

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.С. Семёнов¹, М.Н. Семёнова², Ю.В. Бебихов², И.А. Якушев²

¹ Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра
РАН, Уфа, Россия, e-mail: sash-alex@yandex.ru

² Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета
имени М.К. Аммосова в г. Мирном, Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

Аннотация: Рассмотрен вопрос исследования с использованием компьютерного моделирования нормальных и аварийных режимов работы системы электроснабжения обогатительной фабрики по переработке алмазосодержащего сырья, которая получает питание от открытого распределительного устройства 220/110 кВ электрической подстанции «Фабрика-3». Моделирование переходных процессов было реализовано в пакете программ MatLab/Simulink. Представлены расчеты элементов подстанции, обмоточных данных трансформатора, а также номинальных токов в схеме замещения трансформатора. Представлены математические модели токов трехфазного короткого замыкания и источника тока молнии. Получены и проанализированы электромагнитные переходные процессы в системе электроснабжения. В качестве примера была выбрана система электроснабжения цеха крупного дробления обогатительной фабрики по переработке алмазосодержащего сырья. Для моделирования нормального режима работы использовалась разработанная авторами ранее универсальная компьютерная модель системы электроснабжения промышленного предприятия, которая была доработана под нашу систему. Точки короткого замыкания были выбраны на уровнях напряжения 110,6 и 0,4 кВ. Модель грозового разряда, используемая в работе, учитывала амплитуду тока, длительность фронта и длительность импульса тока молнии. В результате моделирования в нормальном режиме работы получили практически полное совпадение величины трехфазного напряжения на соответствующих уровнях, с погрешностью, не превышающей 2%. Результаты компьютерного моделирования системы электроснабжения промышленного предприятия позволяют предложить данный подход в качестве дополнительного при проектировании распределительных устройств и электрических подстанций.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, MatLab, режимы работы, система электроснабжения, обогатительная фабрика, трансформаторная подстанция, распределительное устройство, короткое замыкание, перенапряжение, удар молнии.

Благодарность: Работа выполнена в рамках инициативной НИР кафедры «Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства» Политехнического института (филиала) СВФУ им. М.К. Аммосова в г. Мирном, Республика Саха (Якутия).

Для цитирования: Семёнов А. С., Семёнова М. Н., Бебихов Ю. В., Якушев И. А. Исследование нормальных и аварийных режимов работы системы электроснабжения обогатительной фабрики с использованием компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 9. – С. 162–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_162.

Computer modeling-based analysis of normal and emergency operation of power supply system at processing plant

A.S. Semenov¹, M.N. Semenova², Yu.V. Bebikhov², I.A. Yakushev²

¹ Institute Molecules and Crystals Physics of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia, e-mail: sash-alex@yandex.ru

² Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in Mirny, Mirny, Russia

Abstract: The article discusses the use of computer modeling in the analysis of normal and emergency operation of power supply system at a diamond processing plant powered by outdoor switchgear 220/110 kW of electric substation Fabrika-3. Modeling of the transient processes was implemented in MatLab/Simulink. The article describes calculations for the substation components, transformer windings and nominal currents in the equivalent circuit of the transformer. The mathematical models of three-phase short circuit and lightning-stroke currents are presented. The electromagnetic transient processes in the power supply system are determined and analyzed. The article describes a case-study of the power supply system in coarse grinding workshop at a diamond processing plant. The normal operation modeling used the universal computer model of power supply of a factory unit, developed earlier by the present authors and modified for the test system. The fault points were selected at the voltages of 110, 6 and 0.4 kW. The lightning discharge model used in the study took into account the current amplitudes, build-up time and lightning pulse duration. As a result of modeling the normal operation, the total coincidence of three-phase voltage values was obtained at the selected levels, at an error not higher than 2%. The computer modeling results on the power supply system of a factory unit allow suggesting this approach as a complimentary technique in design of switchgears and electric substations.

Key words: computer modeling, MatLab, operation modes, power supply system, processing plant, transformer substation, switchgear, short circuit, overvoltage, lightning stroke.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of an independent R&D at the Department of Power Industry and Industrial Automation at the Polytechnic Institute—Branch of the Ammosov North-Eastern Federal University in the city of Mirny, Republic of Sakha (Yakutia).

For citation: Semenov A. S., Semenova M. N., Bebikhov Yu. V., Yakushev I. A. Computer modeling-based analysis of normal and emergency operation of power supply system at processing plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(9):162-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_162.

Введение

Ключевое направление развития электросетевого комплекса заключается в модернизации методов передачи электроэнергии, которые должны гарантировать высокий уровень надежности, безопас-

ности и экономической целесообразности [1 – 3]. При разработке новых энергообъектов, обновлении существующих систем и анализе функционирования действующих электроэнергетических сетей возникает необходимость выпол-

нять комплексные расчеты, в том числе моделировать переходные процессы и оценивать эксплуатационные режимы, как отдельных элементов сети, так и энергосистемы в целом [4–6]. К числу наиболее распространенных расчетных задач относятся: определение нагрузок и распределение потоков мощности, оценка устойчивости системы, исследование режимов коротких замыканий, а также анализ электромагнитных переходных процессов [7, 8].

Для решения вышеуказанных задач в работе применим пакет программ Mat Lab/Simulink, а именно библиотека имитационного моделирования SimPower Systems [9]. Для создания определенной модели, содержащей необходимое основное силовое оборудование электро-энергетической системы, будем использовать универсальную модель, разработанную и апробированную авторами в ранних работах [10].

Целью данной статьи является исследование нормальных и аварийных режимов работы системы электроснабжения промышленного предприятия с использованием компьютерного моделирования, для этого выбрана трансформаторная подстанция напряжением 220/110/6 кВ, питающая обогащательную фабрику по переработке алмазосодержащего сырья. Задачами исследования в данной статье являются: расчет подстанции, расчет трансформаторов, расчет токов короткого замыкания и тока грозового разряда, разработка компьютерных моделей на основе ранее полученной универсальной модели для анализа нормального и аварийных режимов работы системы электроснабжения. В качестве объекта исследований была выбрана подстанция «Фабрика-3» Западных электрических сетей (филиал) ПАО «Якутскэнерго» Республики Саха (Якутия), имеющая открытое распределительное устройство (ОРУ) с классами

напряжения 220/110 кВ и закрытое распределительное устройство (ЗРУ) с уровнем напряжения 6 кВ. Предметом исследования являются нормальные и аварийные режимы работы подстанции, которые могут возникать при коротких замыканиях, как от внутренних, так и от внешних условий [11, 12].

Краткая теоретическая часть

Короткие замыкания (КЗ) в электроустановках подстанций способны провоцировать как штатные, так и аварийные режимы функционирования энергооборудования. Причина кроется в самой природе КЗ: это непреднамеренное соединение токоведущих частей, не предусмотренное штатной схемой работы — между фазами либо (в сетях с заземленной нейтралью) между фазой и землей. Примечательно, что в ходе развития аварийной ситуации тип КЗ может трансформироваться: например, однофазное замыкание способно перерасти в двухфазное на землю [13].

Различают два типа штатных режимов работы оборудования подстанции:

- установившийся нормальный режим, характеризующийся незначительными колебаниями параметров, которые допустимо считать постоянными. Этот режим служит базовым для расчетов и отличается оптимальными технико-экономическими показателями;
- нормальный переходный режим, возникающий при штатных операциях: коммутации элементов сети, регулировании нагрузки и т.д. [14].

Аварийные режимы, включая КЗ различного происхождения, сопровождаются сложными переходными процессами [15].

Их ключевые особенности:

- снижение результирующего сопротивления сети, вызывающее резкий рост токов в ветвях относительно нормальных значений;

- существенное падение напряжения в узлах, расположенных вблизи точки повреждения;

- резкие изменения фазовых характеристик токов в ветвях, примыкающих к месту КЗ;

- перегрев токоведущих элементов из-за возрастания тока, что может привести к повреждению изоляции;

- риск механического разрушения проводников под действием мощных электродинамических сил при значительных мощностях КЗ [16].

Подобные аварии способны серьезно нарушить работу системы электроснабжения и привести к следующим последствиям:

- перебоям или ограничению подачи электроэнергии потребителям;

- снижению устойчивости энергосистемы;

- превышению допустимых термических и динамических нагрузок на оборудование;

- сбоем в работе релейной защиты и автоматики, включая ложные срабатывания [17].

Наибольшему риску при КЗ подвержены элементы сети, расположенные в непосредственной близости от точки замыкания [18]. По данным на 2024 г. [19], в среднем КЗ возникает каждые

56 ч в год. Вероятность возникновения КЗ определяется его видом и классом напряжения сети, в которой оно происходит. Также есть сведения, что в Сибири и на Дальнем Востоке до 30% аварий в электросетях связаны с короткими замыканиями.

