

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Гуринов Э.Д., Козлов А.Д., Семёнова М.Н.

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск,
Россия*

Ключевые слова: компьютерное моделирование, MatLab, режимы работы, система электроснабжения, трансформаторная подстанция.

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос компьютерного моделирования режимов работы электроэнергетической системы промышленного предприятия на примере открытого распределительного устройства 220/110 кВ электрической подстанции «Фабрика-3». Для моделирования переходных процессов была выбрана программная среда MatLab, приложение Simulink, а именно библиотека блоков SimPowerSystems. Предложены результаты разработки компьютерных моделей в среде MatLab, позволяющих производить расчеты обмоточных данных трансформатора, находить токи в Т-образной схеме замещения трансформатора, определять напряжения на всех уровнях при нормальном режиме работы. В результате получили практически полное совпадение смоделированных данных с номинальными значениями во всех точках измерения с погрешностью, не превышающей 2%.

COMPUTER MODELING OF OPERATING MODES OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

Gurinov E.D., Kozlov A.D., Semenova M.N.

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Keywords: computer modeling, MatLab, operating modes, power supply system, transformer substation.

Abstract. This article examines computer modeling of the operating modes of an industrial power system using the example of the 220/110 kV outdoor switchgear of the Fabrika No. 3 electrical substation. MatLab software, including the Simulink application and the SimPowerSystems block library, were used to model transient processes. The article presents the results of developing computer models in MatLab that enable calculations of transformer winding data, determination of currents in a transformer T-equivalence circuit, and determination of voltages at all levels during normal operation. The results demonstrate near-perfect agreement between the modeled data and the nominal values at all measurement points, with an error of no more than 2%.

Введение. Ключевая задача электросетевого комплекса – совершенствование технологий передачи электрической энергии (ЭЭ) для обеспечения ее надежности, безопасности и экономической эффективности [1, 2]. Проектирование новых систем, реконструкция существующих и изучение работы действующих электроэнергетических систем (ЭЭС) требуют решения ряда задач, связанных с расчетом переходных процессов и режимов работы как отдельных компонентов электрической сети (ЭС), так и ЭЭС в целом [3-5]. К таким задачам относятся следующие типовые: расчет нагрузок и токов в электрических сетях, анализ устойчивости, анализ режимов короткого

замыкания (КЗ) в сети, анализ электромагнитных переходных процессов [6]. Для решения вышеупомянутых задач в данной работе использовался программный пакет MatLab с приложением Simulink, в частности библиотека моделирования SimPowerSystems [7, 8]. Для создания конкретной модели, содержащей необходимое первичное силовое оборудование электроэнергетической системы, была использована универсальная модель, разработанная и протестированная авторами в более раннем исследовании [9].

Цель исследования – изучить режимы работы электроэнергетической системы промышленного предприятия с помощью компьютерного моделирования. В частности, рассматривается трансформаторная подстанция (ТП) 220/110/6 кВ, снабжающая электроэнергией завод по переработке алмазосодержащего сырья (ЗПАС).

Объект и методы. Схема внешнего электроснабжения исследуемой подстанции представлена на рисунке 1.

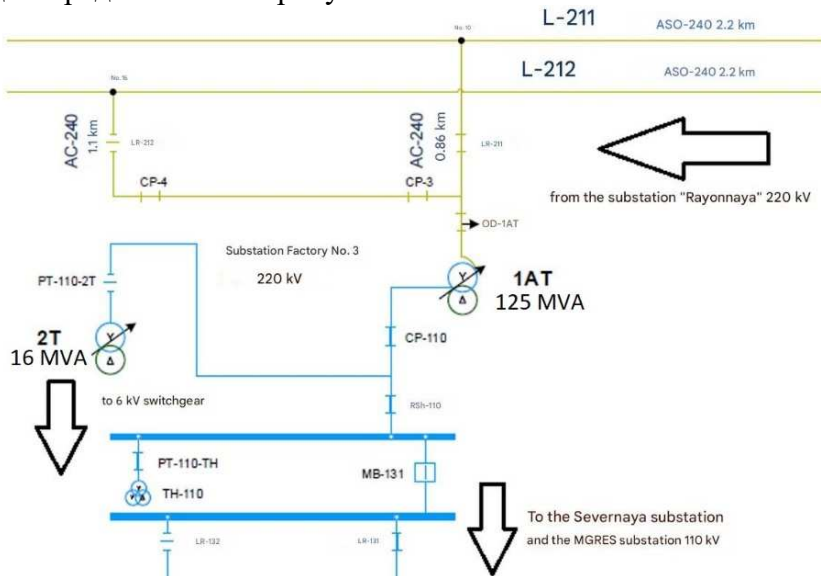


Рис. 1. Схема электроснабжения подстанции «Фабрика № 3»

