

УДК 621.311, 621.331

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В.П. Закарюкин<sup>1</sup>, А.В. Крюков<sup>1,2</sup>, Е.А. Алексеенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет

<sup>3</sup>Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению Трансэнерго, ОАО РЖД,  
г. Иркутск

*Резюме:* Для решения задач проектирования и эксплуатации систем электроснабжения железных дорог переменного тока необходимы методы и алгоритмы, обеспечивающие моделирование аварийных режимов. Эти методы должны удовлетворять следующим требованиям: адекватность и точность моделирования; надежность получения необходимого результата; универсальность.

Эффективный метод определения аварийных режимов в электрических сетях, питающих тяговые подстанции, может быть реализован на основе применения фазных координат и решетчатых схем замещения линий электропередачи и трансформаторов. В основу метода положена идея представления многопроводных ЛЭП и многообмоточных трансформаторов в виде решетчатых схем замещения из RLC-элементов, соединенных по схемам полных графов.

Расчет аварийных режимов в системах внешнего электроснабжения железных дорог, как правило, можно проводить без учета системы тягового электроснабжения. Исключения составляют случаи питания места короткого замыкания через тяговую сеть, возникающие при отключении высоковольтных ЛЭП со стороны опорных подстанций.

В неполнофазных режимах питающих ЛЭП возможен ограниченный пропуск поездов, однако при этом имеет место рост несимметрии в сетях 110-220 кВ. Результаты моделирования расчетного примера неполнофазного режима показали, что уровень напряжения на токоприемнике электровоза в некоторые моменты времени превышает допустимое значение. Поэтому требуется стабилизация напряжения посредством регулирующих устройств.

**Ключевые слова:** железная дорога, система электроснабжения, аварийный режим, моделирование.

## MODELLING OF EMERGENCY OPERATION IN ELECTRIC NETWORKS FEEDING RAILROAD TRACTION SUBSTATIONS

V.P. Zakaryukin<sup>1</sup>, A.V. Kryukov<sup>1,2</sup>, E.A. Alekseenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Irkutsk distance of Power Supply, structural division of Trans Power, Russian  
Railway, Russia

*Abstract:* The methods and algorithms providing modeling of emergency operation are necessary for the solution of designing and operation of railway power supply systems of alternating current. These methods shall meet the following requirements: modeling adequacy and accuracy; result's reliability; universality.

*The effective method of operation modes' determination in the electric networks feeding traction substations can be realized on the basis of phase coordinates and trellised equivalent circuits of power lines and transformers. The idea of power lines and transformers representation in the form of trellised equivalent circuits from the RLC elements connected according to schemes of complete counts is the basis for a method.*

*Calculation of operation modes in systems of railroad external power supply, as a rule, can be carried out without accounting of traction power supply system. The exception is constituted by the cases of short circuit feeding through traction network arising in case of shutdown of the high-voltage power lines from basic substations.*

*In not full-phase modes of the feeding power lines the limited admittance card of trains is possible. However at the same time, growth of asymmetry in networks of 110-220 kV takes place. Besides, results of settlement example modeling showed that voltage level on electric locomotive current collector in sometimes exceeds admissible value. Therefore stabilization of voltage by means of control devices is required.*

**Keywords:** *railroad, power supply system, emergency mode, modeling*

### **Введение**

Система электроснабжения железной дороги (СЭЖД) переменного тока включает три сложные подсистемы [1, 2]:

- питающую электроэнергетическую систему (ЭЭС), примыкающую к тяговым подстанциям (ТП), часть которой образует систему внешнего электроснабжения (СВЭ);
- систему тягового электроснабжения (СТЭ) 25 кВ, 2х25 кВ или повышенного напряжения;
- районы электроснабжения (РЭС) нетяговых потребителей, включающие технологические линии электропередачи «провод-рельс» и «два провода-рельс».

В первой и третьей подсистемах могут возникать аварийные режимы (АР), вызванные короткими замыканиями (КЗ) и обрывами фазных проводов. Аварийные режимы в СТЭ 25 кВ могут быть вызваны замыканием контактного провода на рельс. В тяговых сетях 2х25 кВ дополнительно могут иметь место замыкания питающего провода на рельс, а также КЗ между питающим и контактным проводами.