Помимо внутренних КЗ, которые могут возникнуть по причине выхода из строя или неисправности отдельных элементов энергосистемы, имеется опасность возникновения перенапряжения и КЗ в результате попадания молнии, особенно для открытых распределительных устройств (ОРУ) и линий электропередачи [20].

Несмотря на значительный объем накопленных научных знаний в сфере молниезащиты энергетических объектов, фундаментальные аспекты физики молнии [21] и эффективные методы противодействия ее разрушительному воздействию по-прежнему представляют актуальную научно-практическую задачу [22].

Результаты анализа статистических данных по аварийности линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 220 кВ на территории Дальнего Востока за период 2017 – 2024 гг. [23] демонстрируют высокую долю отключений, вызванных грозовыми воздействиями. Так, на их

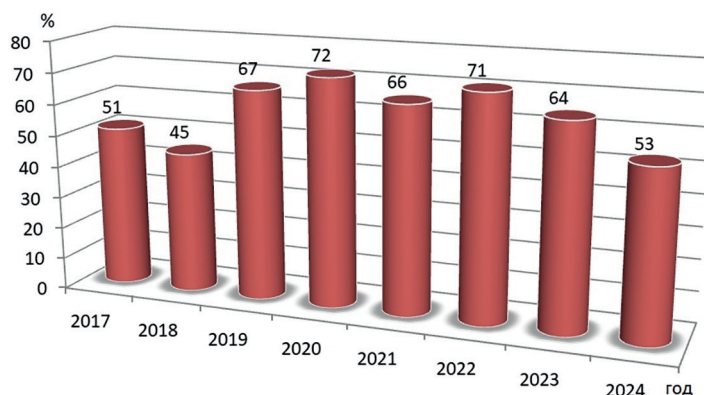


Рис. 1. Процент грозовых отключений ЛЭП 220 кВ Дальнего Востока по годам

Fig. 1. Percentage of lightning-induced outages of 220 kV power lines in the Far East by year

долю приходится 62,6% всех аварийных ситуаций, что соответствует удельному показателю 0,55 отключений на 100 км линии в год (рис. 1).

Эти факты обуславливают актуальность исследования, особенно в аварийных режимах работы системы электроснабжения промышленных предприятий, так как последствиями таких внешних воздействий может стать повреждение дорогостоящего оборудования и угроза жизни и здоровью персонала.

Объект исследования

К подстанции «Фабрика-3» подходят ЛЭП 220 кВ (Л-211, Л-212), как показано на рис. 2. Питание поступает от подстанции «Районная». На стороне напряжения 220/110 кВ использовано ОРУ. Все электрические аппараты установлены на железобетонных опорах, гибкие шины прикреплены к порталам посредством подвесных изоляторов. Для защиты изоляции электрического оборудования от атмосферных перенапряжений

установлены разрядники. Ограждение ОРУ выполнено железобетонными плитами высотой 2,5 м.

На подстанции установлены автотрансформатор АДТНГ-125000/220 и силовой трансформатор ТДН-16000/110 с отдельно стоящим закрытым распределительным устройством (ЗРУ), также подстанция имеет два трансформатора собственных нужд и две секции шин: рабочую и резервную. Под силовыми трансформаторами проложен слой гравия, аварийный слив масла предусмотрен в аварийный подземный резервуар. Соединение силового трансформатора с ЗРУ 6 кВ выполнено шинным мостом. Жесткие шины крепятся на штыревых изоляторах, установленных на железобетонных конструкциях. Распределительное устройство 6 кВ, трансформаторы собственных нужд и щиты управления расположены в одноэтажном здании с кабельным подвалом.

ЗРУ 6 кВ укомплектовано из ячеек комплектного распределительного уст-

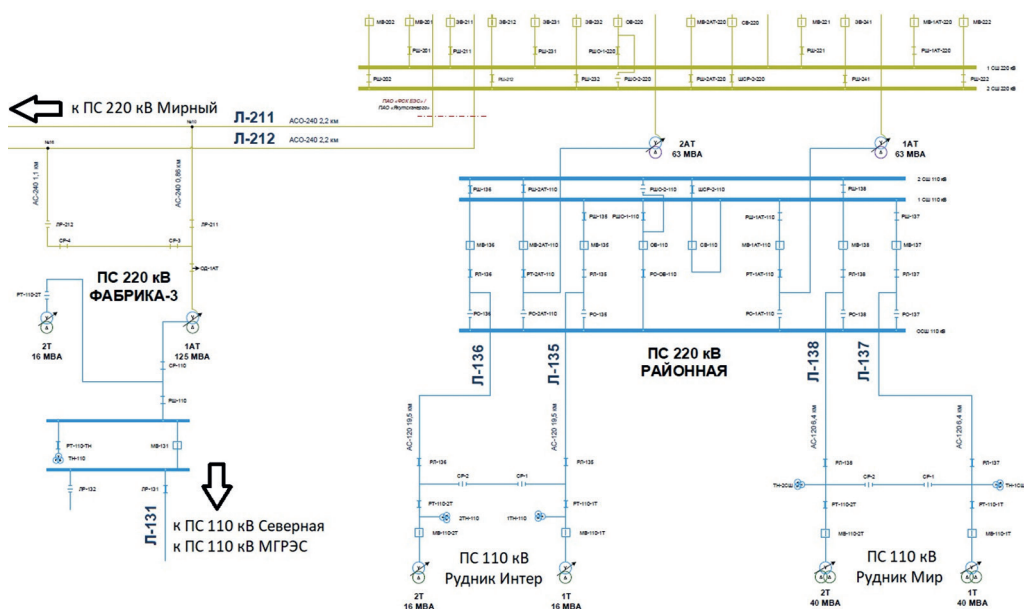


Рис. 2. Схема питания подстанции «Фабрика-3»

Fig. 2. Power supply diagram of the substation «Fabrika-3»

Таблица 1

Паспортные данные рассматриваемых трансформаторов:**1 – АТДТНГ-125000/220; 2 – ТДН-16000/110****Passport data of the transformers: 1 – ATDTNG-125000/220; 2 – TDN-16000/110**

№	$S_{ном},$ МВА	$U_{ном},$ кВ			$U_{к},$ %			$\Delta P_{к'},$ кВт	$\Delta P_{л'},$ кВт	$I_{л},$ %
		ВН	СН	НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН			
1	125	230	121	6,6	11	31	19	290	85	0,5
2	16	115	—	6,6	—	10,5	—	85	19	0,7

ройства типа КУ-6С, в которых размещаются электрические аппараты, измерительные трансформаторы тока и напряжения, защитные и измерительные приборы, вспомогательные устройства. Для защиты от перенапряжения на каждой секции установлены ячейки с разрядниками типа РВО-6У1. На каждой секции шин предусмотрены резервные ячейки. Ячейки комплектного распределительного устройства размещены в два ряда.

Питание от трансформатора АТДТНГ-125000/220 (на схеме 1АТ) поступает дальше на подстанции «Северная» и «МГРЭС» 110 кВ, где после понижения распределяется по бытовым потребителям. Также по средней стороне 110 кВ от него запитывается трансформатор ТДН-16000/110-У1 (на схеме 2Т). Потребители обогатительной фабрики получают питание по двум секциям шин от низковольтных обмоток 6 кВ этих трансформаторов. Полные параметры трансформаторов приведены в табл. 1.

Методы и методики

Для дальнейшего математического и компьютерного описания необходимых элементов подстанции произведем соответствующие расчеты.

Расчет подстанции

Выполним расчет подстанции обогатительной фабрики по методике, представленной в [24]. Суммарная расчет-

ная мощность подстанции будет определяться по следующей формуле:

$$S_M = n_c \sqrt{\sum P^2 + \sum Q^2} \text{ (МВА)} \quad (1)$$

где n_c — число секций подстанции; P и Q — активная и реактивная мощности различных групп потребителей, соответственно, МВт и МВАр.

Максимальная нагрузка различных групп потребителей определяется по следующим формулам:

$$P_M = k_3(k_{сн}) \cdot N \cdot S(P) \cdot \cos \varphi \text{ (МВт)}, \quad (2)$$

$$Q_M = P_M \cdot \operatorname{tg} \varphi \text{ (МВАр)},$$

где $k_3(k_{сн})$ — коэффициент загрузки или спроса в нормальном режиме работы для подключенных к секциям шин трансформаторов или двигателей, соответственно; N — число однотипных потребителей, ед.; S — мощность трансформаторов, МВА; P — мощность двигателей, МВт; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности; $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент реактивной мощности.

