

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

Нижний Новгород 2021

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. № 2 (14). – 106 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор
д.т.н., проф. **А.Б. Лоскутов**

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, проф.

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

редактор выпуска

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Валерий Геннадьевич Гольдштейн	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Павел Владимирович Илюшин	д-р техн. наук
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Vitezslav Styskala	Dr. Ing., Ph. D., профессор (Чехия)
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., профессор (Германия)

Учредитель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала: <https://ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	4
Вагин Г.Я. Состояние и перспективы развития электроэнергетики в России.....	4
Герман Л.А., Карпов И.П. Уточненный метод расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока.....	15
Авербух М.А., Прасол Д.А. Оценка влияния высших гармоник на токи однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-10 кВ.....	26
Муртазин Т.Э., Титов В.Г. Синхронный электропривод с векторным управлением.....	41
Панкова А.С., Пронина О.А., Огнев Д.С., Чумарин К.Е. Алгоритмизация процесса длительной автоматической разгрузки цифровых энергосистем.....	53
Чайкин В.С., Иванов А.В. МЭК 61850: язык описания конфигурации подстанции.....	66
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	72
Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Меднов А.А. Преобразователи частоты для электротехнологических процессов, включающих индукционный нагрев.....	72
Афанасьев А.А. Применение метода разделения переменных в полярных координатах для расчета магнитоэлектрических вентильных двигателей.....	83
ХРОНИКА.....	100
Шакарян Юрий Гевондович.....	100

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_04

**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ****Г.Я. Вагин**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия
es@nttu.ru

Представлен обзор современного состояния электроэнергетики как базовой отрасли российской экономики, рассмотрены перспективы ее развития. Проведен анализ данных по изменению установленной мощности электростанций и выработке электроэнергии в России в 1991-2018 гг. Приведены сведения по текущему состоянию в области тепловых электростанций, представлена характеристика гидроэнергетики и атомной электроэнергетики России. Представлен подход к замене изношенного генерирующего оборудования, основанный на модернизации действующих тепловых электростанций путем внедрения парогазовых установок, использования суперсверхкритических параметров пара, и подход, предполагающий переход на электростанции, работающие на возобновляемых источниках энергии. Приведена характеристика текущего состояния и перспектив развития возобновляемой энергетики в России. Показаны преимущества внедрения интеллектуальной энергетической системы на базе концепции *Smart Grid*.

Ключевые слова: интеллектуальные энергетические системы, электростанции, электроснабжение, электроэнергетика.

Для цитирования: Вагин, Г.Я. Состояние и перспективы развития электроэнергетики в России // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 4-14.
DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_04

STATE AND PROSPECTS OF ELECTRIC POWER INDUSTRY IN RUSSIA

G.Ya. Vagin

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
es@nntu.ru

Abstract. The electric power industry is the basic branch of the Russian economy. The paper provides an overview of the current state of the electric power industry and considers the development prospects. An analysis of data on changes in the installed capacity of power plants and electricity generation in Russia in the period from 1991 to 2018 is carried out. Information on the current state in the field of thermal power plants is provided. The characteristics of the hydropower and nuclear power industry in Russia are presented. The paper describes an approach to replacing worn out generating equipment based on the modernization of existing thermal power plants by introducing combined cycle plants, using supercritical steam parameters, and an approach involving the transition to power plants operating on renewable energy sources. The characteristics of the current state and prospects for the development of renewable energy in Russia are given. The advantages of introducing an intelligent energy system based on the Smart Grid concept are shown.

Keywords: electric power industry, power plants, power supply, smart grids.

For citation: G.Ya. Vagin, “State and prospects of electric power industry in Russia”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 4-14, 2021.
DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_04

I. Введение

Электроэнергетика является важнейшей инфраструктурной отраслью, обслуживающей потребности национальной экономики, поэтому ее развитие тесным образом связано с перспективами социально-экономического развития страны, эволюцией структуры экономики, изменениями уклада и качества жизни населения. Учитывая эту специфику, во всех странах большое внимание уделяют вопросам производства и эффективного использования электроэнергии.

Россия в настоящее время занимает четвертое место в мире по выработке электроэнергии, уступая США, Китаю и Индии [1]. На рис. 1 и 2 приведена динамика установленной мощности электростанций и выработки электроэнергии в России за период 1991-2018 гг. [2].

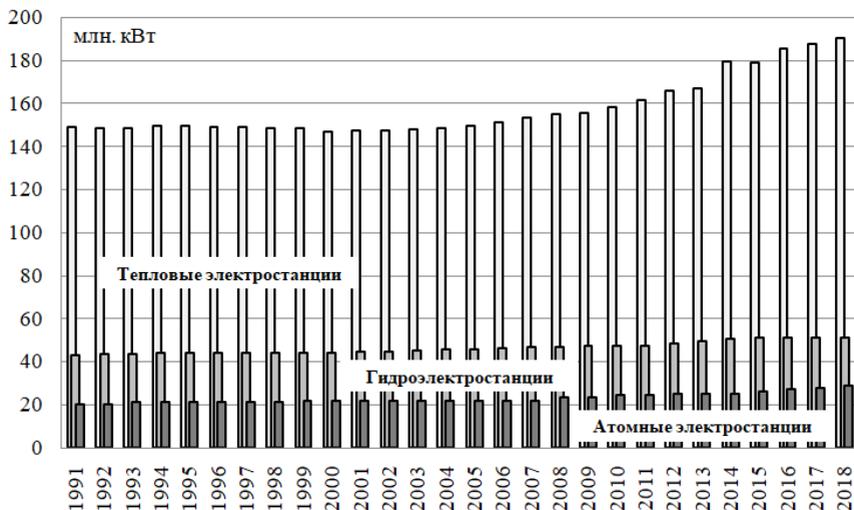


Рис. 1. Динамика установленной мощности электростанций в России

Fig. 1. Dynamics of the installed capacity of power plants in Russia

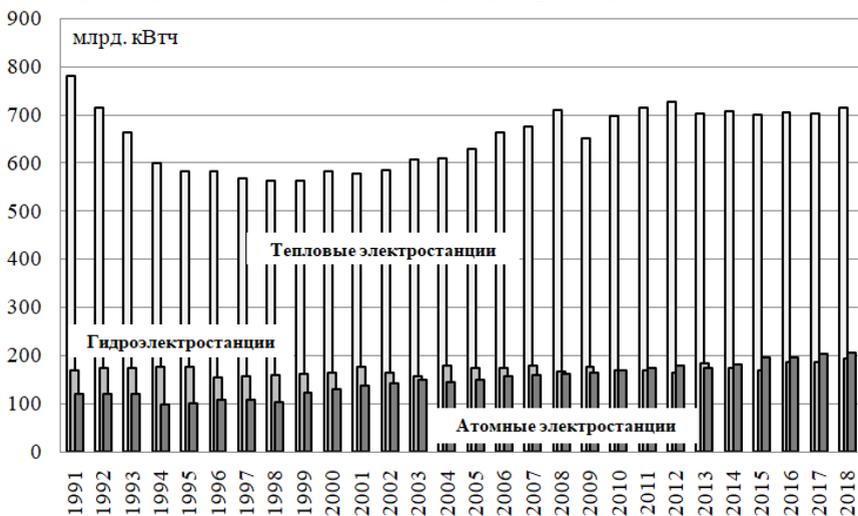


Рис. 2. Динамика выработки электроэнергии в России

Fig. 2. Dynamics of electricity generation in Russia

На основании данных по установленной мощности электростанций и выработке электроэнергии можно сделать следующие выводы:

