добавлены два регулятора, имитирующие ступени регулировки устройства РПН. Регуляторы расположены в верхней части

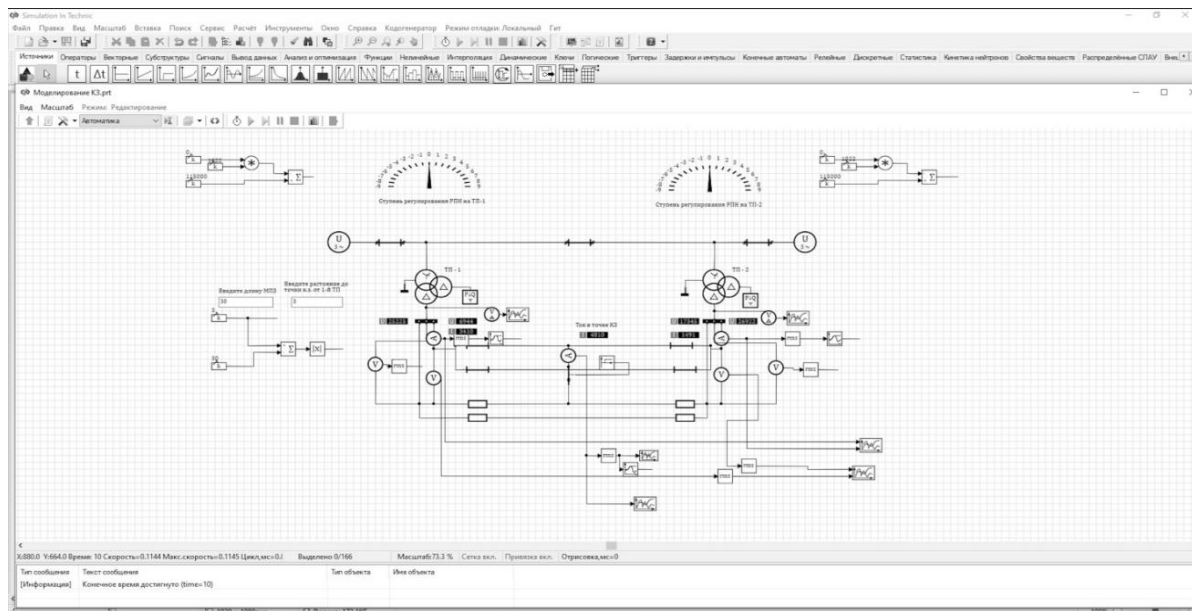


Рис. 1. Рабочее окно программы SimInTech и модель короткого замыкания системы тягового электроснабжения
Fig. 1. The working window of the SimInTech program and the short circuit model of the traction power supply system

рабочего пространства модели (рис. 1).

Каждый регулятор математически связан с моделью тягового трансформатора, а именно при изменении ступени регулятора меняется коэффициент трансформации ТТ. Таким образом нулевая ступень регулятора соответствует номинальному значению напряжения ТТ [5, 6].

В тяговых трансформаторах марки ТДТНЖ устройство РПН установлено на обмотке высшего напряжения. Таким образом, при переключении на более высокую ступень происходит изменения числа витков обмотки высокого напряжения.

Данная модель хорошо демонстрирует высокую интерактивность программы SimInTech. Например, позволяет задавать параметры устройствам за счет регуляторов, которые находятся непосредственно на рабочем пространстве модели. При необходимости модель можно значительно усовершенствовать, добавив возникновение дуговых процессов, установить посты секционирования, пункты параллельного соединения и т.д. [7–14].

Расчеты

Длину МПЗ примем равной 30 км. Точки КЗ будем моделировать с шагом 2 км. Результаты расчетов занесем в таблицу по которой построим графики зависимости тока КЗ от местоположения точки КЗ вдоль контактной сети. Программа позволяет сделать осциллограммы

токов и напряжений, тем самым помогая увидеть протекающие переходные процессы в необходимых нам точках (рис. 2). В нашем случае это фидеры подстанций, шины на стороне обмотке высокого напряжения ТТ (где установлен РПН), шины низшего напряжения и непосредственно место КЗ [15, 16].

Отчетливо виден ударный ток, имеющий максимальную амплитуду и постоянную составляющую, затухающую во времени. Также снята осциллограмма действующего тока в точке КЗ (рис. 2, б).