Расчетные токи в нормальном и послеаварийном (форсированном) режиме работы для высокого и низкого напряжения, соответственно, будут определяться по формулам

$$I_{р.н.вн(нн)} = \frac{S_M \cdot 10^3}{n_b \cdot \sqrt{3} \cdot U_{н1(н2)}} \text{ (А)}, \quad (3)$$

$$I_{р.ф.вн(нн)} = 2 \cdot I_{р.н.вн(нн)} \text{ (А)},$$

где n_b — число вводов; $U_{н1(н2)}$ — высокое и низкое напряжение, соответственно, кВ.

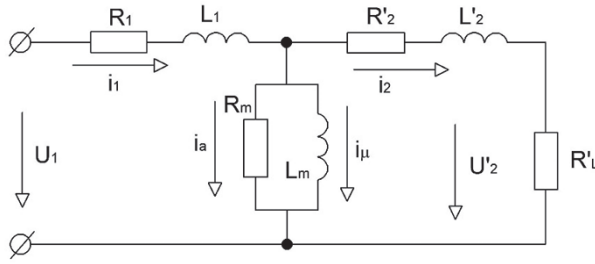


Рис. 3. Т-образная схема замещения силового трансформатора
Fig. 3. T-shaped equivalent circuit of a power transformer

В нормальном режиме работы секционный выключатель отключен, а в послеаварийном режиме работы рабочий ток секционного выключателя будет равняться рабочему току секции:

$$I_{p.ф.св} = I_{p.н.нн} (A). \quad (4)$$

Расчетные токи трансформатора в нормальном и послеаварийном режимах определяются по его низкому напряжению:

$$I_{p.н.т} = \frac{k_3 \cdot S_m}{\sqrt{3} \cdot U_{н2}} (A), \quad (5)$$

$$I_{p.ф.т} = 2 \cdot I_{p.н.т} (A),$$

где k_3 — коэффициент загрузки трансформатора; S_m — мощность трансформатора, кВА; $U_{н2}$ — низкое напряжение трансформатора, кВ.

Номинальную мощность трансформатора выбираем, исходя из условия

$$S_{mn} \geq \frac{S_m}{k_{2ав}} (MBA), \quad (6)$$

где $k_{2ав}$ — наибольший коэффициент перегрузки трансформатора в аварийном режиме, который, как правило, принимается равным 1,4.

Расчет трансформатора

После определения мощности трансформатора можно найти остальные его параметры, которые потребуются для дальнейшего моделирования. Для этого воспользуемся методикой, рассмотренной в [25]. Представим силовой транс-

форматор в виде Т-образной схемы замещения (рис. 3) и рассчитаем параметры по каталожным данным на основе формул для опытов холостого хода и короткого замыкания. На схеме элементы с индексом 1 и 2 относятся к первичной и вторичной обмоткам трансформатора, соответственно. Элементы с индексами a , m и μ характеризуют цепь намагничивания.

Представим пример расчета для трансформатора ТДН-16000/110.

1. Определим сопротивление и индуктивность цепи намагничивания на основе метода холостого хода (ХХ):

$$R_m = \frac{R_{xx}}{Z_{ном}}, L_m = \frac{X_{xx}}{Z_{ном}} (\text{о.е.}), \quad (7)$$

где R_{xx} и X_{xx} — активное и реактивное сопротивления ХХ, Ом, определяемые по формулам

$$R_{xx} = \frac{z_{xx}}{\cos \varphi_{xx}}, X_{xx} = \frac{z_{xx}}{\sin \varphi_{xx}} (\text{Ом}), \quad (8)$$

где $Z_{ном}$ и Z_{xx} — полное сопротивление схемы замещения и полное сопротивление ХХ, Ом, определяемые по формулам

$$z_{xx} = \frac{U_{ном}}{I_{xx}}, z_{ном} = \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} (\text{Ом}), \quad (9)$$

где $\cos \varphi_{xx}$ — коэффициент мощности ХХ, о.е., и S_{xx} — мощность ХХ, ВА, определяются по формулам

$$\cos \varphi_{xx} = \frac{\Delta P_x}{S_{xx}} (\text{о.е.}), S_{xx} = U_{ном} \cdot I_{xx} (\text{ВА}), \quad (10)$$

```

1 - Sn=16000000;
2 - Un=115000;
3 - Ix=0.7;
4 - Px=19000;
5 - Uk=10.5;
6 - Pk=85000;
7 - In=Sn/Un;
8 - Ixx=Ix*In/100;
9 - Sxx=Un*Ixx;
10 - cosxx=Px/Sxx;
11 - sinxx=sqrt(1-cosxx^2);
12 - Zxx=Un/Ixx;
13 - Zn=Un^2/Sn;
14 - Rxx=Zxx/cosxx;

15 - Xxx=Zxx/sinxx;
16 - Rm=Rxx/Zn;
17 - Lm=Xxx/Zn;
18 - Ukz=Uk*Un/100;
19 - Skz=Ukz*In;
20 - Zkz=Ukz/In;
21 - coskz=Pk/Skz;
22 - sinkz=sqrt(1-coskz^2);
23 - Rkz=Zkz*coskz;
24 - Xkz=Zkz*sinkz;
25 - Rl=0.5*Rkz/Zn;
26 - Ll=0.5*Xkz/Zn;
27 - [Rm Lm Rl Ll]
  
```

Рис. 4. Листинг для вычисления обмоточных данных трансформатора

Fig. 4. Listing for calculating transformer winding data

где I_{xx} и $I_{ном}$ — ток XX и номинальный ток, А, определяются по формулам

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{U_{ном}}, I_{xx} = \frac{I_x}{100} \cdot I_{ном} \quad (\text{А}). \quad (11)$$

2. Определим сопротивления и индуктивности обмоток на основе метода короткого замыкания (КЗ):

$$R_1 = R'_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{K3}}{Z_{ном}}, \quad (12)$$

$$L_1 = L'_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_{K3}}{Z_{ном}} \quad (\text{о.е.}),$$

где R_{K3} и X_{K3} — активное и реактивное сопротивление КЗ, Ом, определяемое по формулам

$$R_{K3} = z_{K3} \cdot \cos \varphi_{K3}, \quad (13)$$

$$X_{K3} = z_{K3} \cdot \sin \varphi_{K3} \quad (\text{Ом}),$$

где Z_{K3} и $\cos \varphi_{K3}$ — полное сопротивление КЗ, Ом, и коэффициент мощности КЗ, о.е., определяемые по формулам

$$z_{K3} = \frac{U_{K3}}{I_{ном}} \quad (\text{Ом}), \cos \varphi_{K3} = \frac{\Delta P_{K3}}{S_{K3}} \quad (\text{о.е.}), \quad (14)$$

где U_{K3} — напряжение КЗ, В; S_{K3} — мощность КЗ, ВА, определяются по формулам

$$U_{K3} = \frac{U_K}{100} \cdot U_{ном} \quad (\text{В}), S_{K3} = U_{K3} \cdot I_{ном} \quad (\text{ВА}). \quad (15)$$

Для упрощения вычисления воспользуемся одним из разработанных листингов в среде MatLab (рис. 4) и сведем рассчитанные данные в табл. 2.

Найдем величины и построим графики токов для первичной и вторичной обмоток трансформатора, а также цепи намагничивания, для чего составим систему уравнений на основе схемы замещения (см. рис. 3), которая будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} i_1 \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + i_a \cdot R_m = U \\ L_m \cdot \frac{di_\mu}{dt} = i_a \cdot R_m \\ i'_2 \cdot (R'_2 + R'_L) + L'_2 \cdot \frac{di'_2}{dt} = i_a \cdot R_m \\ i_a = i_1 - i_\mu - i'_2 \end{cases} \quad (16)$$

Таблица 2

Рассчитанные обмоточные данные трансформатора

Calculated winding data of the transformer

Трансформатор	Обмоточные данные, о.е.			
	R_m	L_m	$R_1 = R'_2$	$L_1 = L'_2$
ТДН-16000/110/6	842,1	144,95	0,0027	0,052

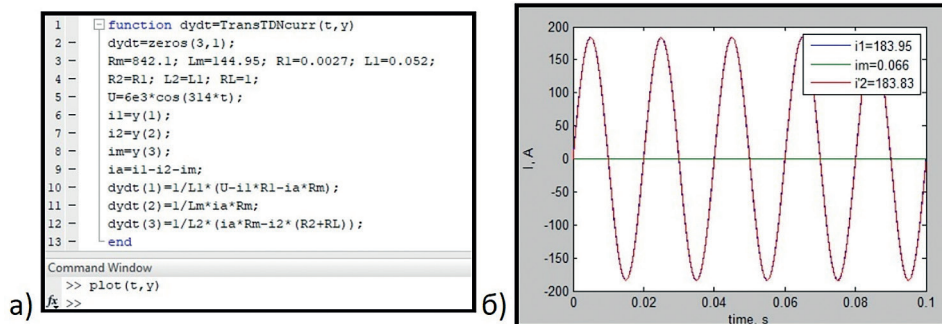


Рис. 5. Листинг для вычисления токов (а) и результаты моделирования в виде графиков (б)
Fig. 5. Listing for calculating currents (a) and simulation results in the form of graphs (b)

Произведем вычисления этой системы уравнений при помощи разработанного листинга в среде MatLab, как показано на рис. 5, а, и покажем результаты в виде графиков, представленных на рис. 5, б, учитывая, что сопротивление нагрузки трансформатора R'_L в относительных единицах равно 1.