Кроме перечисленных повреждений, могут иметь место более сложные повреждения, например обрыв фазы с одновременным ее замыканием на землю. К тому же указанные выше повреждения в питающих сетях СЭЖД нельзя отнести к простым, так трехфазная сеть СВЭ в этом случае шунтируется однофазной тяговой сетью (ТС). Поэтому традиционные методы расчета, хорошо зарекомендовавшие себя для симметрично построенных трехфазных сетей, требуют в данном случае серьезной модификации и усложнения.

### **Методика моделирования**

Для решения задач проектирования и эксплуатации СЭЖД необходимы методы и алгоритмы, обеспечивающие моделирование аварийных режимов (АР) во всех подсистемах: СВЭ, СТЭ и РЭС. Эти методы, по мнению авторов, должны удовлетворять следующим требованиям:

- адекватность и точность моделирования;
- надежность получения необходимого результата;
- универсальность.

Адекватность моделирования может быть обеспечена на основе корректного использования законов электротехники и учета всех факторов, влияющих на процессы в СЭЖД при возникновении АР. Критерии точности и надежности получения результата являются взаимосвязанными и обеспечиваются при использовании математических

моделей, сводящихся к хорошо обусловленным системам линейных уравнений или системам нелинейных уравнений с хорошо обусловленными матрицами Якоби. Критерий универсальности имеет три аспекта:

- структурный;
- конструктивный;
- режимный.

Структурный аспект подразумевает реализацию единого методического подхода к определению аварийных режимов в СВЭ, СТЭ и РЭС. Конструктивная универсальность связана с возможностью моделирования систем различного конструктивного исполнения, например, СТЭ повышенного напряжения или СВЭ, выполненных с использованием многофазных ЛЭП. Под режимной универсальностью можно понимать возможность моделирования различных АР без модификации алгоритмов и программного обеспечения: коротких замыканий, обрывов фаз, синхронных качаний генераторов и т. д.

Для решения задач определения аварийных режимов в СЭЖД предложено большое число эффективных методов и алгоритмов [3–9], большинство из которых основано на применении метода симметричных составляющих или его модификаций с другими диагонализующими преобразованиями матриц сопротивлений и проводимостей. Эти методы в полной мере обеспечивают выполнение критериев адекватности, точности и надежности получения результатов. Однако критерий универсальности выполняется далеко не всегда. Так, например, предложенные в работах [4–9] методы предназначены для расчета токов КЗ только в системах тягового электроснабжения.

Универсальный метод определения аварийных режимов в СЭЖД может быть реализован на основе применения фазных координат и решетчатых схем замещения линий электропередачи и трансформаторов [10–12]. В основу методов положена идея представления многопроводных ЛЭП и многообмоточных трансформаторов в виде решетчатых схем замещения (РСЗ) из  $RLC$ -элементов, соединенных по схемам полных графов. Для РСЗ может записано следующее формализованное определение:

$$TEC: hub \cup con, \forall i, j \in hub \rightarrow con_{i,j} \subset con,$$

где  $TEC$  – обозначение РСЗ;  $hub$  – множество узлов РСЗ;  $con$  – множество ветвей РСЗ.

Пример РСЗ для линии электропередачи и трансформатора показан на рис. 1.

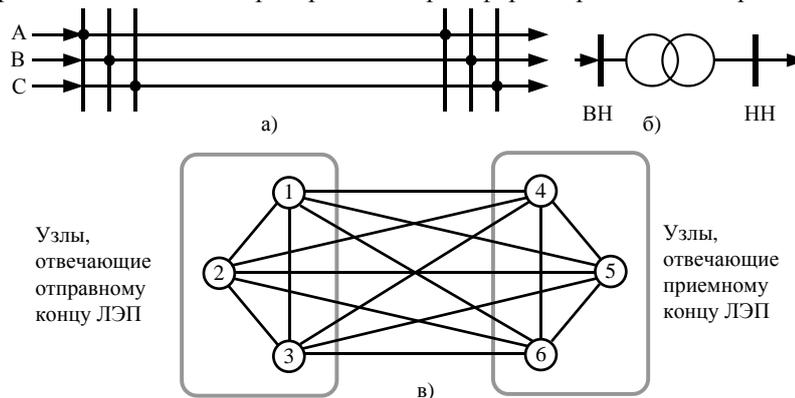


Рис. 1. Модели одноцепной ЛЭП и трансформатора в виде РСЗ:

а) исходная схема ЛЭП; б) исходная схема двухобмоточного трансформатора;

в) РСЗ, одинаковая для ЛЭП и трансформатора

Описанная методика реализована в программном комплексе *Fazonord*, в котором используются технологии визуального моделирования, обеспечивающие удобное определение аварийных режимов при любых видах повреждений в ЭЭС и СЭЖД, описанных выше.

Фрагменты моделей для определения режимов при однофазном КЗ, обрыве фазы, а также при сложном повреждении, вызванном падением фазного провода ЛЭП на землю, показаны на рис. 2...4.

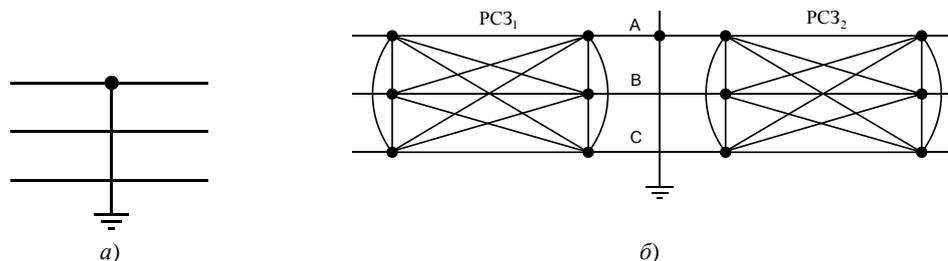


Рис. 2. Моделирование однофазного КЗ: *a* – исходная схема; *б* – схема расчетной модели

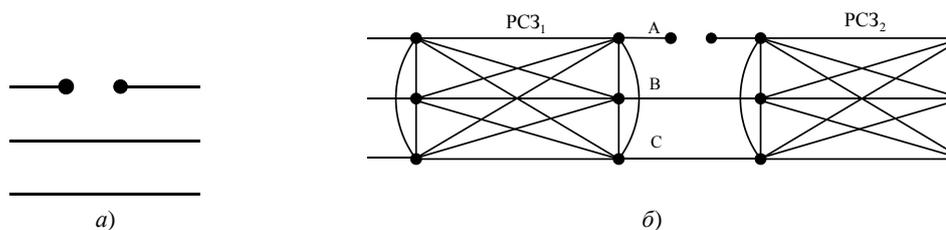


Рис. 3. Моделирование обрыва фазы: *a* – исходная схема; *б* – схема расчетной модели

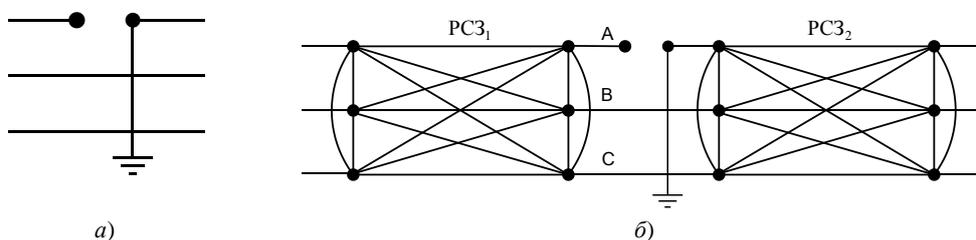


Рис. 4. Моделирование обрыва фазы с одновременным замыканием на землю:  
*a* – исходная схема; *б* – схема расчетной модели

Подробное описание методики моделирования сложносимметричных режимов ЭЭС и СЭЖД, частным случаем которых являются рассматриваемые в настоящей статье АР, приведено в работах [10, 11].

### Результаты моделирования

Иллюстрация технологий моделирования аварийных режимов проведена на основе исходной схемы СЭЖД 25 кВ двухпутного участка, показанной на рис. 5. Результаты определения АР при коротких замыканиях в сети 220 кВ представлены в табл. 1.