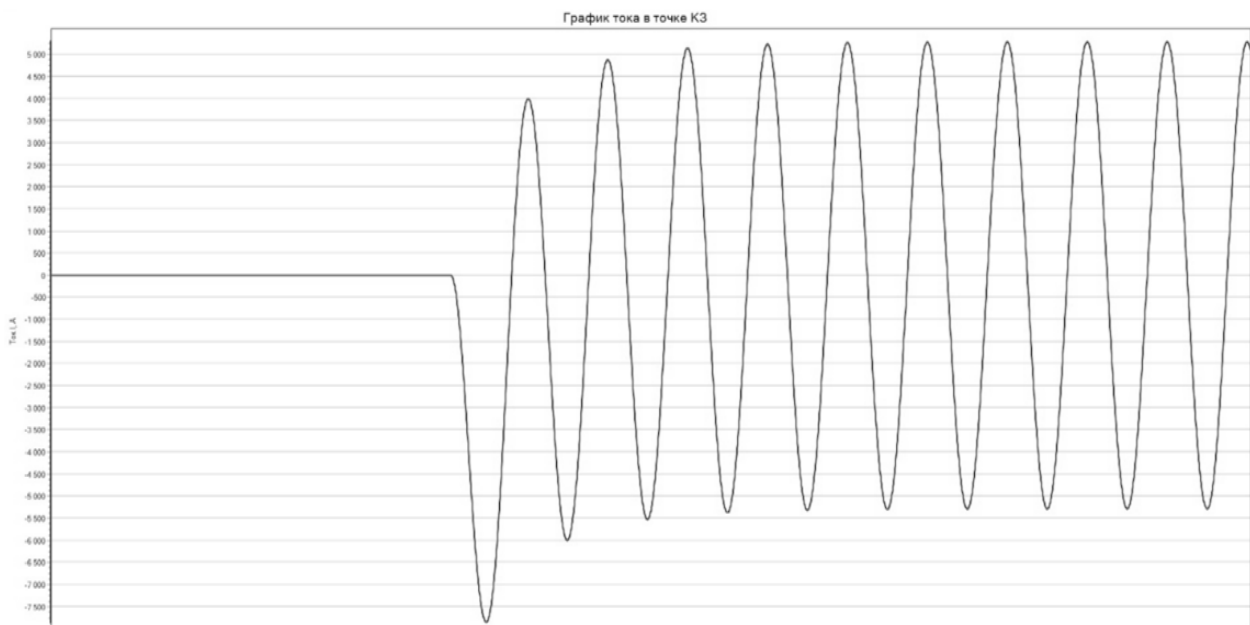
Осциллограммы изменения фазных напряжений на обмотке низшего напряжения в момент КЗ приведены на рис. 3.

Стоит отметить что обмотка 27,5 кВ ТТ собрана по схеме треугольника, из этого следует, что фазные напряжения равны линейным.

