

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

<sup>1</sup>Трофимов Ю.Ю., <sup>2</sup>Егоров А.Н.

<sup>1</sup>Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном, Мирный, e-mail: trofraven@gmail.com

<sup>2</sup>СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО); Мирный, e-mail: egorovan@alrosa.ru

В данной статье описаны требования к надежности систем электроснабжения производственных объектов, больше внимания уделено обогатительной фабрике. Представлено распределение потребителей на три категории в зависимости от их требуемой надежности электроснабжения. Рассмотрены вопросы надежности электроснабжения и степени резервирования систем. Рассмотрены функциональные особенности построения систем электроснабжения горных предприятий, в том числе обогатительной фабрики. Исследованы принципы повышения надежности электроснабжения предприятий. Приведен эффективный вариант исследования систем электроснабжения горных предприятий – их моделирование. Описана суть моделирования режимов работы систем электроснабжения, применение моделирования для имитации различных режимов работы систем электроснабжения. Приведены результаты моделирования системы электроснабжения обогатительной фабрики. Представлены графики моделирования режимов нормальной работы, короткого замыкания в системе, компенсация реактивной мощности и построение суточного графика нагрузки.

**Ключевые слова:** электроснабжение, горная промышленность, обогатительная фабрика, надежность, моделирование, MatLab

## MODELING OF OPERATING MODES OF ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS OF MINING ENTERPRISES

<sup>1</sup>Trofimov Yu. Yu., <sup>2</sup>Egorov A. N.

<sup>1</sup>Polytechnic institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in Mirny, Mirny, e-mail: trofraven@gmail.com

<sup>2</sup>ST «Almazavtomatika» ALROSA LTD; Mirny, e-mail: egorovan@alrosa.ru

This article describes the requirements for reliability of power supply systems for production facilities, more attention is paid to the concentrator. The distribution of consumers into three categories is presented, depending on their required reliability of power supply. The issues of reliability of power supply and degree of redundancy of systems are considered. Functional features of the construction of power supply systems for mining enterprises, including the concentrating mill, are considered. The principles of improving the reliability of power supply to enterprises are investigated. An effective variant of research of power supply systems for mining enterprises is given - their modeling. The essence of modeling of modes of operation of power supply systems, application of modeling for imitation of various operating modes of power supply systems is described. The results of the simulation of the power supply system of the concentrator are given. Graphs of modeling of normal operation modes, short circuit in the system, compensation of reactive power and construction of a daily load graph are presented.

**Keywords:** power supply, mining, concentrating factory, reliability, modeling, MatLab

Промышленность потребляет около двух третей всей вырабатываемой в нашей стране электроэнергии. Возрастают мощности, потребляемые предприятиями и отдельными электроприемниками. В связи с этим усложняются задачи рационального построения схем распределения электроэнергии. Повышаются требования к надежности, экономичности, к удобству и безопасности эксплуатации и к качеству электроэнергии [1-4].

Система электроснабжения производственного объекта состоит из питающих, распределительных, трансформаторных и преобразовательных подстанций и связывающих их кабельных и воздушных сетей и токопроводов высокого и низкого напряжения. Система электроснабжения строится таким образом, чтобы она была надежна, удобна и

безопасна в обслуживании и обеспечивала необходимое качество энергии и бесперебойность электроснабжения в нормальном и послеаварийном режимах. В то же время система электроснабжения должна быть экономичной по затратам, ежегодным расходам, потерям энергии и расходу дефицитных материалов и оборудования. Экономичность и надежность системы электроснабжения достигается путем применения взаимного резервирования сетей предприятий и объединения питания промышленных, коммунальных и сельских потребителей. При сооружении на предприятиях собственных электростанций, главных понизительных подстанций и других источников питания учитываются близлежащие внезаводские потребители электроэнергии. Особенно это

необходимо в районах, недостаточно охваченных энергосистемами [5-8].

Очень серьезные дополнительные требования к электроснабжению предъявляют электроприемники с резкопеременной циклически повторяющейся ударной нагрузкой и потребители, требующие особой бесперебойности питания при всех режимах системы электроснабжения [9]. В отношении требуемой надежности электроснабжения электроприемники делятся на три категории.