Расчеты токов, выполненные без учета подпитки со стороны тяговой сети, то есть при консольном питании контактной сети, отличаются от приведенных в табл. 1 значений на доли процентов. Поэтому расчет аварийных режимов в СВЭ, как правило, можно проводить без учета системы тягового электроснабжения. Исключения составляют случаи, аналогичные показанному на рис. 6. В подобных ситуациях без учета тяговой сети не обойтись, так как токи к месту КЗ подтекают по ней.

Результаты расчета АР для сети, представленной на рис. 6, приведены в табл. 2.

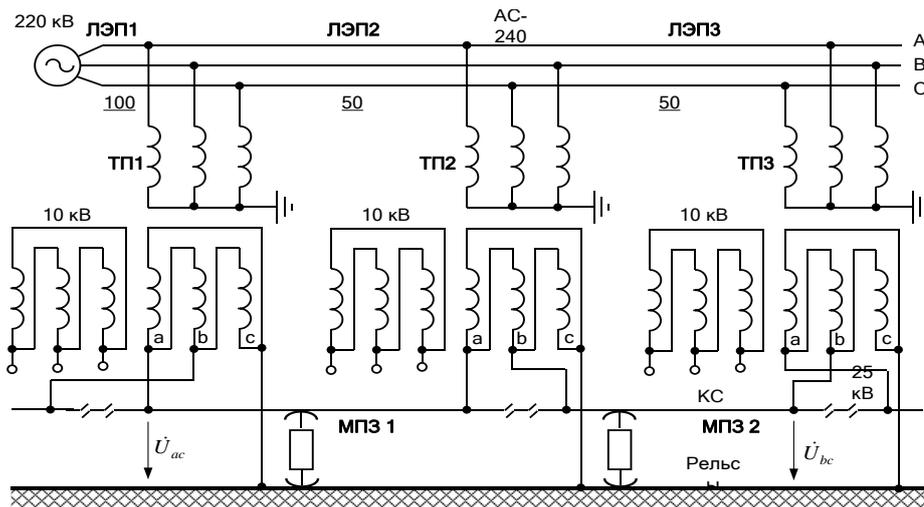


Рис. 5. Схема типовой СЭЖД 25 кВ:  
для упрощения показана контактная подвеска только одного пути

Таблица 1

Результаты расчета токов КЗ в сети 220 кВ при двустороннем питании КС

Вид КЗ	Токи в месте КЗ, кА			Токи контактной сети, А	
	А	В	С	Первый путь	Второй путь
Трехфазное	2,01	2,07	2,02	201,8	201,9
Трехфазное на землю	2,01	2,06	2,02	201,8	201,9
Двухфазное	0	1,77	1,77	4,57	4,58
Двухфазное на землю	0	1,98	2,19	71	71
Однофазное	2,12	0	0	141	141