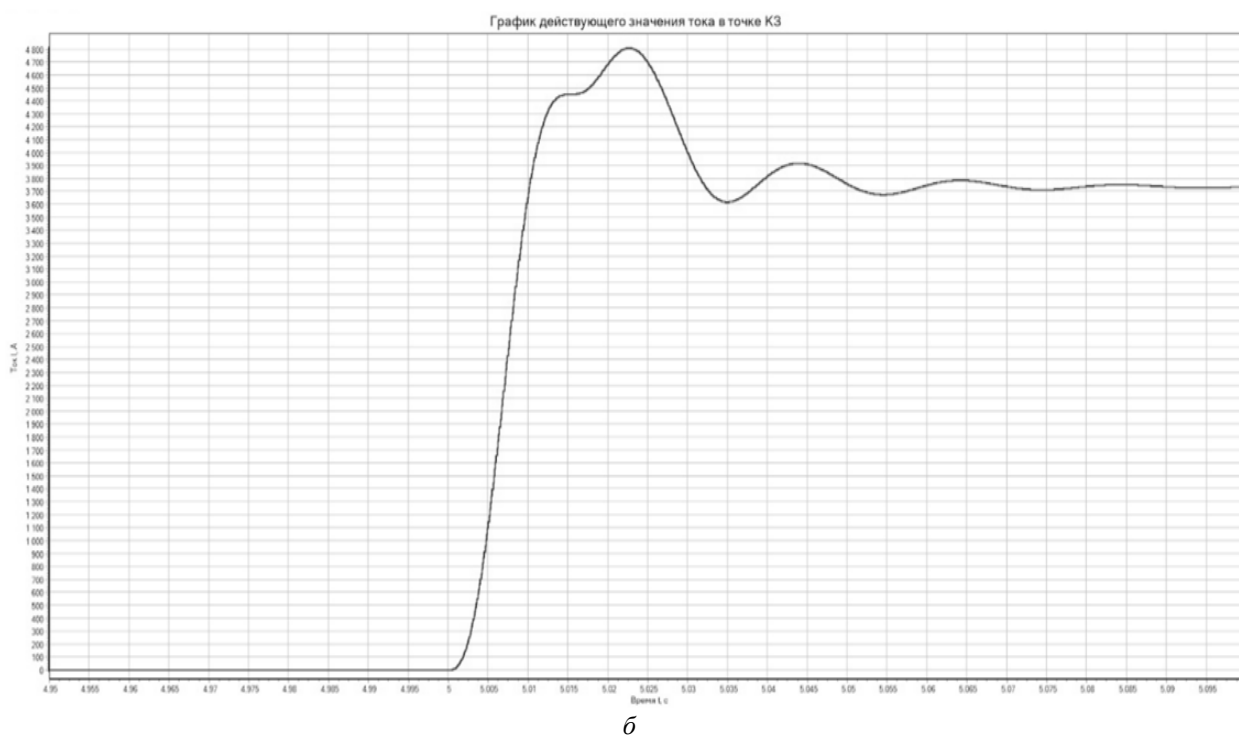
Осциллограмма токов на шинах со стороны обмотки высокого напряжения приведена на рис. 4.

Результаты расчетов

Для наглядности представления величин протекающих токов в системе тягового электроснабжения при различном удалении от места установки трансформатора до точки КЗ, с учетом разных ступеней регулирования РПН, сведем их в табл., по которой построим график (рис. 5).



a



б

Рис. 2. Осциллограммы мгновенного (а) и действующего (б) значений тока в момент короткого замыкания
Fig. 2. Waveforms of the instantaneous (a) and current (b) values at the moment of a short circuit