- за период 1991-2018 гг. установленная мощность электростанций возросла на 27,51 %, а выработка электроэнергии – всего на 4,3 %;
- в 2019 г. тепловые электростанции (ТЭС) выработали 64,2 % электроэнергии, гидравлические (ГЭС) – 17,4 %, а атомные (АЭС) – 18,4 % (для сравнения: в 1991 г. на ТЭС вырабатывалось 70 % электроэнергии, на ГЭС – 20,5 %, на АЭС – 9,5 %);
- при установленной мощности электростанций в 2019 г., равной 274 млн кВт, максимум нагрузки в январе 2019 г. составил 151,661 млн кВт, а годовое потребление электроэнергии – 1075,2 млрд кВт·ч.

В целом на современном этапе перед электроэнергетикой стоят две основные задачи:

- 1) совершенствовать производство электроэнергии, т.е. наиболее эффективно производить требуемое количество электроэнергии;
- 2) совершенствовать потребление электроэнергии, т.е. наиболее эффективно использовать электроэнергию.

Каждая из этих задач предполагает возможность применения широкого спектра различных технологий, отбор которых должен производиться, исходя из технико-экономической эффективности, социальной значимости, влияния на окружающую среду и условий устойчивого развития.

II. Производство электроэнергии

Для более экономичного, рационального и комплексного использования общего потенциала электростанций нашей страны в 1980-е гг. была создана Единая энергетическая система (ЕЭС) СССР. В настоящее время ЕЭС России, являясь крупнейшей в мире, состоит из семи параллельно работающих объединенных энергосистем (ОЭС): Центра, Средней Волги, Урала, Северо-Запада, Юга, Сибири, Востока [3].

Объединение электростанций в энергосистемы дает следующие технические и экономические преимущества [4]:

- 1) повышается надежность электроснабжения потребителей за счет более гибкого маневрирования резервами отдельных электростанций и систем;
- 2) сокращается суммарный резерв мощности;
- 3) обеспечивается возможность увеличения единичной мощности электрических станций и применения на них более мощных энергоблоков;
- 4) снижается общий максимум нагрузки ОЭС, так как совмещенный максимум всегда меньше суммы максимумов отдельных энергосистем за счет их разновременности;
- 5) облегчается возможность задавать экономически более выгодные режимы для любых типов электростанций;

б) повышается эффективность использования различных видов энергетических ресурсов;

7) появляются условия для оптимального управления развитием и режимами работы энергетики в целом и ее автоматизации.

В ЕЭС России включены 56 крупных электростанций и 2,5 млн км линий электропередач напряжением от 220 до 1150 кВ. Общая установленная мощность электростанций составляет 219 ГВт [3].

Оперативное технологическое управление ЕЭС России осуществляется круглосуточно. Создана единая система сбора информации на основе вычислительной техники. Необходимые аварийные отключения в опасных ситуациях осуществляются автоматически. Режим работы системы оптимизируется на всех уровнях: от отдельного генератора до объединенной энергосистемы.

Энергосистема России работает синхронно с энергосистемами Молдавии, Белоруссии, стран Балтии, Закавказья, Казахстана и Монголии. Через энергосистему Казахстана ЕЭС России связана с энергосистемами Узбекистана, Киргизии, Туркменистана и Таджикистана. Через вставку постоянного тока она взаимодействует с энергосистемой Финляндии и через нее – с энергосистемами других скандинавских стран – Норвегии, Швеции и Дании. От сетей ЕЭС России осуществляется экспорт электроэнергии в Финляндию, Норвегию, Китай и ряд других государств [5].

Основную выработку электроэнергии в России производят 600 электростанций в зоне централизованного электроснабжения. Две трети генерирующей мощности (190,2 ГВт) приходится на тепловые электростанции (ТЭС), работающие на органическом топливе [6]. Почти 80 % ТЭС в Европейской части России работают на газо-мазутном топливе, а в Восточной части России свыше 80 % – на каменном угле.

Около 55 % мощности ТЭС – теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), вырабатывающие электрическую и тепловую энергию, а 45 % – это конденсационные электростанции (КЭС), вырабатывающие электрическую энергию. Свыше 90 % установленной мощности всех ТЭС России составляют паротурбинные электростанции, 1-2 % газотурбинные (ГТЭ) и парогазовые (ПГТЭ), остальное – установки дизельные, геотермальные и др.

Самой крупной КЭС в России является Сургутская ГРЭС-2 (ГРЭС – аббревиатура, сохранившаяся с времен СССР, которая обозначала государственную районную электростанцию) с установленной мощностью 4,8 ГВт, работающая на природном газе. Из КЭС, работающих на угле, самой крупной является Рефтинская ГРЭС с установленной мощностью 3,8 ГВт.

В настоящее время все крупные ТЭС объединены в оптовые генерирующие компании (ОГК) и территориальные генерирующие компании (ТГК).

Гидроэнергетика является ключевым элементом обеспечения системной надежности ЕЭС России, располагая более 90 % резерва регулируемой мощности. Из всех существующих типов электростанций именно ГЭС являются наиболее маневренными и способны при необходимости быстро и существенно увеличить объемы выработки электроэнергии, покрывая пиковые нагрузки. В 2019 г. установленная мощность ГЭС в России составляла 51,3 ГВт (18,3 % от мощности всех электростанций). За 2019 г. ГЭС выработали 194 млрд кВт·ч электроэнергии (17,4 % от всей выработанной в России). Для гидростроительства в нашей стране характерно сооружение каскадов ГЭС. При этом, кроме производства электроэнергии, решаются проблемы судоходства, снабжения населения и предприятий водой и устранения паводков. Самые крупные ГЭС в стране входят в состав Ангаро-Енисейского каскада: Саяно-Шушенская (6,4 ГВт), Красноярская (6,0 ГВт) на Енисее; Иркутская (0,66 ГВт), Братская (4,3 ГВт) и Усть-Илимская (4,32 ГВт) на Ангаре. В европейской части России работает крупный каскад ГЭС на Волге, в который входят 9 электростанций. Максимальную установленную мощность имеет Волжская ГЭС – 2,426 ГВт. Мощность всего каскада – 10,91 ГВт.

Атомная электроэнергетика. В России в настоящее время работают 10 АЭС. Наиболее крупные Балаковская и Ленинградская-1 по 4,0 ГВт. Установленная мощность АЭС в России в 2019 г. составляла 29,1 ГВт (10,71 % от мощности всех электростанций). За 2019 г. АЭС выработали 205 млрд кВт·ч электроэнергии (18,39 % от всей выработанной в России электроэнергии) и вышли на второе место по выработке.