К 1-й категории относятся лишь те электроприемники, перерыв в электроснабжении которых может повлечь за собой опасность для людей, значительный ущерб народному хозяйству, повреждение оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса. Эти электроприемники должны обеспечиваться питанием от двух независимых источников, и перерыв их электроснабжения допускается лишь на время автоматического включения резерва. Примерами электрических нагрузок 1-й категории могут служить доменные цехи, котельные производственного пара, ответственные насосные, приводы вагранок, разливные краны, водоотливные и подъемные установки горнорудных предприятий и др.

Ко 2-й категории (наиболее многочисленной) относятся электроприемники, которые также очень важны, но перерыв их питания связан только с массовым недоотпуском продукции, простоем людей, механизмов и промышленного транспорта. Требования к резервированию их питания менее строгие, чем к электроприемникам 1-й категории. Допускаются перерывы электроснабжения на время, необходимое для ручного включения резерва дежурным персоналом и даже выездной бригадой, если подстанция не имеет постоянного дежурства. Некоторые группы электроприемников 2-й категории по предъявляемым ими требованиям к питанию ближе к 1-й категории, а другие, наоборот, ближе к 3-й категории. Поэтому к вопросам питания нагрузок этой категории нужно относиться очень осторожно и, безусловно, не применять огульное их резервирование в той степени, как это необходимо для нагрузок 1-й категории. Это обстоятельство нашло отражение и в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ), которые при определенных условиях допускают не предусматривать специального резервирования электроприемников 2-й категории.

К 3-й категории относятся все прочие электроприемники, например, во вспомога-

тельных цехах, цехах несерийного производства, на неотчетливых складах и т. п. Они допускают перерыв питания на время ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, но продолжительностью не более одних суток.

Для правильного решения вопросов надежности электроснабжения и степени резервирования необходимо четко определить режимы, возникающие во время аварии и в периоды, непосредственно следующие после аварии. Под аварийным режимом подразумевается кратковременный переходный режим, вызванный нарушением нормального режима работы системы электроснабжения или ее отдельных звеньев и продолжающийся до отключения поврежденного звена или элемента. Продолжительность аварийного режима определяется в основном временем действия релейной защиты, автоматики и телеуправления. Под послеаварийным режимом следует понимать режим, возникающий после отключения упомянутых поврежденных элементов системы электроснабжения, т. е. после ликвидации аварийного режима. Он гораздо более длителен, чем аварийный режим, и продолжается до восстановления нормальных условий работы, т. е. нормального режима.

Систему электроснабжения в целом нужно строить таким образом, чтобы она при послеаварийном режиме обеспечивала функционирование основных цехов предприятия после необходимых переключений и пересоединений. При этом используются все дополнительные источники и возможности резервирования, в том числе и те, которые в нормальном режиме нерентабельны (различные переключки, связи на вторичных напряжениях и др.). При послеаварийном режиме допустимо частичное ограничение подаваемой мощности, возможны кратковременные перерывы питания электроприемников 3-й и частично 2-й категорий на время вышеупомянутых переключений и пересоединений, а также позволены отступления от нормальных уровней отклонений и колебаний напряжения и частоты в пределах установленных допусков. Если же невозможно полное сохранение в работе всех основных производств в течение послеаварийного периода, то нужно обеспечить хотя бы сокращенную работу предприятия с ограничением мощности или в крайнем случае поддержание производства в состоянии горячего резерва с тем, чтобы после восстановления нормального электроснабжения предприятие могло быстро возобновить

свою работу по заданной производственной программе. В период послеаварийного режима элементы сети могут быть перегружены в пределах, допускаемых нормативными документами.

Надежность электроснабжения предприятий, как правило, следует повышать при приближении к источникам питания (ТЭЦ, ГПП и т. д.) и по мере увеличения мощности соответствующих звеньев системы, так как аварий в мощных звеньях приводят к более тяжелым последствиям, чем в мелких, и охватывают большую зону предприятия. Требования, предъявляемые к электроснабжению предприятий, зависят также от потребляемой ими мощности.

Электроснабжение такого крупного объекта как обогатительная фабрика является очень важной и сложной частью, так как на обогатительной фабрике много высоко-мощных электроустановок. Моделирование режимов работы системы электроснабжения обогатительной фабрики является эффективным методом для определения энергопотребления в разных режимах работы. Моделирование позволяет испытать систему электроснабжения до реализации проекта, что позволяет детально рассмотреть, как будет себя вести система при разных нагрузках. Моделирование производят в основном в программной среде MatLab Simulink. Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы.