Подстанция «Фабрика № 3» получает питание от подстанции «Районная» по линиям электропередачи напряжением 220 кВ (ЛЭП) (Л-211, Л-212). На стороне 220/110 кВ используется открытое распределительное устройство (ОРУ), в котором установлен автотрансформатор ATDTNG-125000 и силовой трансформатор TDN-16000. Для дальнейшего математического и компьютерного описания необходимых компонентов подстанции были рассчитаны их мощности и токи, а параметры трансформаторов — с использованием каталожных данных и формул для испытаний на холостом ходу и при коротком замыкании. Была использована ранее разработанная универсальная компьютерная модель, имитирующая работу промышленной энергосистемы [9]. Результаты моделирования были получены для нормальных режимов работы, а также для аварийных (короткое замыкание, внешнее перенапряжение) и послеаварийных режимов.

Результаты исследования. Зная номинальную мощность трансформатора и другие его характеристики, мы можем рассчитать остальные параметры, необходимые для дальнейшего моделирования. Представим силовой трансформатор в виде Т-образной эквивалентной схемы (рис. 2) и рассчитаем параметры на основе каталожных данных и формул для испытаний холостого хода и короткого замыкания. Рассмотрим пример расчета для трансформатора ТДН-16000/110.

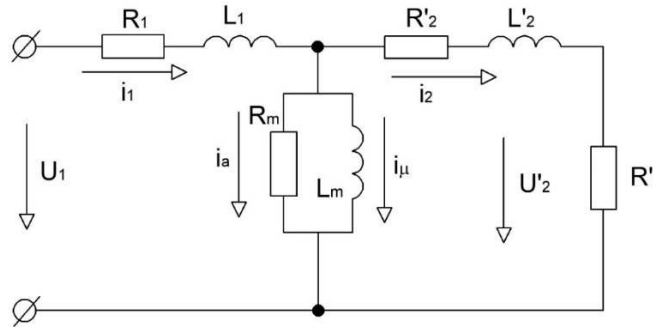


Рис. 2. Т-образная эквивалентная схема силового трансформатора

Чтобы упростить расчет, воспользуемся одним из разработанных листингов в среде MatLab (рис. 3) и сведем расчетные данные в таблицу 1. Далее с помощью разработанного листинга в среде MatLab найдем значения и построим графики токов для первичной и вторичной обмоток трансформатора, а также цепи намагничивания, как показано на рисунке 4, а, и представим результаты в виде графиков на рисунке 4, б.

```

1 Sn=16000000;
2 Un=115000;
3 Ix=0.7;
4 Pk=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*sinxz;
25 Rl=0.5*Rkz/Zn;
26 Ll=0.5*Xkz/Zn;
27 [Rm Lm Rl Ll]

```

Command Window

ans =

842.1053	144.9582	0.0027	0.0524
----------	----------	--------	--------

Рис. 3. Листинг расчета параметров обмотки трансформатора

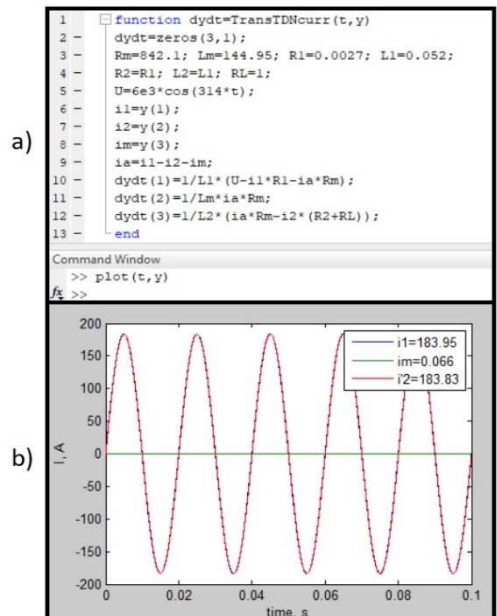


Рис. 4. Листинг расчета токов (а) и результаты моделирования в виде графиков (б)