Для того чтобы из приведенного значения тока вторичной обмотки i'_2 получить реальное значение тока i_2 , необходимо воспользоваться выражением

$$i_2 = k_{mp} \cdot i'_2 (\text{A}), \quad (17)$$

где $k_{tr} = U_{вн} / U_{нн}$ — коэффициент трансформации.

Модели тока КЗ и разряда молнии

Самыми большими по величине и опасными для электрооборудования являются трехфазные токи короткого замыкания. Расчет токов короткого замыкания для дальнейшего моделирования электроэнергетической системы показан в [26].

Трехфазные токи КЗ для действующей системы электроснабжения можно рассчитать по следующей формуле:

$$i_{ki}^{(3)} = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot Z_{ki}} (\text{A}), \quad (18)$$

где U_0 — номинальное напряжение в соответствующей точке КЗ, В; Z_{ki} — эк-

вивалентное сопротивление сети до соответствующей точки КЗ, которое определяется как

$$Z_{ki} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} (\text{Ом}). \quad (19)$$

Определим величину источника тока молнии по следующей формуле [27]:

$$i(t) = I_m \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_\varphi} \right)^n}{\left(1 + \frac{t}{\tau_\varphi} \right)^n} \cdot e^{\left(\frac{t}{\tau} \right)} (\text{kA}), \quad (20)$$

где $I_m = 20$ — амплитуда тока, кА; $\tau = 4 \cdot 10^{-6}$ — длительность грозового разряда, с; $\varphi = 1 \cdot 10^{-4}$ — длительность импульса тока, с; $n = 5$ — коэффициент максимального значения тока молнии.

Результаты исследования

Используя универсальную модель, подробно описанную в [10], составим модель исследуемой системы электроснабжения, а именно электроснабжения цеха крупного дробления обоганительной фабрики № 3 Мирнинско-Нюрбинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО), которая служит для переработки алмазосодержащего сырья. Такую модель можно считать цифровым двойником электроэнергетической системы, ведь она позволяет изучать все процессы, протека-

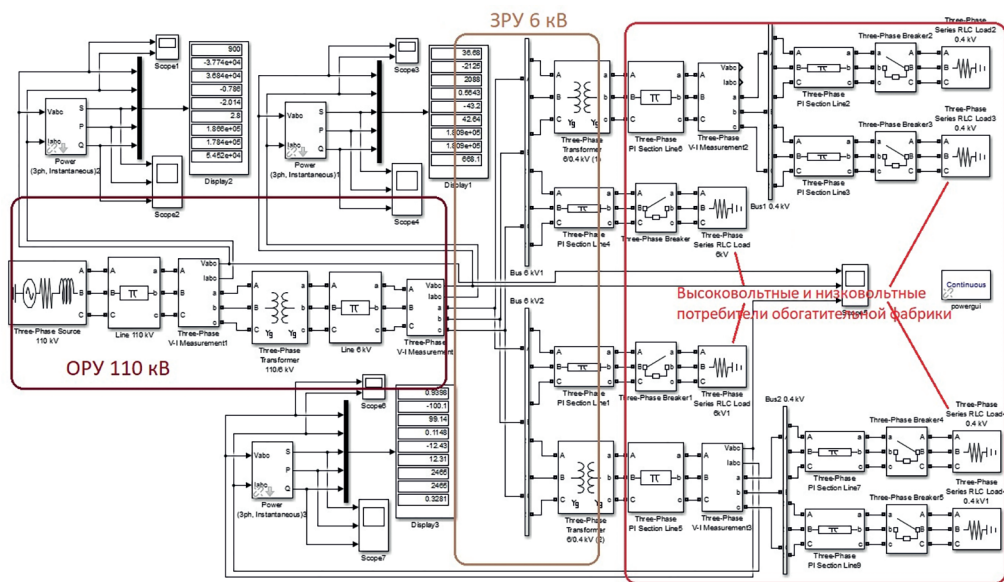


Рис. 6. Компьютерная модель системы электроснабжения цеха крупного дробления обогащательной фабрики

Fig. 6. Computer model of the power supply system of the coarse crushing shop of the processing plant

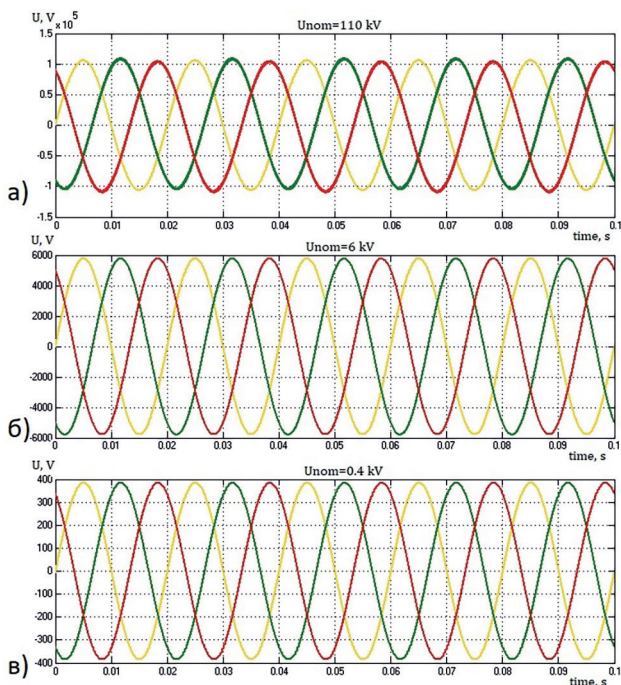


Рис. 7. Результаты моделирования в нормальном режиме работы: напряжение на первичной обмотке трансформатора 110 кВ (а); напряжение на вводе в ЗРУ-6 кВ (б); напряжение на шине 0,4 кВ (в)

Fig. 7. Simulation results in normal operating mode: voltage on the primary winding of a 110 kV transformer (a); voltage at the input to a 6 kV switchgear (b); voltage on the 0.4 kV busbar (v)

ющие в реальной системе, только без каких-либо последствий в аварийных ситуациях.

Модель включает в себя источник питания 110 кВ, который имитирует подачу напряжения от средней обмотки трансформатора АДТНГ-125000/220 на трансформатор ТДН-16000/110, воздушную линию электропередачи 110 кВ, сам трансформатор ТДН-16000/110, кабельную линию 6 кВ, которая приходит на 2 секции шин ЗРУ-6 кВ, ячейки и высоковольтное электрооборудование (двигатели дробилок), а также понижающие трансформаторы ТМ-250/6/0,4 кВ и низковольтное оборудование участка. Полученная модель показана на рис. 6.

Для ускорения процесса моделирования было принято допущение, описывающее нагрузку (потребителей) в чисто активной форме, т.е. индуктивная и емкостная составляющие мощности были приняты равными 0. Также для оптимизации однотипные нагрузки были объединены в один блок.

Результаты моделирования трехфазного напряжения в нормальном режиме работы показаны на рис. 7. Здесь и далее фазы обозначены следующими цветами линий: А — желтая, В — зеленая, С — красная. На графиках видно, что результаты моделирования по величине напряжения практически полностью совпадают с номинальными значениями во всех точках измерения с погрешностью, не превышающей 2%.

Результаты моделирования тока КЗ

Для моделирования режима трехфазного КЗ будем использовать блок Three-Phase Fault, который расположим в трех точках, а именно на входе трансформатора ТДН-16000/110, на участке работы высоковольтного оборудования 6 кВ и на шине 0,4 кВ. Выбираем время искусственного срабатывания блоков КЗ, равное 0,02, с разным интервалом для

различных точек, чтобы они не влияли друг на друга. Результаты моделирования токов при трехфазном КЗ показаны на рис. 8.

Для сравнения токов короткого замыкания с номинальными токами системы примем во внимание, что суммарная мощность установленного электрооборудования цеха крупного дробления обоганительной фабрики составляет 1200 кВт. Тогда коэффициент загрузки трансформатора ТДН-16000/110 составит 0,13 о.е. В этом случае номинальный ток на первичной (110 кВ) и вторичной (6 кВ) обмотках определим по формулам $I_1 = k_{з.тр} \cdot i_1$, $I_2 = k_{з.тр} \cdot i_2$, в результате будем иметь 23,9 А и 438,1 А, соответственно. Номинальный ток на шине 0,4 кВ, исходя из номинального напряжения и суммарной установленной мощности, получим равным 52,6 А.