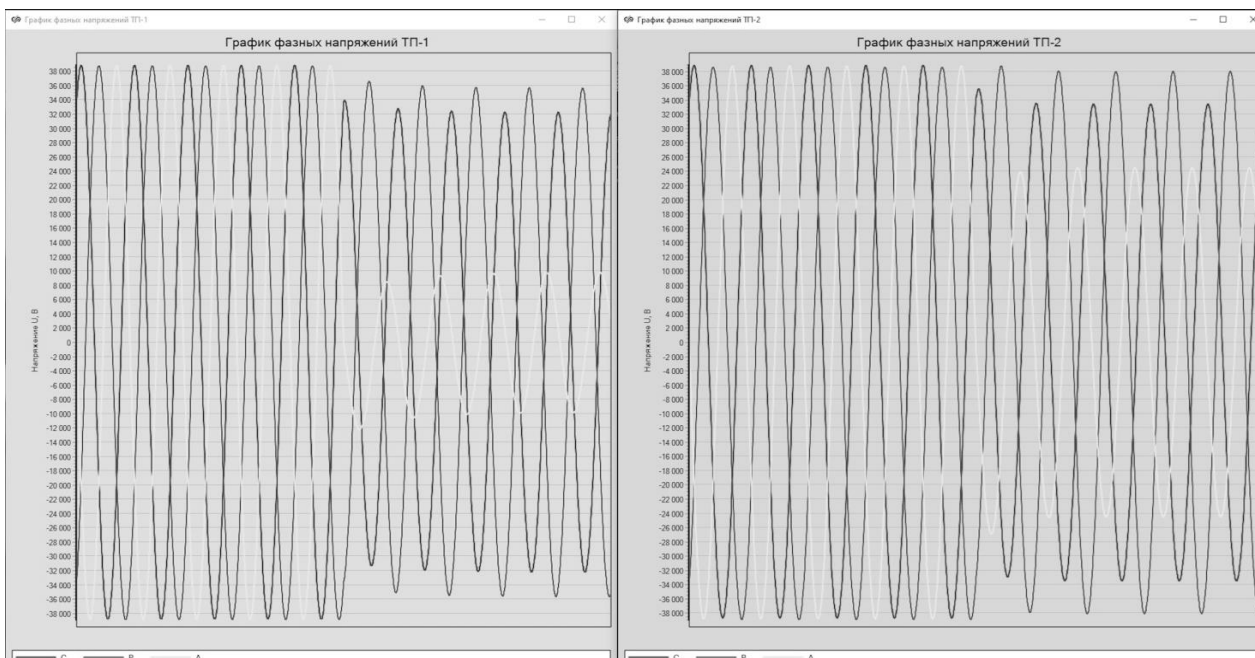


Рис. 3. Графики изменения фазных напряжений в момент короткого замыкания на обмотке 27,5 кВ тягового трансформатора
Fig. 3. Graphs of phase voltage changes at the time of short circuit on the 27,5 kV winding of the traction transformer

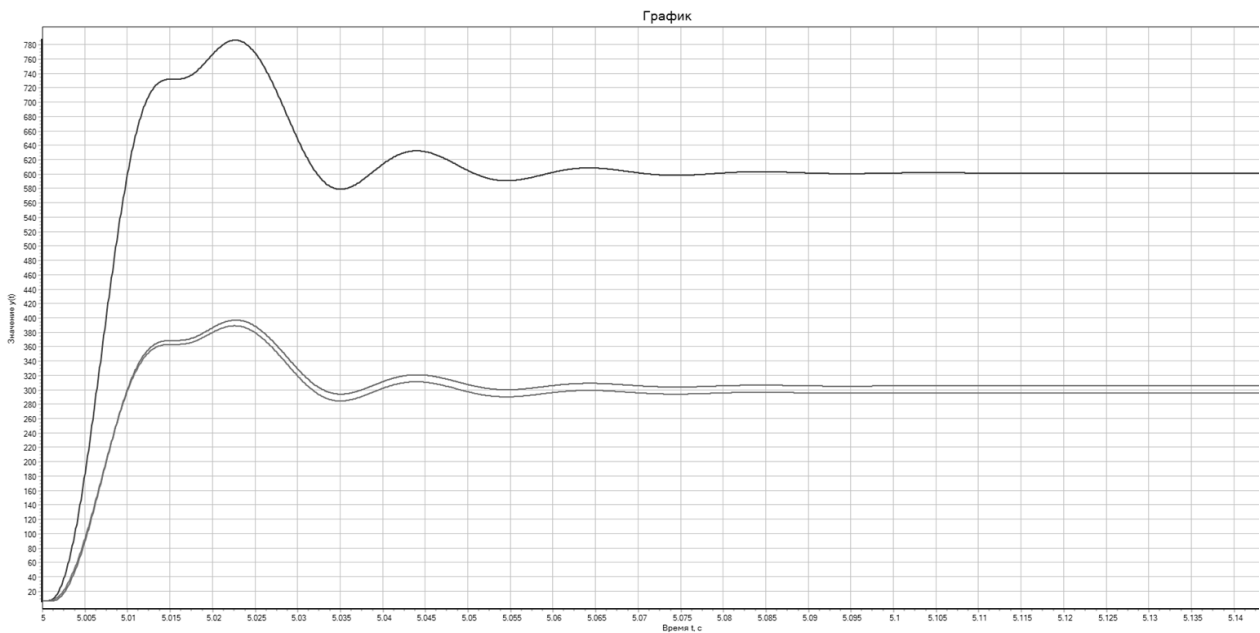


Рис. 4. Осциллограмма токов в момент короткого замыкания на вводах тягового трансформатора
Fig. 4. Oscillogram of currents at the moment of short circuit at the inputs of the traction transformer

Зависимость тока короткого замыкания от расстояния между ТП-1 и местом короткого замыкания
 Dependence of the short-circuit current on the distance between the traction substation-1 and the short-circuit location