Табл. 1. Расчетные данные по обмотке трансформатора

Марка	Данные, р.у.			
	R_m	L_m	$R_1 = R'_2$	$L_1 = L'_2$
ТДН-16000/110/6	842,1	144,95	0,0027	0,052

Разработанная универсальная компьютерная модель, показанная на рисунке 5 [9], может имитировать работу любой электроэнергетической системы промышленного предприятия при правильной компоновке соответствующих блоков.

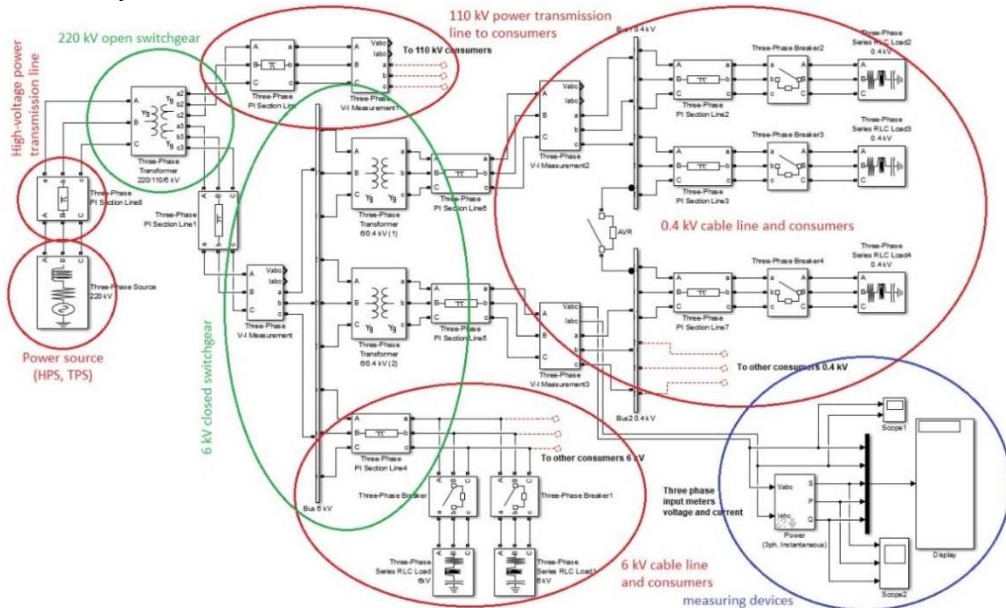


Рис. 5. Универсальная компьютерная модель системы электроснабжения промышленного предприятия

Используя универсальную модель, мы создадим модель конкретной системы электроснабжения, а именно цеха крупного дробления обогатительной фабрики №3, которая перерабатывает алмазоносное сырье. Эту модель можно считать цифровым двойником его электроэнергетической системы. Модель включает в себя источник питания 110 кВ, который имитирует подачу напряжения от средней обмотки трансформатора ATDTNG-125000/220 к трансформатору TDN-16000/110, воздушную линию электропередачи 110 кВ, сам трансформатор TDN-16000/110, кабельную линию 6 кВ, ячейки и высоковольтное электрооборудование, а также понижающие трансформаторы и низковольтное оборудование объекта. Результаты моделирования трехфазного напряжения в нормальном режиме работы показаны на рисунке 6. Здесь фазы обозначены следующими цветами линий: А – желтый, В – зеленый, С – красный. Графики показывают, что результаты моделирования значений напряжения практически полностью совпадают с номинальными значениями во всех точках измерения с погрешностью не более 2%.