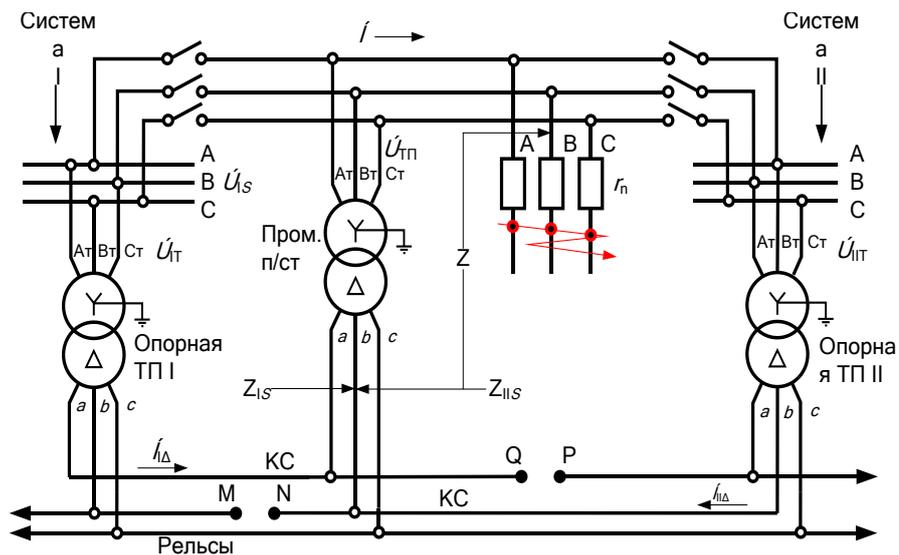


Рис. 6. Короткое замыкание на линии, питающей тяговые подстанции

Таблица 2

Результаты расчета токов КЗ в схеме, показанной на рис. 6

Вид КЗ	Замыкаемые фазы	Фазные токи, А		
		А	В	С
Однофазное	А, В, С	217,7	125,1	219,2
Трехфазное	А-В-С	190	87,3	194,1
Двухфазное на землю	В-С	0	158,5	286,5
	А-С	216,1	0	218,1
	В-А	276,4	176,6	0
Двухфазное	В-С	0	89,1	89,1
	А-С	187	0	187
	В-А	88,6	88,6	0

Моделирование неполнофазных режимов выполнено для схемы рис. 5; при этом использовалась расчетная модель, схема которой показана на рис. 7. Результаты определения АР при обрыве провода фазы А в конце ЛЭП 1 приведены в табл. 3.

Результаты аварийного режима при более сложном повреждении, когда оборванный провод фазы А в конце ЛЭП1 замыкается на землю, приведены в табл. 4.

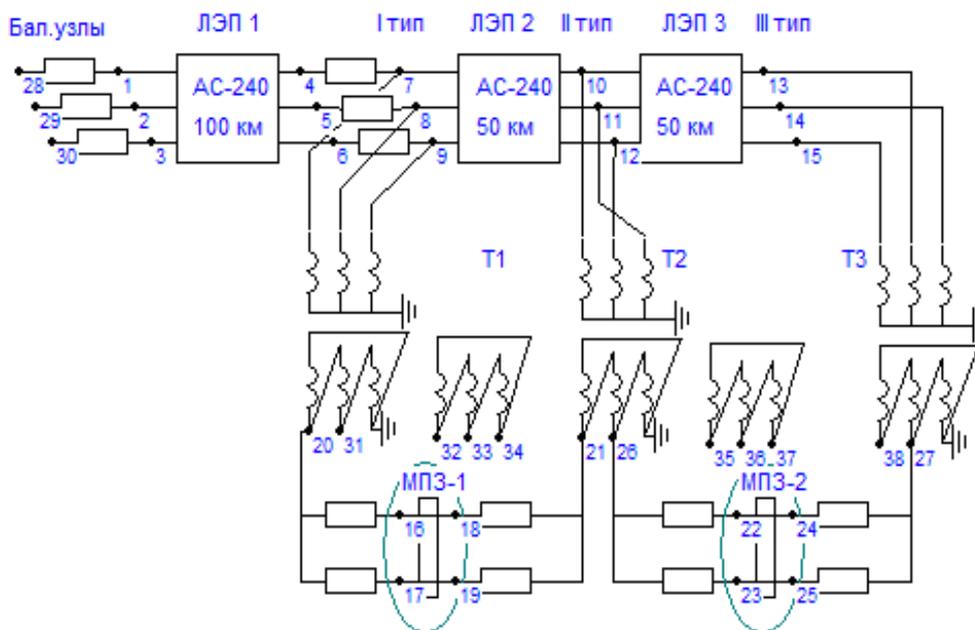


Рис. 7. Расчетная схема имитационного моделирования

Неполнофазный режим может продолжаться в течение длительного времени, и потому представляет интерес задача определения возможности пропуска поездов и несимметрии питающих напряжений в таких режимах. В качестве примера решения задачи проведено имитационное моделирование режимов СЭЖД при обрыве фазы В в конце ЛЭП 1 по расчетной модели рис. 7. Моделировалось движение одного поезда массой 5000 тонн. График движения показан на рис. 8, а, а токовый профиль – на рис. 8, б.