Степень регулировки напряжения под нагрузкой	Расстояние от ТП-1 до точки короткого замыкания, км														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
0	5 744	4 806	4 241	3 873	3 629	3 473	3 385	3 357	3 385	3 473	3 629	3 873	4 241	4 806	5 750
4	5 931	4 971	4 391	4 012	3 761	3 600	3 510	3 482	3 510	3 605	3 761	4 012	4 391	4 971	5 931
9	6 115	5 135	4 541	4 152	3 893	3 727	3 635	3 605	3 635	3 727	3 893	4 152	4 541	5 132	6 115
-4	5 567	4 651	4 100	3 742	3 505	3 354	3 269	3 242	3 269	3 354	3 505	3 742	4 112	4 651	5 567
-9	5 409	4 512	3 971	3 619	3 389	3 242	3 160	3 133	3 160	3 242	3 389	3 619	3 967	4 512	5 412

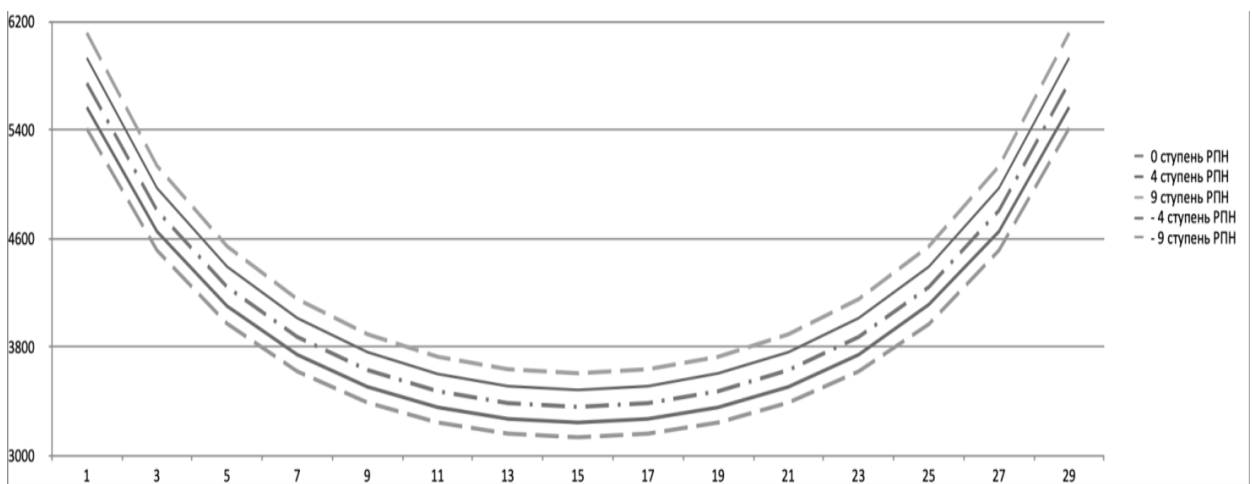


Рис. 5. Зависимость величины тока от расстояния между точкой короткого замыкания и ТП-1
Fig. 5. The dependence of the short-circuit current on the distance between the TS-1 and the short-circuit location

При увеличении напряжения растет ток КЗ вдоль всей линии контактной сети. Разница между токами КЗ при наибольшей и наименьшей ступенями регулировки составляет порядка 900 А рядом с тяговыми подстанциями и 500 А в середине МПЗ.

Также провели моделирование КЗ при разных уровнях напряжения на тяговых подстанциях. Для этого на ТП-1 задали нулевую ступень регулирования, а на ТП-2 повысили сначала на четвертую, а затем на девятую.

Заключение

Подводя итог, перечислим основные преимущества программы:

1. SimInTech позволяет моделировать систему тягового электроснабжения и производить расчет токов КЗ с помощью системы дифференциальных уравнений.

2. Полученные расчеты (осциллограммы) при моделировании переходного процесса подтверждают сходимость результатов с классическими закономерностями теории электрических сетей.

3. Пользователь программы может производить гибкую настройку модели, менять характеристики элементов, снимать осциллограммы на различных узлах, визуализировав расчет или вносить изменения непосредственно во время моделирования, тем самым создавая динамические модели.

4. Можно создавать комбинированные системы автоматики в системах электроснабжения, при необходимости добавлять новые элементы управления.

5. Моделирование в SimInTech применимо для сетей как тягового и нетягового, так и внешнего электроснабжения.

Таким образом, SimInTech способна дополнить и значительно расширить функционал в сравнении с уже известными программными комплексами для расчетов систем тягового электроснабжения, например, такими как «КОРТЭС». Ее возможности позволяют комплексно проводить исследования систем электроснабжения (подстанции, контактная сеть, системы автоматики, подвижной состав) [17, 18].