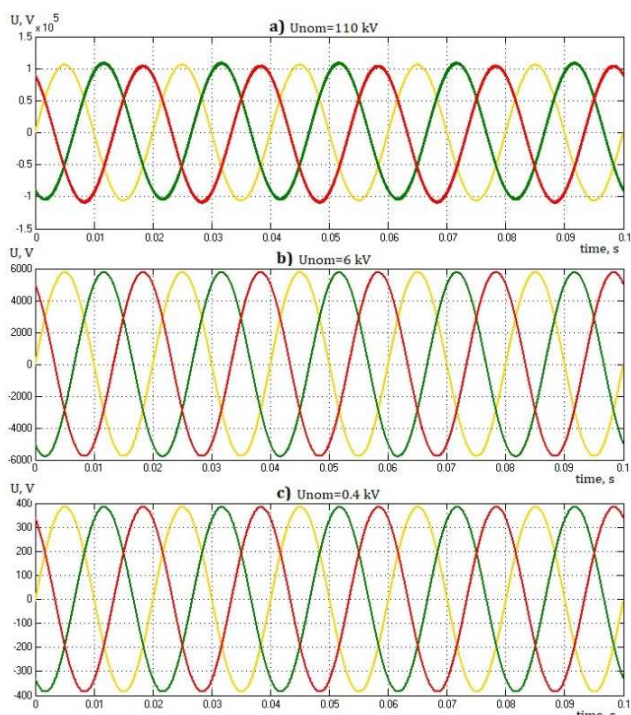


Рис. 6. Результаты моделирования в нормальном режиме работы: а) напряжение на первичной обмотке трансформатора 110 кВ, б) напряжение на входе в распределительное устройство 6 кВ, в) напряжение на шине 0,4 кВ

Закключение. Предложенный подход к изучению различных режимов работы электроэнергетической системы с использованием программного пакета MatLab может быть использован для выявления опасных точек короткого замыкания и источников внешних перенапряжений (ударов молнии) на аналогичных подстанциях, а также для оценки эффективности использования средств релейной защиты и автоматики.

Финансирование и благодарности. Работа выполнена при поддержке «Сириуса». Лето: начини свой проект. Сезон 2025/2026, руководитель М. Семенова, наставники Е. Гуринов и А. Козлов. В работе приняли участие школьники М. Амонов, А. Кугушев, Р. Суярков и А. Якушева.

Список литературы / References

1. Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., Fedorov O.V. Feasibility of Energy Sector Development and Optimization Program of the Republic of Sakha (Yakutia) // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020, vol. 753, p. 082033. DOI: 10.1088/1757-899X/753/8/082033.
2. Volotkovskaya Y., Volotkovskaya N., Semenov A., Semkova A., Fedorov O., Vladimirov O. Analysis of the global energy resource market // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 178, p. 01058. DOI: e3sconf/202017801058.
3. Semenov A.S. Analyzing Impacts of Higher Harmonics on Electricity Quality Parameters at Mining Facilities // 2024 International Conference on Industrial

- Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2024, pp. 321-325. DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553771.
4. Egorov A.N., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Sigaenko A.A. Assessment of energy efficiency of the modernized main fan unit for an underground mine // International Journal of Energy for a Clean Environment. 2019, vol. 20, is. 2, pp. 153-165. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019026505.
 5. Semenov A.S., Yakushev I.A., Kharitonov Ya.S., Shevchuk V.A., Gracheva E.I., Ilyashenko S.B. Calculation of Load Diagrams and Static Characteristics of Multimotor Electric Drive Systems using the Methods of Equivalent Forces and Reduced Moments // International Journal of Technology. 2020, vol. 11, is. 8, pp. 1537-1546. DOI: 10.14716/ijtech.v11i8.4541.
 6. Semenov A., Volotkovskaya N., Bebikhov Y., Yakushev I., Fedorov O., Gracheva E. Analysis of the efficiency of development scenarios for the energy complex of the North-East of Russia // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021, vol. 141, pp. 231-240. DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4_26.
 7. 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). 2025, pp. 479-484. DOI: 10.1109/RusAutoCon65989.2025.11177305.
 8. Semenov A.S. Practice of Effective Using Variable-Frequency Drives in the Mining Industry Process Units // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021, pp. 270-274. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446364.
 9. 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). 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.

Гуринов Эрчим Дмитриевич – студент	Gurinov Erchim Dmitrievich – student
Козлов Андрей Дмитриевич – студент	Kozlov Andrey Dmitrievich – student
Семёнова Мария Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент	Semenova Mariya Nikolaevna – candidate of physico-mathematical sciences, associate professor
mariya_semyonova86@mail.ru	

Received 25.03.2026