III. Перспективы развития электроэнергетики

Одна из основных проблем в электроэнергетике России – большой износ оборудования существующих электростанций (более 40 % на ТЭС, 50 % – на ГЭС). Износ основных фондов электросетевого хозяйства превышает 40 %, а оборудования подстанций – 63 %. Возрастной состав оборудования электростанций различен для региональных систем; наиболее высок он для ОЭС Юга, Северо-Запада, Сибири и Урала, где доля оборудования со сроком службы более 30 лет превышает 50 %.

До 2030 г. на электростанциях требуется заменить 80-110 ГВт старого генерирующего оборудования [7]. Возможны два подхода к такой замене.

Подход 1. Институт «Теплоэлектропроект» рекомендует придерживаться следующего общего подхода при замещении выводимого из эксплуатации оборудования на тепловых электростанциях [8]:

1) энергоблоки мощностью 200-300 МВт на природном газе замещать парогазовыми установками мощностью 150-540 МВт с использованием оте-

чественных газотурбинных ГТЭ-110 и 180 и других вновь создаваемых более мощных ГТУ;

2) энергоблоки мощностью 800 МВт на газо-мазутном топливе модернизировать на повышенные параметры пара, в том числе, с использованием суперсверхкритических параметров пара (ССКП);

3) энергоблоки мощностью 300 и 500 МВт на твердом топливе модернизировать на повышенные параметры пара, в том числе, с использованием пара ССКП;

4) техническое перевооружение энергоблоков мощностью 150-200 МВт на твердом топливе осуществлять путем модернизации;

5) техническое перевооружение ТЭЦ с давлением пара 13 МПа и выше, работающих на газе, проводить путем модернизации;

6) техническое перевооружение ТЭЦ с давлением пара 9 МПа и ниже, работающих на газе и твердом топливе, производить путем перевода их на работу по схеме ГТУ-ТЭЦ и ПГУ-ТЭЦ.

7) ускорить разработку проектов перспективных экологически чистых угольных энергоблоков: паровых на ССКП с использованием малотоксичных горелок и сжиганием углей в котлах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) и сверхкритических параметрах пара; парогазовых с внутрцикловой газификацией углей.

Подход 2. Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН) предлагает отказаться от модернизации действующих ТЭС на ископаемых энергоресурсах и переходить на электростанции, работающие на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Это, в первую очередь, СЭС, ВЭС и БТЭС [9]. Данные типы электростанций становятся более выгодными с экономической точки зрения и позволяют минимизировать отрицательные воздействия электростанций на окружающую среду.

Такой подход к модернизации ТЭС расходится с концепцией интеллектуальной сети [10], в соответствии с которой электроснабжение в электроэнергетических системах будущего будет обеспечиваться централизованными электростанциями и распределенными источниками энергии. Оба типа генерации могут включать в себя и электростанции на базе ВИЭ.

Отказ от электростанций на ископаемых ТЭР поставит надежность электроснабжения потребителей в зависимость от природных аномалий.

Согласно [9], в 2017 г. получение электроэнергии на базе ВИЭ утвердилось не только в качестве самого быстрорастущего и быстрокупаемого, но и в качестве основного сектора энергетики.

В настоящее время доля энергии, получаемой за счет ВИЭ, составляет 42 % в Дании, 33 % в Германии, 27 % в Австрии, 21 % в Великобритании [9]. В целом по Евросоюзу доля ВИЭ в 2020 г. составила около 20 %.

В России основным видом энергетики на использовании ВИЭ является гидроэнергетика. В 2018 г. выработка электроэнергии на ГЭС России составила 17,3 % от всей электроэнергии. Выработка электроэнергии на СЭС составила 0,071 %, а на ВЭС 0,02 % от всей вырабатываемой электроэнергии [11]. Установленная мощность СЭС в 2018 г. составила 0,834 ГВт (0,31 % от мощности всех электростанций). Установленная мощность ВЭС составила 0,184 ГВт (0,067 % от всех электростанций).

Общая мощность малых ГЭС в 2018 г. составила 1,2 ГВт (0,44 %) от всех электростанций.

В табл. 1 приведена оценка потенциала ВИЭ в России.

Таблица 1.
Оценка потенциала ВИЭ в России

Table 1.
Assessment of renewables potential in Russia

Ресурсы	Общий потенциал, млн т усл. т./год	Технический потенциал, млн т усл. т./год	Экономический потенциал, млн т усл. т./год
Малые ГЭС (мощностью менее 25 МВт)	360,4	124,6	65,2
Солнечная энергия	2 300 000	2 300	12,5
Энергия ветра	26 000	2 000	10,0
Геотермальная энергия	21 500	1 800	11,5
Энергия биомассы	10 000	53	35
Низкопотенциальное тепло	525	115	36
Общий потенциал ВИЭ	2358385	6393	274

При полном энергопотреблении в России около 1 млрд т усл. т./год возможный для использования потенциал ВИЭ составляет 274 млн т усл. т./год, или 27,4 %.

IV. Заключение

В настоящее время в России проводится работа по созданию и внедрению интеллектуальной энергетической системы на базе концепции *Smart Grid*.

Smart Grid – это концепция интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системы, имеющей сетевую топологию и включающей в себя генерирующие источники, маги-

стральные и распределительные сети и все виды потребителей электрической энергии, управляемые единой сетью информационно-управляющих устройств и систем в режиме реального времени [12].

Такая система дает возможность за счет новых средств и новой организации управления функционированием и развитием интеллектуальной энергетической системы обеспечить новые свойства и новые эффекты: живучести, «цифрового» качества энергии, возможности ее аккумулирования, управления межсистемными перетоками и снятия излишних ограничений на синхронную работу всех частей энергосистемы, сегментацию и иерархию силовых энергетических и информационных потоков, распределения принимаемых управленческих решений (текущих и перспективных) и ответственности за них, оптимизации используемых первичных энергетических ресурсов и инвестиционных вложений, а также расширенное воспроизводство производственных и финансовых активов, всего энергетического потенциала страны [13].

Внедрение системы *Smart Grid* в энергетике станет мощным стимулом для инновационного развития смежных отраслей (информационных технологий, энергомашиностроения, строительства, транспорта и связи, сервисных предприятий по ремонту, наладке и проектированию), а также для развития энергетической науки.

Главную роль во внедрении системы *Smart Grid* в России играют Федеральная сетевая компания (ФСК) и Публичное акционерное общество «Российские сети» (ПАО Россети).