Из графика на рис. 8, а видно, что трехфазный ток КЗ при напряжении 110 кВ в интервале времени 0,03÷0,05 с превышает 1220 А, что в 50 раз больше, чем номинальное значение. Затем в интервале времени 0,1÷0,12 с наступает период тока КЗ на напряжении 6 кВ, который практически достигает значения 17,1 кА, как показано на рис. 8, б, а также он оказывает влияние на сеть 110 кВ, на рис. 8, а видно увеличение тока системы до 918 А. И, наконец, на рис. 8, в показан ток КЗ в интервале времени 0,16÷0,18 с на напряжении 0,4 кВ, который имеет пиковое значение 7,23 кА, что больше номинала в 137 раз, а также он оказывает незначительное влияние на сети 110 и 6 кВ, как показано на рис. 8, г, д, соответственно.

Также на следующих графиках (см. рис. 9) мы можем увидеть, как ведет себя напряжение в момент возникновения КЗ. Очевидно, что при трехфазном КЗ на своем уровне напряжение будет стремиться к нулю. Здесь стоит отметить поведение сети напряжением 110 кВ,

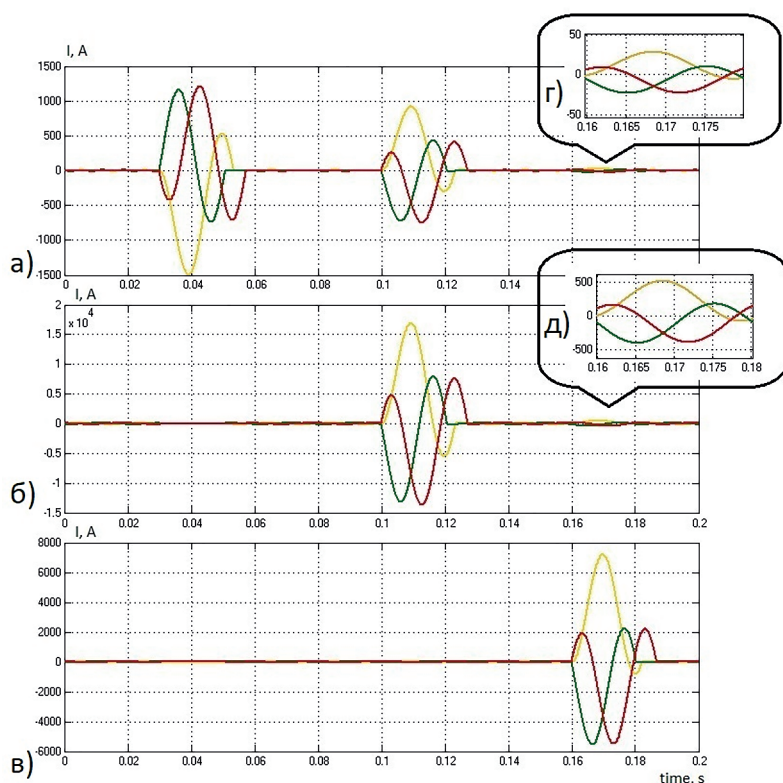


Рис. 8. Результаты моделирования токов при трехфазном коротком замыкании: на входе трансформатора ТДН-16000/110 (а); на участке работы высоковольтного оборудования 6 кВ (б); на шине 0,4 кВ (в); увеличенные формы токов на соответствующих участках (г, д)

Fig. 8. Results of modeling currents during a three-phase short circuit: at the input of the TDN-16000/110 transformer (a); in the section of operation of 6 kV high-voltage equipment (b); on the 0.4 kV bus (v); enlarged current shapes in the corresponding sections (g, d)

в которой в момент КЗ на высоковольтном оборудовании 6 кВ возникает перенапряжение системы (зона в большом овале на рис. 9, а), не стабилизирующееся по фазе В до момента окончания моделирования.

На графике рис. 9, б справа можно увидеть зону (малый овал) незначительного снижения напряжения (менее 5%) при КЗ на одной из шин 0,4 кВ. Это объясняется тем, что мощность электрооборудования на низковольтной секции шин является несопоставимо малой по сравнению с потребителями на напряжение 6 кВ. Таким образом, возникновение короткого замыкания именно в

этой точке приведет к наименьшим нарушениям в работе системы электроснабжения обогатительной фабрики. Однако такие переходные процессы несомненно повлияют на показатели качества электроэнергии [28–30]. На рис. 9, в видно, что в интервалах времени срабатывания КЗ для более высоких уровней напряжения напряжение в сети 0,4 кВ равно 0. Тогда как на вставках (рис. 9, г, д) видно, что для своих уровней напряжения при КЗ стремится к нулю, но не пропадает полностью. Это может быть связано с особенностями работы реальных источников питания и параметров электрической сети.

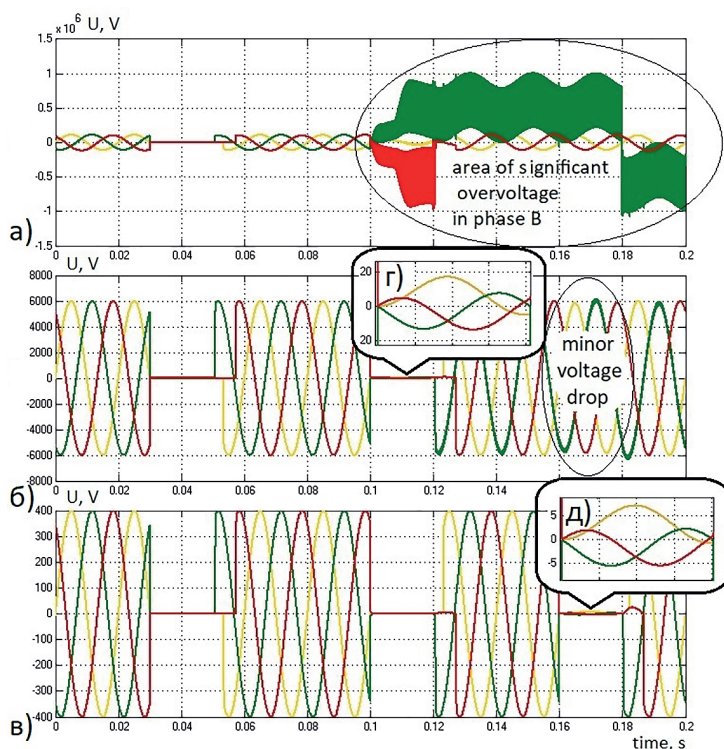


Рис. 9. Результаты моделирования напряжения при трехфазном коротком замыкании: при напряжении 110 кВ, в том числе в овале — зона перенапряжения (а); при напряжении 6 кВ, в том числе в овале — зона незначительного снижения напряжения (б); при напряжении 0,4 кВ (в); увеличенные формы на напряжений на соответствующих участках (г, д)

Fig. 9. Results of voltage modeling for a three-phase short circuit: at a voltage of 110 kV, including an overvoltage zone in the oval (a); at a voltage of 6 kV, including an area of slight voltage drop in the oval (b); at a voltage of 0.4 kV (v); enlarged voltage shapes in the corresponding sections (g, d)

Результаты моделирования удара молнии

Немного модернизировав модель, а именно добавив источник питания 220 кВ, одну из линий электропередачи 220 кВ и трансформатор АТДТНГ-125000/220/110, смоделируем удар молнии в одну из фаз линии Л-211. Фрагмент модернизированной модели показан на рис. 10.

Линия Л-211 идет от подстанции «Районная» и до ОРУ 220 кВ, имеет длину 3,06 км. В качестве проводника линии используется неизолированный сталеалюминиевый провод АС 240/32. Электрическое сопротивление такого провода равно приблизительно 0,1182 Ом/км. Учитываем все эти параметры в модели

и задаем значения силы тока удара молнии и его длительности в блоке Three-Phase Fault.

За величиной и формой трехфазных напряжений и токов на линии 220 кВ, а также на низковольтной обмотке трансформатора 110 кВ будем наблюдать при помощи осциллографов Score1 и Score2. Результаты моделирования представлены на рис. 11.

Для более детальной демонстрации процессов, протекающих в результате удара молнии, и их тщательного анализа рассмотрим однофазные графики с осциллографа Score3, полученные при помощи мультиметра и показанные на рис. 12.