Таблица 3

Напряжения на шинах ТП-2 при обрыве фаз в конце ЛЭП 1

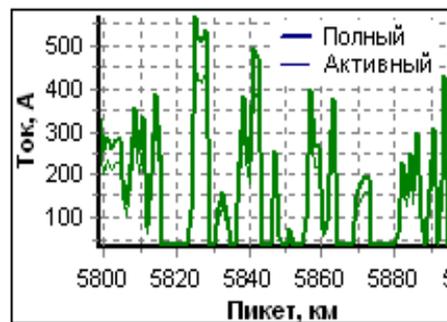
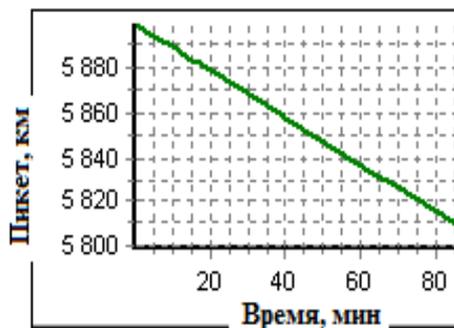
Вид повреждения	Параметр	Тяговая подстанция	
		ТП1	ТП2
Обрыв одной фазы А	$U_A$ , кВ	155,7	155
	$U_B$ , кВ	136,7	137,7
	$U_C$ , кВ	138,9	140,4
	$U_{TC}$ , кВ	31,5	31,6
Обрыв двух фаз А, В	$U_A$ , кВ	70,4	70,1
	$U_B$ , кВ	71,4	71,5
	$U_C$ , кВ	137,4	138,6
	$U_{TC}$ , кВ	14,3	14,3

Примечание:  $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения на шинах 220 кВ ТП;  $U_{TC}$  – напряжение на шинах 27,5 кВ ТП.

Таблица 4

Токи и напряжения на шинах ТП при обрыве фазы А в конце ЛЭП 1 с одновременным замыканием на землю

Параметр	ТП	А	В	С
$I$ , А	–	148,6	136,9	148,3
$U$ , кВ	ТП1	0	124,3	120,1
	ТП2	10,1	117,8	122,5



а) б)  
Рис. 8. График движения (а) и токовый профиль поезда (б)

Результаты моделирования сведены в табл. 5, 6 и на рис. 9...11.

Из табл. 5 видно, что неполнофазный режим приводит к росту коэффициента несимметрии напряжений сети 220 кВ по обратной последовательности  $k_{2U}$  до 7,5 %, что почти в два раза превышает предельно допустимые значения. Динамика изменения коэффициента несимметрии во времени показана на рис. 9.

Сводные данные по коэффициентами несимметрии  $k_{2U}$ , %

Параметр	Группы узлов			
	4-5-6	7-8-9	10-11-12	13-14-15
Минимум, %	0,01	2,15	2,26	2,24
Среднее, %	0,35	4,79	4,82	4,82
Максимум, %	1,45	7,00	7,31	7,41

На рис. 10 показана зависимость напряжения на токоприемнике ЭПС, из которой видно, что уровень напряжения в некоторые моменты времени значительно превышает допустимое значение 29 кВ и требуется его стабилизация посредством регулирующих устройств. На рис. 11 показана динамика изменения напряжений на шинах 27,5 кВ ТП. Полученные результаты подтверждают сделанный выше вывод о необходимости использования регулирующих устройств в неполнофазном режиме.

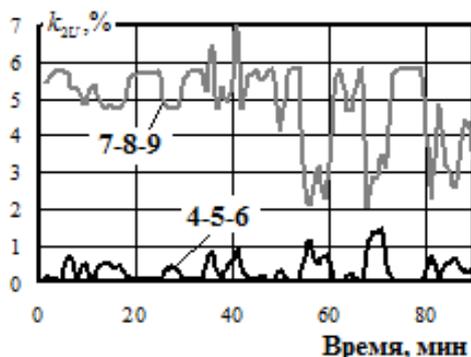


Рис. 9. Динамика изменения коэффициента несимметрии питающих напряжений в узлах 4-5-6 и 7-8-9 при обрыве фазы В в конце ЛЭП 1