© Вагин Г.Я., 2021

Поступила в редакцию 10.03.2021

Received 10.03.2021

Библиографический список

- [1] Губайдулина А. Рынок российской энергетики: кто больше всех производит электричества в стране // Интернет-газета «Реальное время». Ноябрь 28, 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://realnoevremya.ru/articles/121619-obzorgynka-elektroenergii-rossii> (дата обращения 10.02.2020).
- [2] Установленная мощность ТЭС // EES EAEC. Мировая энергетика. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eeseaec.org/ustanovlennaa-mosnost-tes> (дата обращения 10.02.2020).
- [3] Основные характеристики российской энергетики // Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения 10.02.2020).
- [4] Герасимов В.Г. Электротехнический справочник. М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 964 с.
- [5] Максимов Б.К., Молодюк В.В. Теоретические и практические основы рынка

- электроэнергии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 292 с.
- [6] Отчет о функционировании ЭЭС России в 2019 году. [Электронный ресурс]. URL: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_ger2019.pdf (дата обращения 10.02.2020).
- [7] О проведении конкурентных отборов проектов модернизации генерирующего оборудования тепловых электростанций. Постановление Правительства Российской Федерации от 25 января 2019 № 43. [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/all/120455/> (дата обращения 10.02.2020).
- [8] Загреддинов И.Ш., Кучеров В.В., Захаров Я.В., Шабанов И.И. Основные направления строительства ТЭС России в проектах АО «Институт Теплоэлектропроект» // Электрические станции. 2018. № 10. С. 2-8.
- [9] Зайченко В.М., Соловьев Д.А., Чернявский А.А. Перспективные направления развития энергетики России в условиях перехода к новым энергетическим технологиям // Окружающая среда и энерговедение. 2020. № 1. С. 33-47.
- [10] Шакарян Ю.Г. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. М.: 2012. – 238 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/folder/mfl4voxwok/direct/73743691> (дата обращения 10.02.2020).
- [11] Антонов Н.В., Евдокимов М.Ю., Шилин В.А. Возобновляемая энергетика за рубежом и в регионах России // Географическая среда и живые системы. 2020. №1. С. 85-99. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-1-85-99.
- [12] Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. № 1. 2018. С. 9-27. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9.
- [13] Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

References

- [1] A. Gubaidullina, “Rynek rosyjskiej energetyki: kto bol'she vsekh proizvodit elektrichestva v strane [Russian energy market: who produces the most electricity in the country], *Realnoe Vremya online newspaper*, Nov. 28, 2018 [Online]. Available at: <https://realnoevremya.ru/articles/121619-obzor-rynka-elektroenergii-rossii> [Accessed: Feb. 10, 2020] (in Russian).
- [2] Ustanovlennaya moshchnost' TES [Installed capacity of thermal power plants]. [Online]. Available at: <http://www.eeseaec.org/ustanovlennaa-mosnost-tes> [Accessed: Feb. 10, 2020] (in Russian).
- [3] Osnovnyye kharakteristiki rossiyskoy energetiki [The main characteristics of the Russian energy sector]. [Online]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/532> [Accessed: Feb. 10, 2020] (in Russian).
- [4] V.G. Gerasimov, *Elektrotekhnicheskii spravochnik [Electrotechnical reference book]*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute, 2004 (in Russian).
- [5] B.K. Maksimov and V.V. Molodyuk, *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy rynka elektroenergii [Theoretical and practical foundations of the electricity market]*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute, 2008 (in Russian).
- [6] Otchet o funktsionirovanii EES Rossii v 2019 godu [Report on the functioning of the

- UES of Russia in 2019]. [Online]. Available at: [https:// www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_rep2019.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_rep2019.pdf) [Accessed: Feb. 10, 2020] (in Russian).
- [7] *O provedenii konkurentnykh otborov proyektov modernizatsii generiruyushchego oborudovaniya teplovykh elektrostantsiy* [On the competitive selection of projects for the modernization of the generating equipment of thermal power plants], Resolution of the Government of the Russian Federation no. 43, January 25, 2019 [Online]. Available at: <http://government.ru/docs/all/120455/> [Accessed: Feb. 10, 2020] (in Russian).
- [8] I.Sh. Zagretdinov, V.V. Kucherov, Ya.V. Zakharov and I.I. Shabanov, “Basic trends of Russia’s thermal power plants construction represented in projects of JSC “Institute Teploelectroproject””, *Electrical Stations*, no. 10, pp. 2-8, 2018.
- [9] V.M. Zaichenko, D.A. Solovyev and A.A. Chernyavsky, “Prospective directions of Russian electric power industry development within the framework of transition to new energy technologies”, *Journal of Environmental Earth and Energy Study*, no. 1, pp. 33-47, 2020.
- [10] Yu.G. Shakaryan et al. *Kontseptsiya intellektual'noy elektroenergeticheskoy sistemy s aktivno-adaptivnoy set'yu* [Concept of intelligent electric power system with active-adaptive grid]. Moscow, 2012. [Online]. Available at: <https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/folder/mfl4voxwok/direct/73743691> [Accessed: Feb. 10, 2020] (in Russian).
- [11] N.V. Antonov, M.Yu. Evdokimov and V.A. Shilin, “Renewable energy abroad and in Russian regions”, *Geographical Environment and Living Systems*, no. 1, pp. 85-99, 2020. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-1-85-99.
- [12] A.B. Loskutov, “Solving problems in transition of electrical industry to digital technologies”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 9-27, 2018. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9.
- [13] B.B. Kobets and I.O. Volkova, *Innovatsionnoye razvitiye elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [Innovative development of the electric power industry based on the Smart Grid concept]. Moscow: Energy, 2010 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Вагин Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Gennady Ya. Vagin, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.313

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_15

УТОЧНЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Л.А. Герман

филиал Самарского государственного университета путей сообщения
в Нижнем Новгороде
Нижний Новгород, Россия
lagerman@mail.ru

И.П. Карпов

филиал ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению
Нижний Новгород, Россия
ORCID:0000-0001-9520-7546 ech2_karpovip@grw.ru

Рассматриваются вопросы расчета токов короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети переменного тока. Приведен анализ погрешности расчета по нормативному методу в зависимости от схемы подключения тяговой подстанции к системе внешнего электроснабжения. Предложен уточненный метод расчета токов КЗ по данным сопротивлений короткого замыкания от энергосистемы. Расчет автоматизирован с использованием интегрированной системы Mathcad и программы ПАСТ-05К.

Ключевые слова: токи короткого замыкания, система тягового и внешнего электроснабжения, высоковольтная линия, тяговая подстанция.

Для цитирования: Герман Л.А., Карпов И.П. Уточненный метод расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 15-25. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_15

REFINED METHOD FOR CALCULATING SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN AC TRACTION NETWORK

L.A. German

Branch of the Samara State University of Railway Transport in Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia
lagerman@mail.ru

I.P. Karpov

Branch of JSC «Russian Railways» Transenergo Gorky directorate for energy supply
Nizhny Novgorod, Russia

ORCID:0000-0001-9520-7546 ech2_karpovip@grw.ru

Abstract. The article deals with the calculation of short-circuit currents in the AC traction network. The analysis of the calculation error according to the standard method, depending on the connection scheme of the traction substation to the external power supply system, is given. A refined method for calculating short-circuit currents based on the data of short-circuit resistances from the power system is proposed. The calculation is automated using the integrated Mathcad system and the RAST-05K program.

Keywords: short-circuit currents, traction and external power supply system, high-voltage line, traction substation.