В последнее десятилетие, в связи с бурным развитием и внедрением информационных технологий, все более широкое применение находят методы расчета и моделирования режимов работы систем электроснабжения на ЭВМ. При этом важнейшим фактором, обеспечивающим эффективное решение и достоверность результатов при достижении поставленных инженерных задач, помимо производительности ЭВМ, является и применяемое при исследованиях программное обеспечение. Для имитационного моделирования электротехнических устройств и систем наиболее оптимально подходит прикладная программа Simulink и библиотека блоков SimPowerSystem из ядра пакета MatLab [10-12]. Выбор данного программного продукта обусловлен наличием современных методов визуально-ориентированного программирования, развитого

математического аппарата, библиотеки моделей пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередач и т.п.

Система пакета MatLab позволяет пользователю осуществлять вывод информации в любой удобной для него форме: графики, диаграммы, таблицы и т.п. Кроме того, интерфейс MatLab допускает возможность получать и передавать информацию при связи с редактором электронных таблиц Microsoft Excel. Используя возможности Simulink и SimPowerSystem можно не только моделировать, но и анализировать работу различных устройств. Библиотека блоков SimPowerSystem охватывает достаточно широкий спектр энергетического, измерительного и вспомогательного оборудования. В то же время, если в стандартной библиотеке нет блока, моделирующего необходимое оборудование или алгоритм, то пользователь имеет возможность создать свой собственный блок. Реализовать возможности Simulink по созданию подсистем можно как с помощью уже имеющихся в базе блоков, так и на основе моделей основной библиотеки Simulink и управляемых источников тока или напряжения. Бурное развитие MatLab получил в учебной и научной деятельности [13-17].

Проведем моделирование трехфазной системы электроснабжения реально существующей обогатительной фабрики №3 Мирнинского горно-обогатительного комбината Акционерной компании «АЛРОСА» (ПАО), где источником питания является каскад гидроэлектростанции на реке Виллой, где установлено восемь генераторов типа СВ 1160/180-72 и восемь трансформаторов типа ТДЦ 125/220/13,8. Энергия, трансформируясь на напряжении 220 кВ, передается по линиям к потребителям. Двухцепная линия протяженностью 98 км идет на нагрузку «М», а трёхцепная линия длиной 358 км идет на подстанцию «А», далее тянется двухцепная линия длиной 76 км, которая питает подстанцию «У», где на низкой стороне 6 кВ и находится нагрузка «Ф». На средней стороне 110 кВ питается «г.У». Для этого мы использовали модели блоков SimPowerSystems и Simulink.

Ниже приводится описание основных блоков, используемых для создания реального электроснабжения объектов, по исследованию переходных процессов, как в простых электрических цепях, так и в сложных электроэнергетических устройствах,

включая воздушные линии связи с распределенными параметрами, трансформаторы и электрические двигатели постоянного и переменного тока:

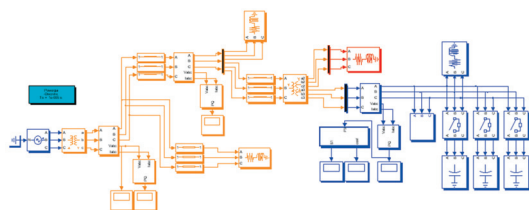


Рис. 1. Математическая модель системы внутреннего электроснабжения фабрики

1. Трехфазный программируемый источник напряжения;
2. Двухобмоточный трехфазный трансформатор;
3. Трехцепная линия;
4. Трехфазная нагрузка;
5. Трехфазный выключатель переменного тока;
6. Трехфазный короткозамыкатель;
7. Устройство короткозамыкателя;
8. Осциллографы.

Подробное описание блоков, построение моделей и проведение моделирования различных электромеханических и энергетических систем представлено в [18-37].

Перейдем к результатам моделирования.

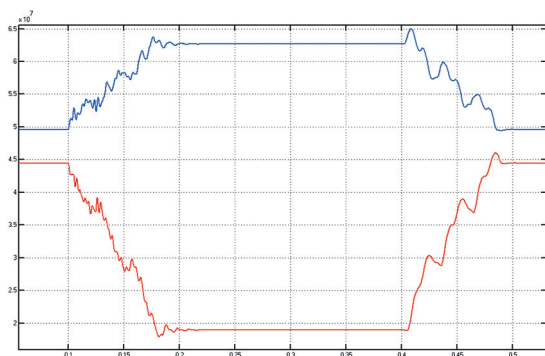


Рис. 2. Диаграмма активной и реактивной мощностей при включении компенсации на ГПП.