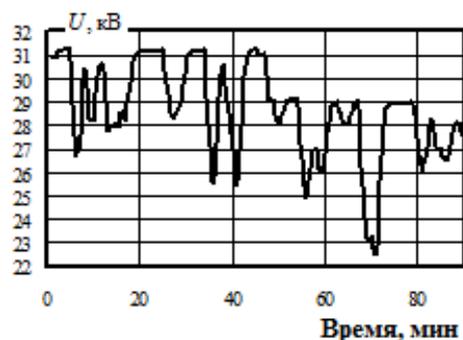


Рис. 10. Зависимость напряжения на токоприемнике от времени

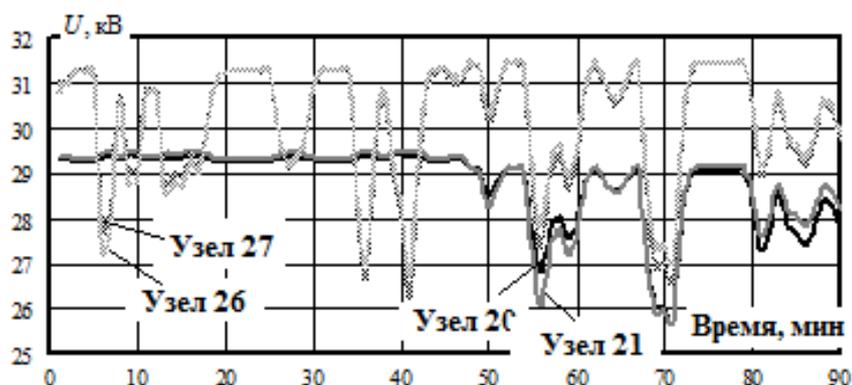


Рис. 11. Зависимости напряжений на шинах 27,5 кВ ТП от времени

Сводные данные, приведенные в табл. 6, также свидетельствуют о завышенных уровнях напряжения на выводах ТП1...ТП3.

Сводные данные по напряжениям на вводах 27,5 кВ ТП

Параметр	Номера узлов			
	20	21	26	27
Минимум, кВ	25,69	25,67	26,24	26,73
Среднее, кВ	28,75	28,83	30,07	30,14
Максимум, кВ	29,42	29,51	31,41	31,45

### Заклучение

1. Несимметричные короткие замыкания и обрывы проводов ЛЭП в системах внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока нельзя отнести к простым видам повреждений, так трехфазная сеть СВЭ в этом случае шунтируется однофазной тяговой сетью. Поэтому традиционные методы расчета, хорошо зарекомендовавшие себя для симметрично построенных трехфазных ЭЭС, требуют в данном случае серьезной модификации и усложнения.

2. Эффективный метод определения аварийных режимов может быть реализован на основе фазных координат и методов моделирования несимметричных режимов ЭЭС и систем электроснабжения, разработанных в ИрГУПСе. В основу метода положена идея представления многопроводных ЛЭП и многообмоточных трансформаторов в виде решетчатых схем замещения из *RLC*-элементов, соединенных по схемам полных графов.

3. Расчет аварийных режимов в системах внешнего электроснабжения железных дорог, как правило, можно проводить без учета системы тягового электроснабжения. Исключение составляют случаи питания места КЗ через тяговую сеть, возникающие при отключении высоковольтных ЛЭП со стороны опорных подстанций.

4. В неполнофазных режимах питающих ЛЭП возможен ограниченный пропуск поездов. Однако при этом имеет место рост несимметрии в сетях 110–220 кВ. Кроме того, результаты моделирования расчетного примера показали, что уровень напряжения на токоприемнике электровоза в некоторые моменты времени превышает допустимое значение и требуется его стабилизация посредством применения регулирующих устройств.

### Литература

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
2. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
3. Energieversorgung elektrischer bannen / Н. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. / Wiesbaden: V.G. Teubner Verlag, 2006. 732 p.
4. Герман Л.А., Шаров А.В. Расчет токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока железных дорог // Электричество. 2003. № 3. С. 27–34.
5. Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: Московский государственный университет путей сообщения, 2014. 173 с.
6. Быкадоров А.Л., Муратова-Милехина А.С. Метод определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий // Транспорт-2013. Ростов-на-Дону, 2013. С. 138–139.
7. Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 5–10.
8. Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и

расчета параметров петли короткого замыкания / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, И.В. Гаврилов и др. // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2015. № 4. С. 7–12.

9. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на полное сопротивление петли короткого замыкания // *Вестник транспорта Поволжья*. 2013. № 5(41). С. 5–11.

10. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Мультифункциональный подход к моделированию электроэнергетических систем // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2013. № 4(40). С. 100–107.

12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // *The power grid of the future / Proceeding № 2. Otto-von-Guericke University Magdeburg, Magdeburg*. 2013. P. 44–48.

#### **Авторы публикации**

**Закарюкин Василий Пантелеймонович** – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). E-mail: zakar49@mail.ru.

**Крюков Андрей Васильевич** – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета, заслуженный энергетик РБ, академик Российской академии транспорта, член-корр. Российской инженерной академии, член-корр. академии наук высшей школы РФ. E-mail: and\_kryukov@mail.ru.

**Алексеев Евгений Алексеевна** – магистр техники и технологии, энергодиспетчер Иркутской дистанции электроснабжения Восточно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго ОАО РЖД. E-mail: alev\_ia@mail.ru.

#### **References**

1. Markvardt K.G. Electric energy supplying of railroad. Moscow: Transport, 1982. 528 p.
2. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
3. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. / Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
4. German L.A., Sharov A.V. Calculation of current distribution at short circuits in traction networks // *Electricity*. No. 3. 1979. P. 30-34.
5. German L.A., German V.L. Automatization of alternating current traction energy supply. M.: Moscow State Transport University, 2014. 173 p.
6. Bykadorov A. L., Muratova-Milekhina A. S. Method of determination of short circuit place in tractive alternating current nets on information technologies basis // *Transport-2013. Rostov-on-Don*, 2013. P. 138-139.
7. Germann L.A., Kishkurno K.V., Subkhanverdiyev K.S. Assessment of an error of calculation of short-circuit currents in tractive alternating current mains // *Electronics and transport electric equipment*. No. 1. 2017. P. 5-10.
8. Detailing of tractive alternating current net structure in tasks of simulation and calculation of parameters of short circuit loop / A.L. Bykadorov, T. A. Zarutskaya, I. V. Gavrilov, etc // *Electronics and electric equipment of transport*. No. 4. 2015. P. 7-12.

9. Bykadorov A. L., Zarutskaya T. A., Muratova-Milekhina A. S. The analysis of mutual influence of tractive alternating current net parameters on total resistance of short circuit loop // The Messenger of Volga region transport. No. 5(41). 2013. P. 5-11.

10. Zakaryukin V. P., Kryukov A.V. Asymmetrical modes of electric systems. Irkutsk, 2005. 273 p.

11. Zakaryukin V. P., Kryukov A.V. Multifunctional approach to electrical power systems simulation // Modern technologies. Systems analysis. Simulation. No. 4(40). 2013. P. 100-107.

12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future / Proceeding № 2. Otto-von-Guericke University Magdeburg. Magdeburg. 2013. P. 44–48.

#### **Authors of the publication**

**Zakaryukin Vasily Panteleymonovich** – Doctor of Engineering, professor of department of power industry of transport, E-mail: zakar49@mail.ru.

**Kryukov Andrey Vasilyevich** – Doctor of Engineering, professor of department of power industry of transport of the Irkutsk state transport university, professor of department of power supply and electrical equipment of the Irkutsk national research technical university, the honored power engineering specialist of Republics of Buryatia, the academician of the Russian academy of transport, the member correspondent. Russian engineering academy, member correspondent of academy of Sciences of the higher school of the Russian Federation. E-mail: and\_kryukov@mail.ru.

**Alekseenko Evgenia Alekseevna** – master of the equipment and technology, power supply dispatcher of the Irkutsk distance of power supply of the East Siberian directorate – structural division of Transpower JSC Russian Railway. E-mail: alev\_ia@mail.ru.

**Поступила в редакцию**

**13 января 2017 г.**