По результатам моделирования также можно сделать вывод, что при возникновении КЗ на стороне обмотки 27,5 кВ не оказывается значительного негативного влияния на РПН, которое установлено в нейтраль обмотки высокого напряжения тягового трансформатора. Как мы видим из осциллограмм на шинах высокого напряжения, токи, возникающие при КЗ, не превышают 1 000 А даже при условии расположения КЗ в непосредственной близости от ТП, что является допустимыми значениями для РПН. Таким образом, КЗ возникающее на стороне низшего напряжения тягового трансформатора не оказывает значительного влияния на ресурс надежности устройства.

Однако от выбранной ступени регулирования РПН зависят токи КЗ в контактной сети. В результате моделирования мы выяснили, что разность между max и min значением может доходить до 1 000 А.

Список литературы

1. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. М. : МЭИ, 2006. 319 с.
2. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 250 от 23.06.2022. Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
3. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения / сост. Ю.И. Жарков, Е.П. Фигурнов, Т.Е. Петрова. М. : Трансиздат, 2005. 216 с.
4. Герман Л.А., Герман В.Л. Диагностика аварийных ситуаций контактной сети переменного тока железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. 2008. № 3. С. 41–47.
5. Герман Л.А. Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М. : МГУПС, 2014. 173 с.
6. Совершенствовать регулирование напряжения на тяговых подстанциях / Л.А. Герман, Д.А. Куров, С.О. Фельдман и др. // Локомотив. 2012. № 5 (665). С. 45–46.
7. Интеллектуальные терминалы для автоматизации электроснабжения / Л.А. Герман, А.В. Саморуков, Д.В. Ишкин и др. // Локомотив. 2013. № 12 (684). С. 39–40.
8. Худоногов И.А., Галков А.А. Современные подходы к оценке состояния устройств регулирования напряжения под нагрузкой силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций // Образование – Наука – Производство : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита, 2023. Т. 1. С. 316–323.
9. Коноплев Н.Е. Управление устройством РПН трансформатора с помощью алгоритмов нечеткой логики // Наука и молодежь : материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Барнаул,

2023. Т. 1. Ч. 1. С. 342–344.

10. Турсунов Д.А., Исмоилов И.К. Анализ вопросов применения устройств регулирования силовых трансформаторов // *Universum: технические науки*. 2020. № 8-3 (77). С. 68–75.

11. Герман Л.А., Кишкурно К.В. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог // *Электричество*. 2014. № 9. С. 23–33.

12. Каландаров Х.У., Михеев Г.М., Ефремов Л.Г. Применение переключающих устройств в электроэнергетике // *Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения* : сб. науч. тр. Чебоксары, 2015. Т. 11. С. 129–139.

13. Фельдман С.О., Ячкула Н.И. Автоматическое регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока // *Локомотив*. 2013. № 1 (673). С. 46–47.

14. Переключающие устройства: Основные характеристики и технические данные. EA-740. София : ННИ-В, 2011. 56 с. URL : http://mail.gercon-ltd.ru/files/PU_OB_KAT.pdf (Дата обращения 01.04.2024).

15. Пат. 2531025 Рос. Федерация. Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети переменного тока двухпутного участка железной дороги / Л.А. Герман, В.Л. Герман, Д.А. Жевлаков и др. № 2012138506/28 ; заявл. 07.09.12 ; опубл. 20.10.14, Бюл. № 29. 8 с.

16. Пат. 2365929 Рос. Федерация. Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети / Л.А. Герман, В.Л. Герман. № 2008111210/28 ; заявл. 24.03.2008 ; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. 7 с.

17. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск : СФРУК, 2013. 150 с.

18. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The Use of «Technical Rigidity» Indices to Assess Climatic Factors Effects on Power Transformers Reliability // *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, 2020. P. 136–141. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.

References

1. Kartashov I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G., Sharov Yu.V., Vorob'ev A.Yu. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Electricity quality management]. Moscow: MEI Publ., 2006. 319 p.

2. Prikaz Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022 «Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No 250 dated June 23, 2022 «On approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation»].

3. Rukovodyashchie ukazaniya po releinoi zaschite sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Guidelines for relay protection of traction power supply systems]. Compiled by Zarkov Yu.I., Figurnov E.P., Petrova T.E. Moscow: Transizdat Publ., 2005. 216 p.