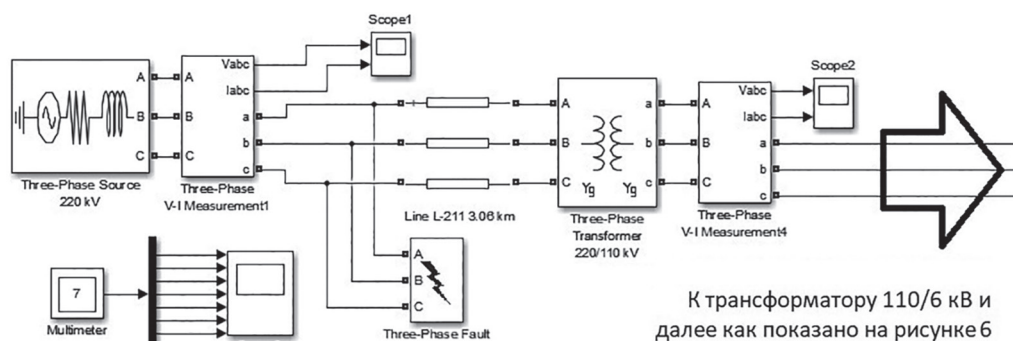


Рис. 10. Фрагмент модернизированной компьютерной модели высоковольтной части системы электроснабжения цеха крупного дробления обогатительной фабрики (на основе рис. 6)

Fig. 10. A fragment of the modernized computer model of the high-voltage part of the power supply system of the coarse crushing shop of the processing plant based on Fig. 6

На рис. 12, *з* видно, что величина тока на фазе В после попадания молнии увеличилась почти до 30 кА (при заданной величине импульса 20 кА), а время его действия составило почти 13 мс (при длительности разряда 0,1 мс). В этот

момент напряжение на фазе В пропадает (рис. 12, *б*, а на фазах А и С (рис. 12, *а*, *в*) возникают колебания и перенапряжение, достигающее 300 кВ, что в целом не превышает предельно допустимого значения по изоляции для данного ти-

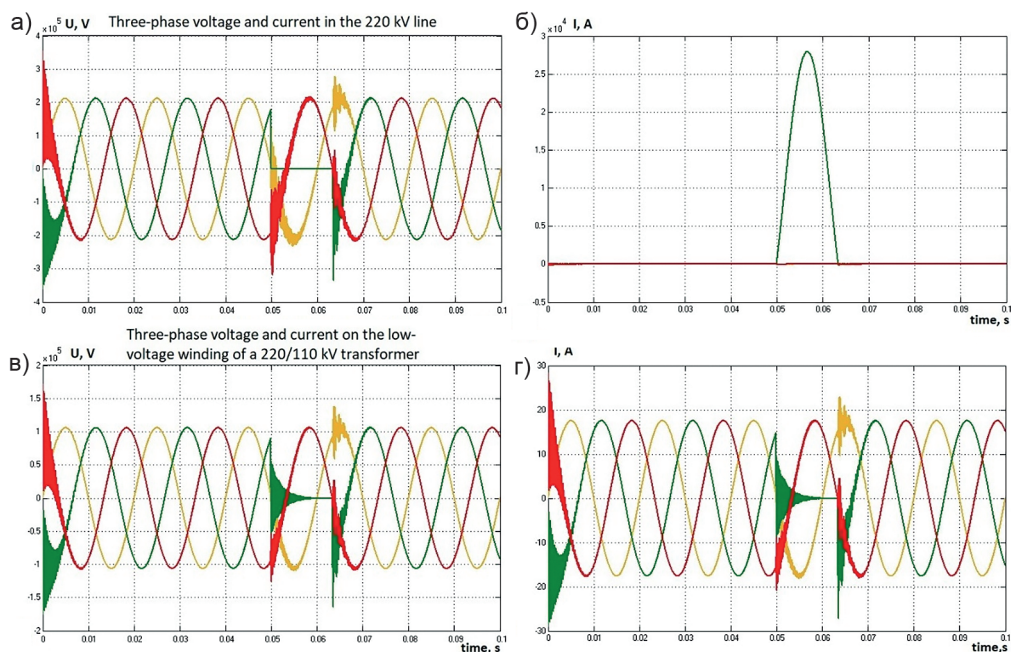


Рис. 11. Результаты моделирования трехфазного напряжения (*а*, *в*) и тока (*б*, *г*) на ОРУ 220/110 кВ при ударе молнии в фазу В линии Л-211: на линии 220 кВ до трансформатора (*а*, *б*); на низковольтной обмотке трансформатора 110 кВ (*в*, *г*)

Fig. 11. Results of modeling three-phase voltage (*a*, *c*) and current (*b*, *d*) at 220/110 kV outdoor switchgear during a lightning strike in phase B of line L-211: on the 220 kV line before the transformer (*a*, *b*); on the low-voltage winding of the 110 kV transformer (*v*, *g*)

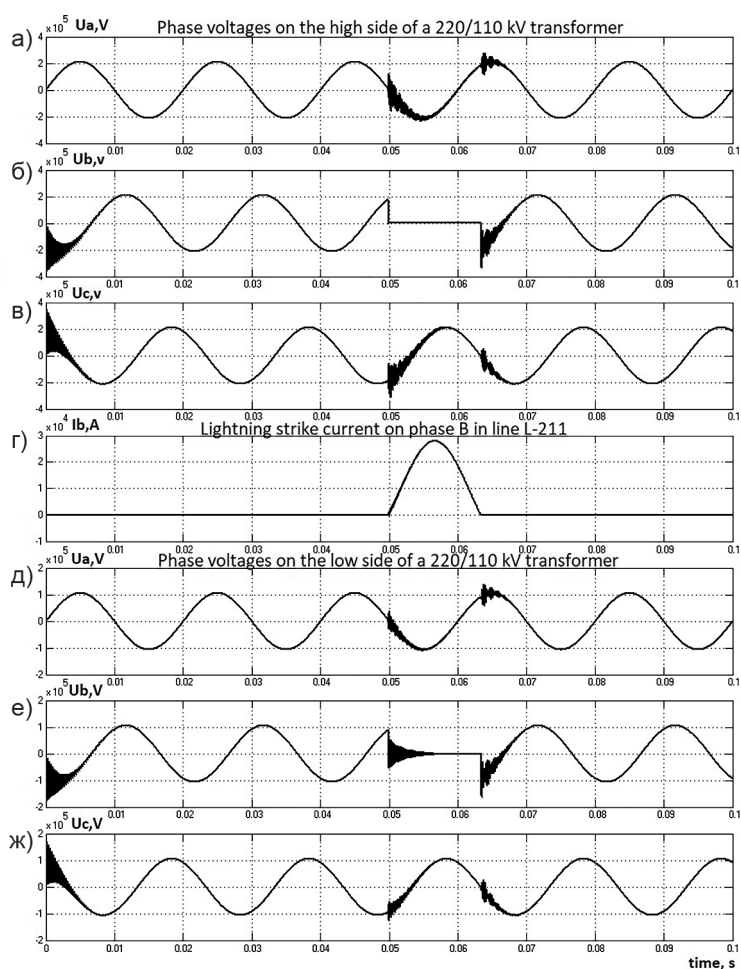


Рис. 12. Те же результаты моделирования, что на рис. 11, представленные с разбивкой по фазам: фазные напряжения на высокой стороне трансформатора 220/110 кВ (а, б, в); ток на фазе В при ударе молнии в линию Л-211 (г); фазные напряжения на низкой стороне трансформатора 220/110 кВ (д, е, ж)
 Fig. 12. The same simulation results as in Fig. 11, presented broken down by phase: phase voltages on the high side of the 220/110 kV transformer (a, b, v); current in phase B during a lightning strike on the L-211 line (g); phase voltages on the low side of the 220/110 kV transformer (d, e, g)

па провода, равного 480 кВ. Далее на рис. 12, д–ж видно, что колебания и небольшое перенапряжение переходят с высшей обмотки трансформатора на низшую, в результате чего возможен пробой изоляции, что может привести к замыканию на корпус, появлению опасных напряжений прикосновения и шага. Хотя в нашем случае величина перенапряжения на обмотках трансформатора со стороны 110 кВ не превышает 15%.

Заключение

В статье приведены результаты исследования нормальных и аварийных режимов работы системы электроснабжения обогатительной фабрики с использованием компьютерного моделирования на примере открытого распределительного устройства 220/110 кВ электрической подстанции «Фабрика-3».

Для моделирования переходных процессов был применен пакет программ

MatLab/Simulink. Созданные и апробированные компьютерные модели позволили рассчитать и построить графики трехфазного напряжения при нормальном режиме работы, а также увидеть и проанализировать электромагнитные переходные процессы, возникающие при аварийных режимах, среди которых были оценены трехфазное КЗ в точках при различном уровне напряжения (110, 6 и 0,4 кВ) и удар молнии в одну из фаз линии электропередачи 220 кВ.

К основным результатам исследования можно отнести следующие выводы:

1. Погрешность при моделировании нормального режима работы не превышает 2% от номинальных значений на соответствующих уровнях, а именно: на стороне 110 кВ трансформатора получили 108 кВ, что составляет 98,2%; на вводе ЗРУ-6 кВ получили 5,92 кВ, что составляет 98,7%; на одной из шин 0,4 кВ получили 385 В, что составляет 101,3%.

