УДК 621.314:519.21:004

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

¹Бebikhov Ю.В., ²Волотковская Н.С., ²Семёнова М.Н.¹ООО «ИТВС», Мирный, e-mail: bebikhovyura@mail.ru;²МПИИ (ф) СВФУ, Мирный, e-mail: volotkovska_n@mail.ru, mariya_semyonova86@mail.ru

Данная статья посвящена вопросам определения токов короткого замыкания в системе электроснабжения одного из участков промышленного предприятия методом математического моделирования в среде MatLab. Описаны требования, предъявляемые к системам электроснабжения промышленных предприятий. Выбран участок на промышленном предприятии – компрессорная станция, имеющая радиальную схему электроснабжения. Приведена однолинейная схема электроснабжения, перечень оборудования компрессорной станции, математическая модель для определения токов короткого замыкания. Модель была разработана в приложении SimPowerSystems пакета программ MatLab, который является в настоящее время одним из наиболее популярных инструментов численных расчетов и применяется в различных областях знаний. Для подтверждения работоспособности собранной математической модели сначала произведены измерения в нормальном режиме работы. Такие параметры, как полная, активная и реактивная мощности, напряжение и ток, практически полностью соответствуют рассчитанным значениям с погрешностью менее 3%. Для имитации режима короткого замыкания в системе электроснабжения использовался блок Three-Phase Fault. Получены графические и численные результаты моделирования режима короткого замыкания, которые подтверждают произведенные ранее расчеты с относительной погрешностью смоделированных и расчетных значений не более 10%.

Ключевые слова: система электроснабжения, токи короткого замыкания, математическое моделирование, программа MatLab, погрешность

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING FOR THE STUDY OF THE MODES OF ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

¹Bebikhov Yu.V., ²Volotkovskaya N.S., ²Semenova M.N.¹Ltd. Heat and Water Supply Company, Mirny, e-mail: bebikhovyura@mail.ru;²Polytechnic Institute (branch), North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Mirny, e-mail: volotkovska_n@mail.ru, mariya_semyonova86@mail.ru

This article is devoted to the issues of determining short-circuit currents in the power supply system of one of the sections of an industrial enterprise by the method of mathematical modeling in the MatLab environment. The requirements for power supply systems of industrial enterprises are described. A site was selected at an industrial enterprise – a compressor station with a radial power supply circuit. A single-line power supply scheme, a list of equipment at a compressor station, a mathematical model for determining short-circuit currents are given. The model was developed in the SimPowerSystems application of the MatLab software package, which is currently one of the most popular tools for numerical calculations and is used in various fields of knowledge. To confirm the efficiency of the collected mathematical model, first measurements were made in normal operation. Such parameters as full, active and reactive power, voltage and current almost completely correspond to the calculated values with an error of less than 3%. To simulate a short circuit mode in the power supply system, a Three-Phase Fault unit was used. Graphic and numerical results of the simulation of a short circuit mode were obtained, which confirm the previously performed calculations with a relative error of the modeled and calculated values of no more than 10%.

Keywords: power supply system, short circuit currents, mathematical modeling, MatLab program, error

Требования, предъявляемые к электроснабжению предприятий, зависят от их величины и потребляемой ими мощности. Система электроснабжения предприятия состоит из питающих, распределительных, трансформаторных и преобразовательных подстанций и связывающих их кабельных, воздушных сетей и токопроводов напряжением до 1000 В и свыше 1000 В [1, 2].

Система электроснабжения строится таким образом, чтобы все её элементы постоянно находились под нагрузкой. «Холодный» резерв в линиях электропередачи и трансформаторах не применяется. При таком режиме работы уменьшаются потери

электроэнергии и повышается надежность, так как долго находившийся в бездействии «холодный» резервный элемент может при его включении отказать в работе вследствие каких-либо неисправностей, оказавшихся незамеченными [3, 4]. Так называемый «скрытый» резерв предусматривается в самой схеме электроснабжения, которая при послеаварийном режиме должна быть в состоянии принять на себя нагрузку временно выбывшего элемента путем перераспределения её между оставшимися в работе частями сети с использованием перегрузочной способности электрооборудования [5, 6].

Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения оборудования компрессорной станции

Рис. 2. Математическая модель системы электроснабжения компрессорной станции

Схемы распределения электроэнергии строятся по ступенчатому принципу. Число «ступеней» определяется потребляемой мощностью и размещением электрических нагрузок на территории предприятия. На средних (по мощности) предприятиях применяются радиальные схемы кабельных сетей напряжением 6 кВ. Радиальные схемы распределения электроэнергии применяются главным образом в тех случаях, когда потребители расположены в различных направлениях от центра питания [7, 8].

Исходя из вышеизложенных условий, для примера определения токов короткого замыкания (КЗ) в системе электроснабжения путем математического моделирования, выбираем систему электроснабжения компрессорной станции рудника, которая строится по радиальной схеме электроснабжения посредством кабельных линий электропередачи. Однолинейная схема электроснабжения компрессорной станции приведена на рис. 1. Параметры потребителей компрессорной станции приведены в табл. 1.

Материалы и методы исследования

Для определения токов короткого замыкания в системе электроснабжения компрессорной станции методом математического моделирования на основе проведенных ранее расчетов разработана модель, реализованная с помощью пакета программ MatLab. В настоящее время известно много программных продуктов для математического моделирования технических систем. Среди классических математических пакетов, таких как Mathcad, Maple, Mathematica, особое место занимает пакет программ MatLab [9, 10]. Данный пакет предназначен для моделирования и исследования статических и динамических систем в широком понимании этого термина, включая и дискретные, и непрерывные, и гибридные модели [8]. Приложение Simulink, входящее в состав среды MatLab и представляющее собой библиотеку блоков, является в настоящее время одним из наиболее популярных инструментов численных расчетов и применяется в различных областях знаний [11, 12].

Результаты исследования и их обсуждение

Разработанная модель имитирует работу системы электроснабжения и состоит из следующих основных блоков: источник трехфазного переменного напряжения (Three-Phase Source); трехфазный трансформатор (Three-Phase Transformer); трехфазная нагрузка (Three-Phase Series Load); трехфазный измерительный блок тока и напряжения (Three-Phase V-I Measurement); выключатель (Breaker); осциллограф (Scope); трехфазный измеритель активной и реактивной мощности (Three-Phase Active & Reactive Power); блок трехфазного короткого замыкания (Three-Phase Fault). Для создания модели выполняем расстановку блоков на схеме в определенной последовательности, задаем их рассчитанные параметры [13, с. 67], соединяем блоки между собой и устанавливаем параметры расчета модели в целом (рис. 2).

Для подтверждения работоспособности собранной математической модели производим измерения сначала в нормальном режиме работы. Снимаем показания с осциллографа Scope5, задействованного на участке работы высоковольтного оборудования – компрессоров. Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что такие параметры, как полная, активная и реактивная мощности, напряжение и ток, практически полностью соответствуют ранее рассчитанным значениям с погрешностью менее 3% [14, 15].

Для имитации режима короткого замыкания используется блок Three-Phase Fault, расположенный в двух точках K1 и K2: на участке работы высоковольтного и низковольтного оборудования соответственно. Выбираем время искусственного срабатывания блоков КЗ, равное 0,4 и 0,2 с для точек K1 и K2 соответственно. Результаты измерения токов при коротком замыкании представлены на рис. 4 и 5.

Таблица 1

Параметры потребителей компрессорной станции

№	Потребитель	Кол-во	U, кВ	P, кВт	Q, кВАр
1	Компрессор	4	6	750	562
2	Вентилятор	4	0,4	20	15
3	Электронагреватель	4	0,4	6,6	4,9
4	Мостовой кран	2	0,4	10,5	7,8
5	Насос	4	0,4	6,3	4,7
6	Освещение	21	0,4	0,4	0,3

Рис. 3. Графики изменения во времени: S – полной мощности, ВА; P – активной мощности, Вт; Q – реактивной мощности, ВАР; U_{abc} – напряжения на фазах А, В, С соответственно, В; I_{abc} – фазного тока, А

Рис. 4. Трёхфазный ток короткого замыкания в точке К1

На первом графике (рис. 4) наблюдается постепенное нарастание тока КЗ. Своего максимального значения ток трёхфазного короткого замыкания в точке К1 достигает спустя 180 мс. Тогда как на втором графике

(рис. 5) видно, что уже спустя 100 мс ток КЗ в точке К2 превышает 8 кА. Полученная информация может быть полезна при выборе аппаратов защиты и времени срабатывания уставки.