Из данного графика видно, что при включении компенсатора реактивная мощность снижается более чем в 2 раза, тем самым увеличивается активная мощность более чем на 15%. В свою очередь полная мощность незначительно снижается, что не повлияет на общую работоспособность системы (рис. 3).

На графике тока короткого замыкания (рис. 4) видно, что при включении блока короткозамыкателя происходит бросок тока,

в результате чего ударный ток достигает 30 кА, а ток короткого замыкания составляет 23 кА.

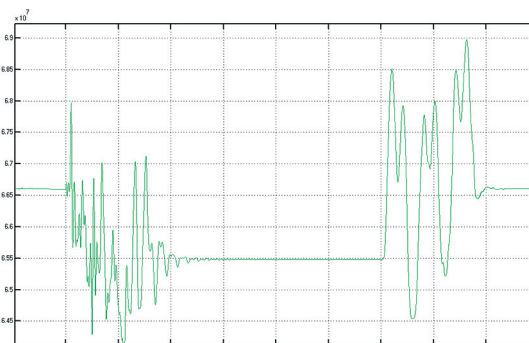


Рис. 3. Диаграмма полной мощности на ГПП при компенсации

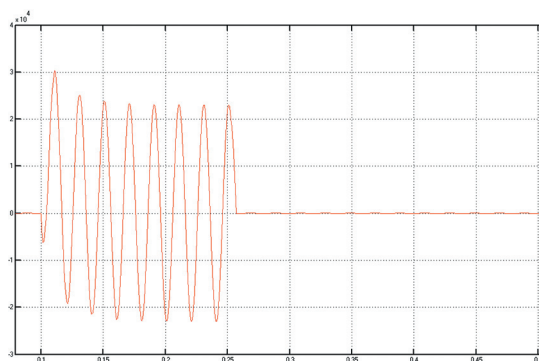


Рис. 4. Диаграмма тока короткого замыкания на низкой стороне

В результате проделанного моделирования обогатительной фабрики можно получить сведения о величине электрических величин при различных режимах работы системы электроснабжения. Это позволит более точно производить выбор коммутационной и защитной аппаратуры, типов и систем электроприводов на предприятиях, типов проводников для воздушных и кабельных линий, устройств релейной защиты и автоматизации [38-40].

#### Список литературы

1. Бондарев В.А., Семёнов А.С. Оценка основных факторов энергосбережения / Студенческий научный форум // Материалы VI международной студенческой электронной научной конференции: электронный ресурс. 2014.
2. Семенов А.С. Снижение экономических потерь в электрических сетях / Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире // Материалы докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Якутский государственный университет. 2009. С. 106-111.
3. Semenov A.S. Lower the economic losses in electric networks // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 12. С. 57-59.
4. Semenov A.S. Lower economic losses in electric networks / Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings //



Proceedings of the 3th International scientific conference. Editor Ludwig Siebenberg. 2013. С. 139-141.

5. Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Мартынова А.Б. Методические указания по выполнению расчетно-графических работ по дисциплине «Электроснабжение горного производства». – Мирный, 2015. – 20 с.
6. Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Черенков Н.С. Методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Электроснабжение горного производства». – Мирный, 2015. – 44с.
7. Кугушева Н.Н., Семёнов А.С. Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Системы электроснабжения». – М.: Издательство «Перо», 2015. – 24 с.
8. Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Самсонов А.В. Проектирование и расчет внешней электроэнергетической системы / Методические указания к курсовому проекту. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2015 – 56 с.
9. Семёнов А.С. Разработка системы электроснабжения добычного участка подземного рудника // Мир современной науки. 2013. № 1 (16). С. 12-15.
10. Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода / методические указания. – М., 2012. – 60 с.
11. Семенов А.С. Основы моделирования электротехнических и электромеханических систем / методические указания. – М.: «Перо», 2016 – 48 с.
12. Семёнов А.С. Программа MATLAB / методические указания. – М., 2012. – 40 с.
13. Егорова А.А., Семёнов А.С., Петрова М.Н. Применение программ математического моделирования при изучении дисциплин естественнонаучного и профессионального циклов у технических специальностей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 840.
14. Семёнов А.С. Преподавание учебных дисциплин у специальностей «Электроснабжение» и «Электромеханика» с использованием программы MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 232-236.
15. Семёнов А.С. Преподавание учебных дисциплин у специальностей «Электроснабжение» и «Электромеханика» с использованием программы MATLAB / Студенческий научный форум // Материалы VI международной студенческой электронной научной конференции: электронный ресурс. 2014.
16. Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. Преподавание учебных дисциплин у специальностей «Электроснабжение» и «Электромеханика» с использованием программы MATLAB / Наука и инновационные разработки - Северу // Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. 2014. С. 105-106.
17. Семенов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М., Матул Г.А. Внедрение пакета программ MATLAB в учебную и научную работу студентов технических специальностей // Естественные и технические науки. 2014. № 3 (71). С. 165-171.
18. Рушкин Е.И., Семёнов А.С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-2. С. 341-342.
19. Рушкин Е.И., Семёнов А.С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MATLAB / Студенческий научный форум // Материалы V Международной студенческой электронной научной конференции: электронная научная конференция (электронный сборник). Российская Академия Естествознания. 2013.
20. Семёнов А.С. Исследование режимов работы однофазного трансформатора путем математического моделирования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 5-3. С. 391-395.
21. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы системы электроснабжения насосной станции // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3-2. С. 314-319.
22. Семенов А.С. Моделирование режимов работы системы электроснабжения насосной станции / Студенческий научный форум - 2016 // VIII Международная студенческая электронная научная конференция, электронное издание. 2016.
23. Семёнов А.С. Моделирование режима пуска синхронного двигателя электропривода насоса ГРАТ-4000 // Наука в центральной России. 2012. № 2S. С. 23-27.
24. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя при прямом пуске и с преобразователем частоты в пакете программ MATLAB // Естественные и технические науки. 2013. № 4 (66). С. 296-298.
25. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MATLAB // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2014. Т. 11. № 1. С. 51-59.
26. Семёнов А.С. Моделирование реостатного пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 9-2. С. 29-34.
27. Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. Моделирование режимов работы частотно-регулируемого электропривода вентиляторной установки главного проветривания применительно к подземному руднику по добыче алмазосодержащих пород // Фундаментальные исследования. 2013. № 8-5. С. 1066-1070.
28. Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. Моделирование режимов работы электроприводов горного оборудования / монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. – 102 с.
29. Семёнов А.С., Рушкин Е.И. Моделирование электродвигателя привода рабочего органа комбайна АМ-105 / Наука и инновационные разработки – Северу // Сборник докладов. Общая редакция: А. А. Гольдман, И. В. Зырянов, И. С. Томский. 2014. С. 195-199.
30. Семёнов А.С., Хазиев Р.Р. Выбор электродвигателя проходческого комбайна путём математического моделирования // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 5-5. С. 694-698.
31. Семёнов А.С., Хазиев Р.Р. Выбор электродвигателя проходческого комбайна путём математического моделирования / Студенческий научный форум - 2015 // VII Международная студенческая электронная научная конференция, электронное издание. 2015.
32. Семёнов А.С., Хубиева В.М., Кугушева Н.Н. Моделирование режимов работы систем электроснабжения горных предприятий / монография. – М.: «Перо», 2015. – 100 с.
33. Семёнов А.С., Хубиева В.М., Петрова М.Н. Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB // Фундаментальные исследования. 2015. № 10-3. С. 523-528.
34. Хазиев Р.Р., Семенов А.С. Выбор электродвигателя проходческого комбайна путём математического моделирования / Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире // Сборник докладов VI-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2015. С. 153-160.
35. Хубиева В.М., Петрова М.Н., Семёнов А.С. Проектирование электропривода подборщика путем моделирования / методические указания. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2015 – 96 с.
36. Шипулин В.С., Семёнов А.С. Моделирование режимов работы системы электроснабжения добычного участка подземного рудника // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-2. С. 344-347.
37. Шипулин В.С., Семёнов А.С. Моделирование режимов работы системы электроснабжения добычного участка подземного рудника / Студенческий научный форум // Материалы V Международной студенческой электронной научной конференции: электронная научная конференция (электронный сборник). Российская Академия Естествознания. 2013.
38. Петрова М.Н., Семёнов А.С. Математическое моделирование переходных процессов в электромеханических системах // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3-2. С. 312-314.
39. Петрова М.Н., Семенов А.С. Математическое моделирование переходных процессов в электромеханических системах / Студенческий научный форум - 2016 // VIII Международная студенческая электронная научная конференция, электронное издание. 2016.
40. Петрова М.Н., Семенов А.С. Переходные процессы в электромеханических системах и их имитационное моделирование / Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире // Сборник докладов VII-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией: А.А. Гольдман. 2016. С. 195-198.