For citation: L.A. German and I.P. Karpov, “Refined method for calculating short-circuit currents in AC traction network”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 15-25, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_15.

I. Введение

Уже много десятков лет достаточно успешно ведутся расчеты токов короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети железных дорог по нормативным документам [1]. Однако в [2, 3] было показано, что в ряде случаев возможна погрешность в расчетах тока КЗ при неполной схеме системы внешнего электроснабжения (СВЭ). Опасность большой погрешности расчета токов КЗ проявляется, прежде всего, последующим неправильным расчетом релейной защиты.

Действительно, на момент проектных расчетов в большинстве случаев по разным причинам нет полной схемы внешнего электроснабжения тяговых подстанций, поэтому результаты расчетов в проекте в ряде случаев являются приближенными. Однако перед первым включением тяговых подстанций после монтажа и наладки такая схема СВЭ (пусть даже временная) уже есть, и поэтому в дальнейшем уточненный расчет токов КЗ производят специалисты эксплуатационных организаций.

Попытки уточненных методов расчета предпринимались в [3, 4]. Однако они были связаны с дополнительными условиями организации опытов КЗ [3] или с необходимостью дополнительных расчетов сопротивлений линий к тяговым подстанциям [4]. Поэтому в представленной работе поставлена задача разработать уточненный метод расчета токов КЗ при условии использования только полученных данные от энергосистемы по мощности КЗ (или по сопротивлениям КЗ) смежных тяговых подстанций.

II. Схемы питания тяговых подстанций

Для формирования схемы замещения рассмотрим схемы питания тяговых подстанций (рис. 1) по нормативным документам [5].

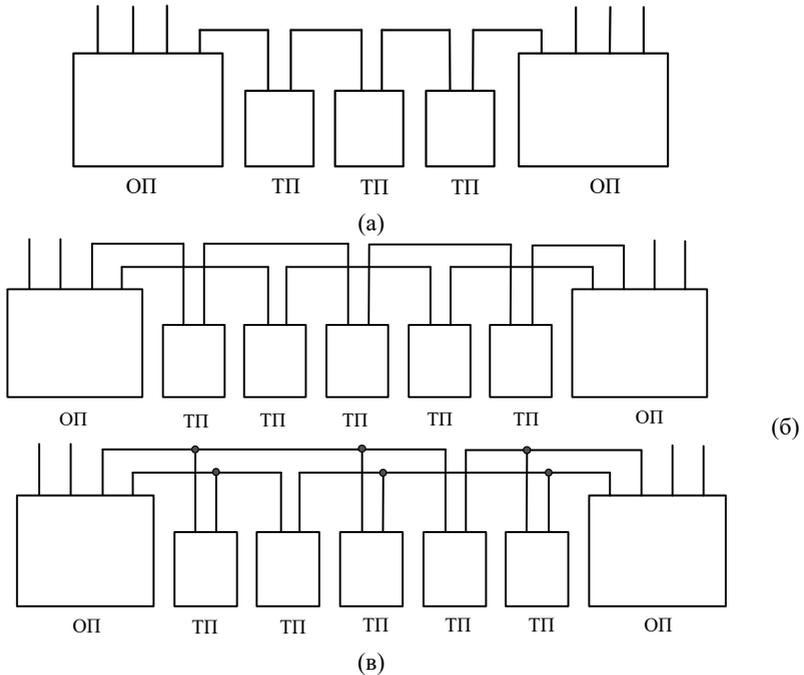


Рис. 1. Схемы подключения тяговых подстанций ТП

к электрическим сетям между двумя опорными подстанциями ОП территориальных сетевых и(или) иных энергоснабжающих организаций: в рассечку одноцепной линии электропередачи (а); в рассечку или на ответвлениях от двухцепной линии электропередачи (б); в рассечку или на ответвлениях от двух одноцепных линий электропередачи (в)

Fig. 1. Schemes for connecting traction substations ТП to electrical networks between two support substations ОП of territorial grid and (or) other power supply organizations:

into the cut of a single-circuit power transmission line (a); in a cut or on branches from a double-circuit line (b); in a cut or on branches from two single circuit lines (c)

Как видно на рис. 1, если длина линии ВЛ-110(220) кВ между смежными подстанциями ограничена расстоянием между подстанциями (по системе 25 кВ это примерно 50-60 км), указанное расстояние по схеме элек-

троснабжения на рис. 2 увеличивается до двойного расстояния между смежными подстанциями, а на рис. 3 это расстояние по системе 25 кВ может быть более 100-150 км. В системе 2х25 кВ эти расстояния еще больше. Таким образом, в системе 25 кВ расстояния между двумя смежными подстанциями могут быть от 50 до 150 км, а в системе 2х25 кВ в 1,5 раза больше.

III. Оценка погрешности расчета токов КЗ

Выполним расчеты токов КЗ для различных схем питания тяговых подстанций с целью определения максимальной погрешности, что в дальнейшем даст возможность обосновать методы расчета, исключающих погрешность в определении токов КЗ. Оценку погрешности определим путем расчета токов КЗ по нормативному методу, т.е. по документу [1]. В этом случае используют данные энергосистемы по мощности КЗ (или сопротивления КЗ) на шинах тяговых подстанций. При этом эквивалентруется вся схема электроснабжения СВЭ при питании рассматриваемых тяговых подстанций.

Далее сравним полученные расчеты с аналогичными в полной схеме электроснабжения СВЭ при питании места КЗ. Совершенно ясно, что для сравнительных расчетов должны быть одинаковые мощности КЗ на вводах тяговых подстанциях в сравниваемых вариантах. В этом случае возможны два пути расчета:

- 1) принимается мощность КЗ на подстанции по данным энергосистемы, и по реальной схеме СВЭ определяются ее параметры так, чтобы в результате получилась мощность КЗ на подстанции равной исходной;
- 2) определяется реальная схема СВЭ, рассчитываются ее параметры, и в результате определяется, какая должна быть мощность КЗ от энергосистемы.

В дальнейшем будем вести расчеты по второму пути.

Выполним расчет токов КЗ с двухцепной ВЛ-110кВ по схеме питания на рис. 1в с транзитными и отпаечными подстанциями, в которой укажем все расстояния линий ВЛ-110кВ до подстанций ТП-2, ТП-3, ТП-4 и представим на рис. 2.

Для расчета принимаем все расстояния между подстанциями и от пункта питания до ТП-1 – 50 км, провод АС-185, погонное сопротивление $Z = 0,17 + j0,377$ [6]. Тип контактной подвески принимаем ПБСМ-70+МФ-100, погонное сопротивление контактной подвески двухпутного участка $Z = 0,111 + j0,286$ [1].

Рассмотрим четыре варианта расчетов:

1 вариант – Подстанция ТП-2 подключена к ВЛ-1 и связь между ТП-2 и ТП-3 по линии ВЛ-110 кВ составляет 150 км;

2 вариант – ТП-2 подключена к ВЛ2, «перемычка» 50 км;

3 и 4 варианты повторяют варианты 1 и 2, но источник питания подключается непосредственно к ТП-1 и приближается к ТП-2 на расстояние 50 км.