Рис. 5. Трехфазный ток короткого замыкания в точке К2

Для подтверждения корректности определения токов КЗ при помощи математического моделирования проведем сопоставление с ранее рассчитанными параметрами и вычислим относительную погрешность. Внесем в табл. 2 параметры рассчитанного и смоделированного токов короткого замыкания в двух точка.

Таблица 2
Сопоставление токов короткого замыкания

Точки короткого замыкания	Расчетные данные	Данные модели
	$I_k^{(3)}, A$	$I_k^{(3)}, A$
K1	10090	10870
K2	9930	10145

Рассчитаем процент относительной погрешности для точек короткого замыкания К1 и К2 соответственно по следующей формуле:

$$\Delta I_{K3} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta I_{K1} = \frac{10870 - 10090}{10870} \cdot 100\% = 7,1\%,$$

$$\Delta I_{K2} = \frac{10145 - 9930}{10145} \cdot 100\% = 2,1\%.$$

Закключение

В результате проделанной работы были определены токи трехфазного короткого замыкания в системе электроснабжения компрессорной станции методом математического моделирования. Разработанная математическая модель подтвердила свою работоспособность благодаря выявленной относительной погрешности менее 10% между рассчитанными и смоделированными

ми параметрами. Разработанную математическую модель можно применять на других подобных по своей структуре участков систем электроснабжения, имеющих в своем составе как высоковольтное, так и низковольтное оборудование.

Список литературы

1. Голубцов Н.В., Федоров О.В. Эффективное управление пусконаладочными процессами на электростанции с использованием ранжирования работ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 3–4. С. 11–22. DOI: 1998-9903-2018-20-3-4-11-22.
2. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей: монография. М.: Русайнс, 2017. 168 с.
3. Михеев Г.М., Иванова Т.Г., Турдиев А.Х., Федоров О.В. Целесообразность определения температуры вспышки трансформаторного масла в период текущей эксплуатации // Промышленная энергетика. 2018. № 2. С. 47–49.
4. Kuznetsov N.M., Semenov A.S., Bebihov Yu.V., Rybnikov A.V. Results of monitoring of indicators of electric power quality of underground mine consumers. Gornyi Zhurnal. 2014. № 1. P. 23–26.
5. Fedorov O.V. Expedient forecasting of power consumption // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). 2017. P. 8076221. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076221.
6. Шпиганович А.А., Федоров О.В., Пушница К.А., Чуркина Е.В. Моделирование коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения металлургических производств // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 726–731. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-726-731.
7. Шпиганович А.А., Пушница К.А., Чуркина Е.В., Федоров О.В. Особенности функционирования систем электроснабжения предприятий черной металлургии // Черные металлы. 2017. № 5. С. 56–61.
8. Semenov A.S., Kuznetsov N.M. An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine. Measurement Techniques. 2014. V. 57. is. 4. P. 417–420. DOI: 10.1007/s11018-014-0470-8.
9. Семёнов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 8. С. 56–64.
10. Петрова М.Н., Семёнов А.С. Математическое моделирование переходных процессов в электромеханических

системах // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3–2. С. 312–314.

11. Семёнова М.Н., Семёнов А.С. Исследование системы электроснабжения методом структурного моделирования // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. С. 341–344.

12. Семёнов А.С., Хубиева В.М., Кугушева Н.Н. Моделирование режимов работы систем электроснабжения горных предприятий: монография. М.: Издательство «Перо», 2015. 100 с.

13. Semenov A.S., Khubieva V.M., Kharitonov Y.S. Mathematical Modeling of Static and Dynamic Modes DC Motors in

Software Package MATLAB // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501666.

14. Semenov A.S., Egorov A.N., Fedorov O.V. The Analysis of the Practice of Using of High-Voltage Frequency Converters ACS5000 // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602676.

15. Feng D., Lu M., Lan J., Sun L. Research on switching operation transient electromagnetic environment of substations in a coal mine. IET Generation, Transmission & Distribution. 2016. Vol. 10. is. 13. P. 3322–3329. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0292.