2. При моделировании трехфазного короткого замыкания в трех точках системы электроснабжения получены величины токов КЗ и отношения к номинальным значениям, а именно: на стороне 110 кВ трансформатора ток КЗ равен 1224 А, что в 50 раз больше номинала; на секции шин 6 кВ ток КЗ достигает значения 17,1 кА, что в 39 раз выше номинала; на одной из секций шин 0,4 кВ ток КЗ равен 7233 А, что в 137 раз больше номинала.

3. Получены и проанализированы переходные процессы поведения напряжения при коротком замыкании в самих точках КЗ и вне их, а также вне характерных для них уровней. Самое высокое перенапряжение (до 1 МВ) зафиксировано на высокой стороне трансформатора 110 кВ во время короткого замыкания на секции шин 6 кВ. Это связано с тем, что там наблюдается самая высокая величина тока КЗ.

4. При моделировании грозового разряда и удара молнии в фазу Б линии Л-211 получен пиковый ток 29,14 кА с длительностью импульса 13 мс. На соседних фазах зафиксировано перенапряжение до 300 кВ, что в 1,35 раза выше номинала. Также зафиксированы переходные процессы после восстановления питания как на высокой, так и на низкой стороне трансформатора 220/110 кВ.

В заключение следует отметить, что предложенный подход к исследованию работы системы электроснабжения промышленного предприятий в нормальном и аварийном режимах с помощью программной среды MatLab может быть использован для определения токов коротких замыканий и перенапряжений аналогичных распределительных устройств и подстанций, а также оценки эффективности выбора и использования коммутационных аппаратов, средств молниезащиты и устройств автоматики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Riba J. R., Moreno-Eguilaz M., Bogarra S. Energy harvesting methods for transmission lines: a comprehensive review // *Applied Sciences* (Switzerland). 2022, vol. 12, no. 21, article 10699. DOI: 10.3390/app122110699.

2. Li C., Ma J., Jiang Xh., Zhang Zy Energy saving transmission line evaluation based on mechanical and electrical characteristics analysis // *Journal of Physics: Conference Series*. 2023, vol. 2476, no. 1, article 012090. DOI: 10.1088/1742-6596/2476/1/012090.

3. El Hassan M., El Najjar M. B., Mustapha O., Daba J. 220 kV HV transmission line from Deir Ammar to Deir Nbouh in Northern Lebanon // *Energies and Quality Journal*. 2024, vol. 2, pp. 116 – 121. DOI: 10.24084/ej24.350.

4. Nourizadeh H., Mosallanejad A., Setayesh Nazar M. Optimal placement of fixed series compensation and phase shifting transformer in the multi-year generation and transmission expansion planning problem at the pool-based market for maximizing social welfare and reducing the investment costs //

IET Generation, Transmission & Distribution. 2022, vol. 16, no. 15, pp. 2959–2976. DOI: 10.1049/gtd2.12488.

5. Mishra S., Bordin Ch., Wu Q., Manninen H. Resilient expansion planning of virtual power plant with an integrated energy system considering reliability criteria of lines and towers // International Journal of Energy Research. 2022, vol. 46, no. 10, pp. 13726–13751. DOI: 10.1002/er.8093.

6. Kamalov F., Zicmane I., Safaraliev M., Smail L., Senyuk M., Matrenin P. Attention-based load forecasting with bidirectional finetuning // Energies. 2024, vol. 17, no. 18, article 4699. DOI: 10.3390/en17184699.

7. Odinaev I., Pazderin A., Safaraliev M., Kamalov F., Senyuk M., Gubin P. Y. Detection of current transformer saturation based on machine learning // Mathematics. 2024, vol. 12, no. 3, article 389. DOI: 10.3390/math12030389.

8. Awwad A., Al-Soud M., Al-Quteimat A., Ushkarenko O. Simulation-based analysis of dynamics of autonomous electric power systems // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2022, vol. 9, no. 4, pp. 887–896. DOI: 10.18280/mmep.090405.

9. Петров В. Л., Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Моделирование электропотребления обогатительной фабрики // Горный журнал. — 2022. — № 2. — С. 72–76. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.11.

10. Semenov A. S., Semenova M. N., Bebikhov Y. V. Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise / 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE Xplore, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.

11. Hardi S., Wardani Dp., Sinulingga Ep., Idris M. H. The influence of soil two-layer structures on substation safety in lightning strike conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2025, vol. 1463, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/1463/1/012005.

12. Chen T., Yang L., Gu W., Gao H., Zhou Ju., Fu X. Impact of lightning protection grounding system on the ground surface potential of substations // Journal of Physics: Conference Series. 2022, vol. 2148, no. 1, article 012049. DOI: 10.1088/1742-6596/2148/1/012049.

13. Vo Tien D., Thai Huu N., Tran Duy T. Modeling of relay protection of electric power system using Matlab/Simulink // Vietnam Journal of Science and Technology. 2024, vol. 62, no. 2, pp. 346–358. DOI: 10.15625/2525-2518/18250.

14. Utegulov B. Method for determining the single-phase ground fault current in a three-phase electrical network with an isolated neutral / 2019 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE). Istanbul: IEEE Xplore, 2019, pp. 24–27. DOI: 10.1109/ICEEE2019.2019.00012.

15. Zhang R., Yu J., Tang Yi., Ye Yu. Capacity evaluation of central air conditioning load participating in peak shaving of renewable dominated power systems // IET Generation, Transmission & Distribution. 2023, vol. 17, no. 1, pp. 181–199. DOI: 10.1049/gtd2.12672.

16. Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Горлов А. Н., Шакурова З. М., Логачева А. Г. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2021. — Т. 23. — № 3. — С. 3–13. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13.

17. Guo P., Ji Y., Yuan Zh., Zhao Yu., Wu A., Liu G. Single-pole tripped emergency control and multistep power recovery strategy for a symmetric bipolar VSC-HVDC system // IET Generation, Transmission & Distribution. 2022, vol. 16, no. 9, pp. 1756–1767. DOI: 10.1049/gtd2.12395.

18. Lei T., Lv F., Liu J., Feng J. Research on electrical equipment monitoring and early warning system based on internet of things technology // Mathematical Problems in Engineering. 2022, vol. 2022, article 6255277. DOI: 10.1155/2022/6255277.

19. Kulikov A., Loskutov A., Bezdushniy D. Relay protection and automation algorithms of electrical networks based on simulation and machine learning methods // Energies. 2022, vol. 15, no. 18, article 6525. DOI: 10.3390/en15186525.

20. Braide S. L. Examination of gas active arc extinguishing and lightning protection for transmission lines // Journal of Progress in Engineering and Physical Science. 2023, vol. 2, no. 3, pp. 34–66. DOI: 10.56397/jreps.2023.09.07.

21. Шабеганова С. Н. Кластеризация грозových разрядов // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. — 2019. — № 1. — С. 58–69. DOI: 10.25587/SVFU.2019.69.25526.

22. Zhang Zh., Cui W., Niu Sh., Wang C., Xue Ch., Ma X., Liu Sh., Bie Zh. Preventive control of successive failures in extreme weather for power system resilience enhancement // IET Generation, Transmission & Distribution. 2022, vol. 16, no. 16, pp. 3245–3255. DOI: 10.1049/gtd2.12518.