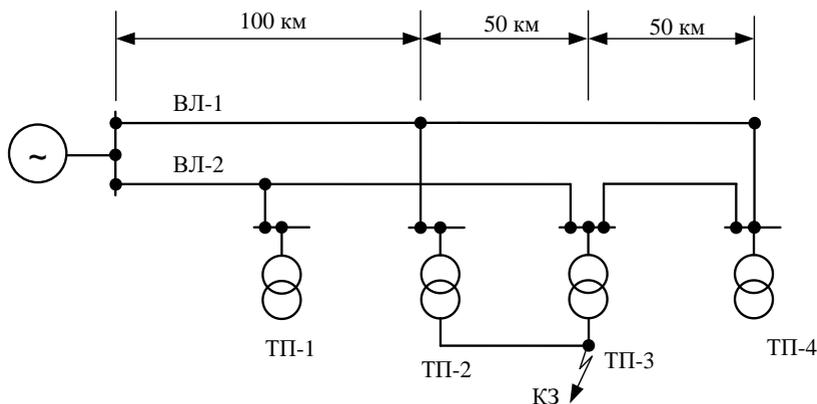


Рис. 2. Схема подключения тяговых подстанций к линии ВЛ-110 кВ
Fig. 2. Connection diagram of traction substations to the 110 kV overhead line

Как показали последующие расчеты мощности, КЗ на ТП-2 и ТП-3 в вариантах 1 и 2 (и, соответственно, в 3 и 4) не изменяются.

Результаты расчета по программе РАСТ-05К [7] приведены в табл. 1. Из приведенных данных следует: если расстояние по ВЛ-110кВ между смежными подстанциями 150 км (вариант 1), погрешность расчета токов КЗ составляет 26 %, но она резко возрастает до 51 %, когда ТП-2 переключается к ВЛ-2, и расстояние между смежными подстанциями ТП-2 и ТП-3 по ВЛ-110 кВ становится равным 50 км. Также следует, что токи КЗ по нормативному методу больше реальных токов КЗ. Если же расстояние до источника питания уменьшить на 50 км (варианты 3 и 4, считаем, что при этом мощность КЗ на шинах источника питания не изменилась), то уменьшатся погрешности расчетов тока КЗ при обеих «перемычках». Однако, все равно с уменьшением сопротивления «перемычки» погрешность расчета в варианте 50 км значительно больше, чем в варианте в 150 км (сравните 28 % и 13 %). Таким образом, можно утверждать, что погрешность расчета токов КЗ в тяговой сети зависит и от расстояния до источника питания (т.е. от мощности КЗ на шинах тяговых подстанциях) и, кроме того, от сопротивления «перемычки» между смежными подстанциями. При этом наибольшее значение погрешности будет при непосредственном соединении двух смежных подстанций (т.е. при 50-60 км).

Таблица 1.
Токи КЗ при разных расстояниях ВЛ-110 кВ,
соединяющих смежные подстанции

Table 1.
Short-circuit currents at different distances of 110 kV
overhead lines connecting adjacent substations

Условия расчета по рис. 2	Токи в полной схеме, А		Токи по нормативному методу [1], А		Отношение расчетных сравняемых токов		Мощ- ность КЗ
	В тяго- вой сети	Сум- марный ток КЗ	В тяго- вой сети	Сум- марный ток КЗ	В тяго- вой сети	Сум- марно- го	
Вариант 1 («перемычка» 150 км)	979	3938	1238	4423	1,26	1,12	405/ 324
Вариант 2 («перемычка» 50 км)	820	3688	1238	4423	1,51	1,20	
Вариант 3 («перемычка» 150 км)	1190	4847	1344	5147	1,13	1,06	729/ 456
Вариант 4 «перемычка» 50 км)	1045	4591	1344	5147	1,28	1,12	

Совершенно ясно, что при ВЛ-220 кВ, а также в системе 2х25 кВ погрешности расчета токов КЗ снижаются, так как сопротивления «перемычек» увеличиваются.

IV. Преобразование схемы внешнего электроснабжения

Для всех способов подключения можно представить единую схему замещения: два луча линии 110 (220) кВ от шин 110 (220) кВ тяговых подстанций до источника питания и одна линия 110 (220) кВ, соединяющая тяговые подстанции, т.е. схему замещения в виде «треугольника». Отметим, что для системы 2х25 кВ расстояния между подстанциями увеличивается, и поэтому увеличивается линия 110 (220) кВ между ними. Схема замещения для двух узлов шин 110 (220) кВ смежных подстанций представлена на рис. 3а. Обозначения на рисунке: Z_{01} и Z_{02} – сопротивления от источника питания до узлов двух смежных тяговых подстанций, у которых сопротивления КЗ, переданных от энергосистемы, соответственно равны Z_{c1} и Z_{c2} ; Z_{12} – сопротивление, соединяющее шины 110 (220) кВ двух подстанций.

Преобразованная схема «треугольника» в «звезду» показана на рис. 3(б). Полученное в схеме «звезда» сопротивление Z_1 представляет взаимное сопротивление двух рассматриваемых узлов.

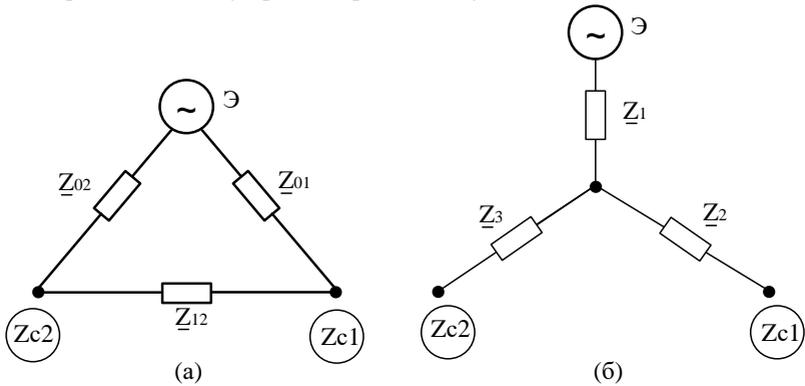


Рис. 3. Преобразование схемы внешнего электроснабжения из «треугольника» (а) в «звезду» (б)

Fig. 3. Conversion of the external power supply circuit from a «triangle» (a) to a «star» (b)

По схеме на рис. 3(а) сопротивления Z_{c1} и Z_{c2} определяются следующим образом:

$$Z_{c1} = \frac{Z_{01} \cdot (Z_{02} + Z_{12})}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}; \quad (1)$$

$$Z_{c1} = \frac{Z_{02} \cdot (Z_{01} + Z_{12})}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}. \quad (2)$$

В этих уравнениях известные значения Z_{c1} и Z_{c2} , а неизвестные – Z_{01} и Z_{02} . Из системы уравнений (1) и (2) определяем Z_{01} и Z_{02} и далее по формуле преобразования Δ в Y находим сопротивления лучей «звезды» по рис. 3(б) – Z_1 , Z_2 , Z_3 :

$$Z_1 = \frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}; \quad (3)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{01} \cdot Z_{12}}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}; \quad (4)$$

$$Z_3 = \frac{Z_{12} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}. \quad (5)$$

Из выражений (3)-(5) ясно, что узловые сопротивления шин 110 (220) кВ тяговых подстанций равны:

$$Z_{C1} = Z_2 + Z_1; Z_{C2} = Z_3 + Z_1.$$

Взаимное сопротивление указанных узлов – Z_1 .