4. German L.A., German V.L. Diagnostika avariinykh situatsii kontaktnoi seti peremennogo toka zheleznykh dorog [Diagnostics of emergency situations of the AC contact network of railways]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2008, no. 3, pp. 41–47.

5. German L.A., German V.L. Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoi seti peremennogo toka [Automation of power supply of AC traction network]. Moscow: MGUPS Publ., 2014. 173 p.

6. German L.A., Kurov D.A., Fel'dman S.O., Kishkurno K.V. Sovershenstvovat' regulirovanie napryazheniya na tyagovykh podstantsiyakh [Improve voltage regulation at traction substations]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2012, no. 5 (665), pp. 45–46.

7. German L.A., Samorukov A.V., Ishkin D.V., Yakunin D.V. Intel'lectual'nye terminaly dlya avtomatizatsii elektrosnabzheniya [Intelligent terminals for power supply automation]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2013, no. 12 (684), pp. 39–40.

8. Khudonogov I.A., Galkov A.A. Sovremennye podkhody k otsenke sostoyaniya ustroystv regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoy silovykh maslonapolnennykh transformatorov tyagovykh podstantsii [Modern approaches to assessing the condition of voltage regulation devices under load of power oil-filled transformers of traction substations]. *Materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the VII All-Russian scientific and practical conference with international participation «Education – Science – Production»]. Chita, 2023, vol. 1, pp. 316–323.

9. Konoplev N.E. Upravlenie ustroystvom RPN transformatora s pomoshch'yu algoritmov nechetkoi logiki [Transformer on-load tap-changer control using fuzzy logic algorithms]. *Materialy XX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Nauka i Molodezh»* [Proceedings of the XX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists «Science and Youth»]. Barnaul, 2023, vol. 1, part 1, pp. 342–344.

10. Tursunov D.A., Ismoilov I.K. Analiz voprosov primeneniya ustroystv regulirovaniya silovykh transformatorov [Analysis of issues related to the use of power transformer control devices]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2020, no. 8-3 (77), pp. 68–75.

11. German L.A., Kishkurno K.V. Regulirovanie napryazheniya v tyagovoi seti peremennogo toka zheleznykh dorog [Voltage regulation in the AC traction network of railways]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2014, no. 9, pp. 23–33.

12. Kalandarov, Kh.U., Mikheev G.M., Efremov L.G. Primenenie pereklyuchayushchikh ustroystv v elektroenergetike [Application of switching devices in the electric power industry]. *Sbornik nauchnykh trudov «Regional'naya energetika i elektrotekhnika: problemy i resheniya»* [Proceedings «Regional energy and electrical engineering: problems and solutions»]. Cheboksary, 2015, vol. 11, pp. 129–139.

13. Fel'dman S.O., Yachkula N.I. Avtomaticheskoe regulirovanie napryazheniya v tyagovoi seti peremennogo toka [Automatic voltage regulation in an alternating current traction network]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2013, no. 1 (673), pp. 46–47.

14. Pereklyuchayushchie ustroystva. Osnovnye kharakteristiki i tekhnicheskie dannye EA-740 [Switching devices. Main characteristics and technical data EA-740]. Sofia: HHI-B Publ., 2011. 56 p. Available at: http://mail.gercon-ltd.ru/files/PU_OB_KAT.pdf (Accessed April 1, 2024).

15. German L.A., German V.L., Zhevlakov D.A., Popov A.Yu. Patent RU 2531025 C2, 20.10.14.

16. German L.A., German V.L. Patent RU 2365929 C1, 27.08.2009.

17. Uskov A.A. *Sistemy s nechetkimi modelyami ob'ektov upravleniya* [Systems with fuzzy models of control objects]. Smolensk: SFRUK Publ., 2013. 150 p.

18. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The Use of «Technical Rigidity» Indices to Assess Climatic Factors Effects on Power Transformers Reliability. *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, 2020, pp. 136–141. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.

Информация об авторах

Худоногов Игорь Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: hudonogovi@mail.ru.

Галков Александр Андреевич, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: galkov16@gmail.com.

Information about the authors

Igor' A. Khudonogov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: hudonogovi@mail.ru.

Alexandr A. Galkov, Ph.D. Student of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: galkov16@gmail.com.