23. Киселев А. Ю., Львов А. П., Назарычев А. Н. Опыт повышения грозоупорности магистральных линий электропередачи // *Электричество*. — 2025. — № 3. — С. 4–15. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-3-4-15.
24. Чеботаев Н. И., Плащанский Л. А. Электрификация горного производства. — М.: Изд-во «Горная книга», 2012. — 135 с.
25. Semenov A. S., Semenova M. N., Bebikhov Y. V. Development of computer models for typical technological installations of a diamond mining underground mine / 2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE Xplore, 2025, pp. 479–484. DOI: 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177305.
26. Al-Jufout S. A. Evaluating the error caused by load ignorance through simulation of short circuit in electrical power systems // *Quality and Reliability Engineering International*. 2008, vol. 24, no. 8, pp. 891–895. DOI: 10.1002/qre.907.
27. Морозов И. Н., Кузнецов Н. М., Белова Л. А., Бороздина Е. Д. Исследование нестационарных режимов электрической подстанции напряжением 110 кВ с использованием имитационного моделирования в среде MatLab // *Вестник Чувашского университета*. — 2020. — № 1. — С. 113–122.
28. Семенов А. С., Бебихов Ю. В., Егоров А. Н., Федоров О. В. Влияние высших гармоник на качество электроэнергии в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий // *Горный журнал*. — 2024. — № 2. — С. 84–91. DOI: 10.17580/gzh.2024.02.14.
29. Ляхомский А. В., Решетняк С. Н., Кутепова Е. Н. Оценка влияния показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2025. — № 6. — С. 168–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_168.
30. Петров В. Л., Пичуев А. В. Оценка эффективности средств повышения качества электроэнергии в системе частотно-регулируемого электропривода скребковых конвейеров // *Горные науки и технологии*. — 2024. — Т. 9. — № 1. — С. 60–69. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-198. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Riba J. R., Moreno-Eguilaz M., Bogarra S. Energy harvesting methods for transmission lines: a comprehensive review. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022, vol. 12, no. 21, article 10699. DOI: 10.3390/app122110699.
2. Li C., Ma J., Jiang Xh., Zhang Zy Energy saving transmission line evaluation based on mechanical and electrical characteristics analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023, vol. 2476, no. 1, article 012090. DOI: 10.1088/1742-6596/2476/1/012090.
3. El Hassan M., El Najjar M. B., Mustapha O., Daba J. 220 kV HV transmission line from Deir Ammar to Deir Nbouh in Northern Lebanon. *Energies and Quality Journal*. 2024, vol. 2, pp. 116–121. DOI: 10.24084/ej24.350.
4. Nourizadeh H., Mosallanejad A., Setayesh Nazar M. Optimal placement of fixed series compensation and phase shifting transformer in the multi-year generation and transmission expansion planning problem at the pool-based market for maximizing social welfare and reducing the investment costs. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2022, vol. 16, no. 15, pp. 2959–2976. DOI: 10.1049/gtd2.12488.
5. Mishra S., Bordin Ch., Wu Q., Manninen H. Resilient expansion planning of virtual power plant with an integrated energy system considering reliability criteria of lines and towers. *International Journal of Energy Research*. 2022, vol. 46, no. 10, pp. 13726–13751. DOI: 10.1002/er.8093.
6. Kamalov F., Zicmane I., Safaraliev M., Smail L., Senyuk M., Matrenin P. Attention-based load forecasting with bidirectional finetuning. *Energies*. 2024, vol. 17, no. 18, article 4699. DOI: 10.3390/en17184699.
7. Odinaev I., Pazderin A., Safaraliev M., Kamalov F., Senyuk M., Gubin P. Y. Detection of current transformer saturation based on machine learning. *Mathematics*. 2024, vol. 12, no. 3, article 389. DOI: 10.3390/math12030389.
8. Awwad A., Al-Soud M., Al-Quteimat A., Ushkarenko O. Simulation-based analysis of dynamics of autonomous electric power systems. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022, vol. 9, no. 4, pp. 887–896. DOI: 10.18280/mmep.090405.

9. Petrov V. L., Kuznetsov N. M., Morozov I. N. Modeling power use at processing plant. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 2, pp. 72 – 76. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.11.
10. Semenov A. S., Semenova M. N., Bebikhov Y. V. Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise. *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi: IEEE Xplore, 2019, pp. 1 – 5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
11. Hardi S., Wardani Dp., Sinulingga Ep., Idris M. H. The influence of soil two-layer structures on substation safety in lightning strike conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025, vol. 1463, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/1463/1/012005.
12. Chen T., Yang L., Gu W., Gao H., Zhou Ju., Fu X. Impact of lightning protection grounding system on the ground surface potential of substations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2148, no. 1, article 012049. DOI: 10.1088/1742-6596/2148/1/012049.
13. Vo Tien D., Thai Huu N., Tran Duy T. Modeling of relay protection of electric power system using Matlab/Simulink. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2024, vol. 62, no. 2, pp. 346 – 358. DOI: 10.15625/2525-2518/18250.
14. Utegulov B. Method for determining the single-phase ground fault current in a three-phase electrical network with an isolated neutral. *2019 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*. Istanbul: IEEE Xplore, 2019, pp. 24 – 27. DOI: 10.1109/ICEEE2019.2019.00012.
15. Zhang R., Yu J., Tang Yi., Ye Yu. Capacity evaluation of central air conditioning load participating in peak shaving of renewable dominated power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023, vol. 17, no. 1, pp. 181 – 199. DOI: 10.1049/gtd2.12672.
16. Abdullazyanov E. Yu., Gracheva E. I., Gorlov A. N., Shakurova Z. M., Logacheva A. G. Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021, vol. 23, no. 3, pp. 3 – 13. [In Russ]. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13.
17. Guo P., Ji Y., Yuan Zh., Zhao Yu., Wu A., Liu G. Single-pole tripped emergency control and multistep power recovery strategy for a symmetric bipolar VSC-HVDC system. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2022, vol. 16, no. 9, pp. 1756 – 1767. DOI: 10.1049/gtd2.12395.
18. Lei T., Lv F., Liu J., Feng J. Research on electrical equipment monitoring and early warning system based on internet of things technology. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022, vol. 2022, article 6255277. DOI: 10.1155/2022/6255277.
19. Kulikov A., Loskutov A., Bezdushniy D. Relay protection and automation algorithms of electrical networks based on simulation and machine learning methods. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 18, article 6525. DOI: 10.3390/en15186525.
20. Braide S. L. Examination of gas active arc extinguishing and lightning protection for transmission lines. *Journal of Progress in Engineering and Physical Science*. 2023, vol. 2, no. 3, pp. 34 – 66. DOI: 10.56397/jpeps.2023.09.07.
21. Shabaganova S. N. Clustering of lightning discharges. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2019, no. 1, pp. 58 – 69. [In Russ]. DOI: 10.25587/SVFU.2019.69.25526.
22. Zhang Zh., Cui W., Niu Sh., Wang C., Xue Ch., Ma X., Liu Sh., Bie Zh. Preventive control of successive failures in extreme weather for power system resilience enhancement. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2022, vol. 16, no. 16, pp. 3245 – 3255. DOI: 10.1049/gtd2.12518.
23. Kiselev A. Yu., L'vov A. P., Nazarychev A. N. Experience in lightning-resistance improvement for main power-transmission lines. *Russian Electrical Engineering*. 2025, no. 3, pp. 4 – 15. [In Russ]. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-3-4-15.
24. Chebotaev N. I., Plashchanskiy L. A. *Elektrifikatsiya gornogo proizvodstva* [Electrification of mining production], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 135 p.
25. Semenov A. S., Semenova M. N., Bebikhov Y. V. Development of computer models for typical technological installations of a diamond mining underground mine. *2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi: IEEE Xplore, 2025, pp. 479 – 484. DOI: 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177305.
26. Al-Jufout S. A. Evaluating the error caused by load ignorance through simulation of short circuit in electrical power systems. *Quality and Reliability Engineering International*. 2008, vol. 24, no. 8, pp. 891 – 895. DOI: 10.1002/qre.907.

27. Morozov I., Kuznetsov N., Belova L., Borozdina E. Transient modes of 110 kV electrical substations using simulation modeling in a MatLab environment. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2020, no. 1, pp. 113–122. [In Russ].

28. Semenov A. S., Bebikhov Y. V., Egorov A. N., Fedorov O. V. Effect of higher harmonics on electric power quality in supply systems in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 2, pp. 84–91. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.02.14.

29. Lyakhomsky A. V., Reshetnyak S. N., Kutepova E. N. Influence of power quality factors on performance efficiency of electrotechnical systems of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 6, pp. 168–180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_168.

30. Petrov V. L., Pichuev A. V. Assessing the efficiency of measures to enhance electric power quality in variable-frequency drive for scraper conveyors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, vol. 9, no. 1, pp. 60–69. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-198.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семёнов Александр Сергеевич — д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра РАН, e-mail: sash-alex@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0001-9940-3915,

Семёнова Мария Николаевна¹ — канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: mariya_semyonova86@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7298-0226,

Бebikhov Юрий Владимирович¹ — д-р физ.-мат. наук, доцент, e-mail: bebikhov.yura@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8366-4819,

Якушев Илья Анатольевич¹ — канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: yakushevilya@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2539-7334,

¹ Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном.

Для контактов: Семёнов А.С., e-mail: sash-alex@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Semenov, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor, Institute Molecules and Crystals Physics of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, 450054, Russia, e-mail: sash-alex@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0001-9940-3915,

M.N. Semenova¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor, e-mail: mariya_semyonova86@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7298-0226,

Yu.V. Bebikhov¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor, e-mail: bebikhov.yura@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8366-4819,

I.A. Yakushev¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor, e-mail: yakushevilya@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2539-7334,

¹ Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in Mirny, Mirny, 678174, Russia.

Corresponding author: A.S. Semenov, e-mail: sash-alex@yandex.ru.

Получена редакцией 25.04.2026; получена после рецензии 25.05.2026; принята к печати 10.08.2026.

Received by the editors 25.04.2026; received after the review 25.05.2026; accepted for printing 10.08.2026.