Путем преобразования (1) и (2) получим квадратные уравнения с известными Z_{01} и Z_{02} :

$$Z_{01}^2 \cdot (Z_{C1} - Z_{12} - Z_{C2}) + Z_{01} \cdot (2 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{12} - Z_{12}^2) + Z_{C1} \cdot Z_{12}^2 = 0; \quad (6)$$

$$Z_{02}^2 \cdot (Z_{C2} - Z_{12} - Z_{C1}) + Z_{02} \cdot (2 \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12} - Z_{12}^2) + Z_{C2} \cdot Z_{12}^2 = 0. \quad (7)$$

Решения (6) и (7), при которых получаются положительные значения сопротивлений, имеют вид:

$$Z_{01} = \frac{Z_{12}^2 - 2 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{12}}{2 \cdot (Z_{C1} - Z_{12} - Z_{C2})} - \frac{\sqrt{Z_{12}^4 + 4 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12}^2}}{2 \cdot (Z_{C1} - Z_{12} - Z_{C2})}; \quad (8)$$

$$Z_{02} = \frac{Z_{12}^2 - 2 \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12}}{2 \cdot (Z_{C2} - Z_{12} - Z_{C1})} - \frac{\sqrt{Z_{12}^4 + 4 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12}^2}}{2 \cdot (Z_{C2} - Z_{12} - Z_{C1})}. \quad (9)$$

Таким образом, окончательные выражения (8) и (9) получены из (1) и (2). Совершенно ясно, что при отсутствии Z_{12} $Z_{01} = Z_{C1}$ и $Z_{02} = Z_{C2}$, но это же получается, когда в (1) и (2) при $Z_{12} = \infty$ (бесконечность) $Z_{01} = Z_{C1}$ и $Z_{02} = Z_{C2}$. Указанное является доказательством справедливости исходных позиций (1) и (2) и, соответственно, получения (8) и (9).

Уточненный метод расчета токов КЗ

Известны реальные схемы раздельного питания энергосистем, когда возможен случай отсутствия линии ВЛ-110(220) кВ между подстанциями, т.е. отсутствует сопротивление Z_{12} (обычно эта линия отключается у подстанции). Тогда $Z_{01} = Z_{C1}$ и $Z_{02} = Z_{C2}$ и нет необходимости применения (7) и (8), а расчет токов КЗ следует производить по существующему нормативному методу [1].

Таким образом, для уточненного метода расчета токов КЗ в тяговой сети формируется следующий алгоритм.

1. Определяются два сопротивления Z_{01} , Z_{02} , по рис. 3(а) и добавляется Z_{12} к данным для расчета токов КЗ в тяговой сети.

2. Рассчитываются три сопротивления Z_1 , Z_2 , Z_3 в схеме «звезда» по рис. 3(б) по (3)-(5).

3. По данным п. 2, т.е. по данным схемы замещения электроснабжения СВЭ для двух смежных тяговых подстанций (рис. 4), рассчитываются

токи КЗ в тяговой сети.

Использованные обозначения: Z_{AB} – сопротивление в месте КЗ, $Z_{тсА}$ и $Z_{тсВ}$ – эквивалентные сопротивления тяговой сети на первом и втором участках межподстанционной зоны; $Z_{трА}$ и $Z_{трВ}$ – сопротивления тяговых трансформаторов (приведенные к напряжению 27,5 кВ); Z_1 – взаимное сопротивление линий 110 (220) кВ к тяговым подстанциям; Z_2 и Z_3 – сопротивления линий 110 (220) кВ к тяговым подстанциям ТП А и ТП В (приведенные к напряжению 27,5 кВ); $U_{AB,пас}$ – напряжение источника питания, приведенное к тяговой обмотке, принимается по соответствующим требованиям нормативных документов [1].

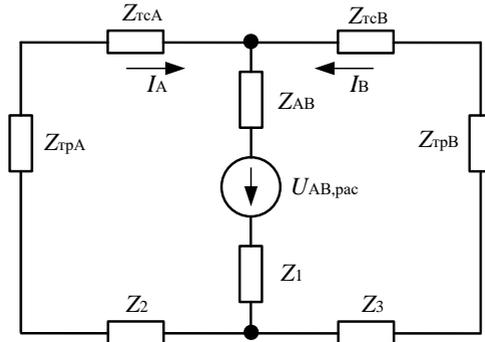


Рис. 4. Схема замещения системы тягового электроснабжения для расчета токов КЗ в тяговой сети

Fig. 4. The equivalent circuit of the traction power supply system for calculating the short-circuit currents in the traction network

Так решается задача уточненного расчета токов КЗ по данным энергосистемы (т.е. по данным мощности КЗ или по сопротивлению КЗ от энергосистемы) и параметрам сопротивления Z_{12} .

Для автоматизации расчетов токов КЗ разработана программа в интегрированной системе MATHCAD в следующей последовательности.

1. По (8) и (9) определяются Z_{01} и Z_{02} .
2. Определяются все значения «треугольника» в схеме замещения по рис. 3(а).
3. Выполняется преобразование схемы «треугольник» в схему «звезда», рис. 3(б).
4. По схеме замещения на рис. 4 рассчитываются токи КЗ в тяговой сети.

Целесообразно для расчетов применять программу РАСТ-05К [7], в которую вводятся параметры схемы «треугольник» и рассчитываются токи КЗ в тяговой сети.

Проверка (8) и (9) выполнена для реальных индуктивных значений сопротивлений СВЭ и показала правильность вывода указанных формул.

Пример. Пусть дано (по данным энергосистемы) $Z_{c1} = 2,38$ Ом $Z_{c2} = 2,62$ Ом и рассчитано $Z_{12} = 1,5$ Ом. Требуется определить параметры схемы замещения.

Решение. По (8) и (9) получим $Z_{01} = 3,65$ Ом и $Z_{02} = 5,33$ Ом, далее по (3)-(5) определяем Z_1, Z_2, Z_3 .

Итак, если раньше для расчета взаимного сопротивления Z_1 необходимо было провести расчеты и измерения на действующей подстанции [2], то теперь этого не требуется, на основании полученных (8) и (9) можно получить все параметры схемы замещения для уточненного расчета токов короткого замыкания в тяговой сети.

VI. Выводы

Разработан уточненный метод расчета токов КЗ по данным сопротивлений КЗ от энергосистемы в схеме замещения «треугольник», у которого два луча сопротивления соединяют шины 110 (220) кВ двух смежных тяговых подстанций с источником питания, а указанные шины соединяются линией 110 (220) кВ.

Сформирован алгоритм расчета токов КЗ вычислением параметров схемы замещения.

Расчет токов КЗ автоматизирован с использованием интегрированной системы MATCAD и программы РАСТ-05К.

© Герман Л.А., 2021

© Карпов И.П., 2021

Поступила в редакцию 09.06.2021

Received 09.06.2021

Библиографический список

- [1] СТО РЖД 07.021.4-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока. Введ. 2016-05-01. М. – 136 с.
- [2] Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1.С. 5-10.
- [3] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Серебряков А.С. Стенд для расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Пат. 2705517 RU, заявл. 26.12.2018; опубл. 07.11.2019. – Бюл. № 31.
- [4] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Попова Н.А. Схемы замещения системы внешнего электроснабжения электрифицированного транспорта напряжением 27,5 кВ // Электричество. 2020. № 8. С. 30-35. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-29-36.

- [5] СП 224.132600.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. М.: Техинформ, 2019. – 304 с.
- [6] Караев Р.И., Волобрынский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. М.: Транспорт, 1988. – 326 с.
- [7] Герман Л.А., Морозов Д.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. М.: МИИТ, 2010. – 60 с.

References

- [1] Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoj dorogi ot korotkih замыканий i peregruzki. СНаст' 4. Metodika vybora ustavok zashchit v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 4. Methodology for selection of protection settings in the AC traction power supply system], СТО RZD 07.021.4-2015, May 2016 (in Russian).
- [2] L.A. German, K.V. Kishkurno and K.S. Subhanverdiev, “Estimation of an error of calculation of short-circuit currents in ac tractive circuit”, *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, no. 1, pp. 5-10, 2017.
- [3] L.A. German, K.S. Subhanverdiev and A.S. Serebryakov, “Stend dlya rascheta tokov korotkogo замыкания v tyagovoj seti peremennogo toka [Stand for calculating short-circuit currents in AC traction network]”, Patent RU 2705517, Dec. 26, 2018 (in Russian).
- [4] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and N.A. Popova, “Equivalent circuits of the 27.5 kV electric railway external power supply system”, *Electricity*, no. 8, pp. 30-35, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-29-36.
- [5] Tyagovoe elektrosnabzhenie zheleznoj dorogi [Traction power supply of the railway], СП 224.132600.2014, Dec. 2014. Moscow: Techinform, 2019 (in Russian).
- [6] R.I. Karaev, S.D. Volobrynsky and I.N. Kovalev, *Elektricheskie seti i energosistemy [Electrical networks and power systems]*. Moscow: Transport, 1988 (in Russian).
- [7] German L.A. and Morozov D.A. *Raschet tipovykh zadach tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka na EVM [Calculation of typical tasks of AC traction power supply on a computer]*. Moscow: МИИТ, 2010 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Н. Новгороде, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Карпов Иван Петрович, старший электромеханик Дорожной электротехнической лаборатории филиала ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Branch of the Samara State University of Railway Transport in N. Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Ivan P. Karpov, senior electrical engineer of the Railway electrotechnical laboratory of the Branch of JSC «Russian Railways» Transenergo Gorky directorate for energy supply, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ТОКИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 кВ

М.А. Авербух

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Белгород, Россия
avers45@rambler.ru

Д.А. Прасол

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Белгород, Россия
dapras@mail.ru

Подавляющее большинство повреждений в сетях среднего напряжения приходится на однофазные замыкания на землю. При оценке параметров переходных процессов однофазных замыканий обычно не учитывается влияние высших гармонических составляющих. В то же время в системах электроснабжения получают все более широкое распространение потребители с нелинейными вольтамперными характеристиками, что влияет на рост доли высших гармонических составляющих в токах однофазных замыканий. Высокое содержание высших гармонических составляющих имеют токи и напряжения в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью промышленных предприятий, особенно рудодобывающих предприятий. В системах электроснабжения рудников присутствуют мощные нелинейные нагрузки: центральные подземные подстанции, подъемные установки, компрессоры, вентиляторы проветривания и т.п. Оценка влияния высших гармоник на токи однофазного замыкания на землю производится на основании результатов экспериментальных исследований, проведенных в системе электроснабжения действующего рудодобывающего предприятия. Основными источниками высших гармоник в исследуемой схеме являются тиристорные электроприводы постоянного тока подъемных установок, выполненные по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением. Однако не всегда выполняется учет токов высших гармоник при определении уставок защит однофазных замыканий на землю. Токи высших гармонических составляющих могут увеличивать токи однофазного замыкания на землю в несколько раз. Это может приводить к утяжеленным режимам работы или аварийным ситуациям. Поэтому оценка влияния высших гармоник на токи однофазных замыканий на землю является важной и актуальной задачей. В работе предложен вариант аналитического расчета токов однофазного замыкания на землю с учетом высших гармонических составляющих токов кратных трем. Кроме этого, на величину тока замыкания оказывает влияние режим работы электрической системы и контур протекания тока.

Ключевые слова: высшие гармонические составляющие токов, мощные нелинейные электроприемники, сеть с изолированной нейтралью, токи однофазного замыкания на землю.

Для цитирования: Авербух М.А., Прасол Д.А. Оценка влияния высших гармоник на токи однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-10 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 26-40. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_26

ASSESSMENT OF INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS ON SINGLE-PHASE EARTH FAULT CURRENTS IN 6-10 kV NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

M.A. Averbukh

Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov
Belgorod, Russia
avers45@rambler.ru

D.A. Prasol

Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov
Belgorod, Russia
dapras@mail.ru

Abstract. The vast majority of faults in medium voltage networks are caused by single-phase earth faults. When evaluating the parameters of transient processes of single-phase closures, the influence of higher harmonic components is usually not taken into account. At the same time, consumers with nonlinear volt-ampere characteristics are becoming more and more widespread in power supply systems, which affects the increase in the proportion of higher harmonic components in single-phase circuit currents. The currents and voltages in 6-10 kV networks with isolated neutral of industrial enterprises, especially mining enterprises, have a high content of higher harmonic components. The power supply systems of mines contain powerful non-linear loads, such as central underground substations, hoisting installations, compressors, ventilation fans, etc. The assessment of the influence of higher harmonics on single-phase earth fault currents is based on the results of experimental studies carried out in the power supply system of an operating ore mining enterprise. The main sources of higher harmonics in the investigated circuit are thyristor DC electric drives of hoisting installations, made according to the system thyristor converter – DC motor with independent excitation. However, the consideration of the higher harmonic currents is not always carried out when determining the settings for the protection of single-phase earth faults. The currents of higher harmonic components can increase the single-phase earth fault currents several times. This can lead to heavy duty or emergency situations. Therefore, the assessment of the influence of higher harmonics on the currents of single-phase earth faults is an important and urgent task. The paper proposes a variant of the analytical calculation of single-phase earth fault currents, taking into account

the higher harmonic components of currents multiples of three. In addition, the magnitude of the fault current is influenced by the operating mode of the electrical system and the current flow circuit.

Keywords: higher harmonic components of currents, network with isolated neutral, powerful non-linear electrical receivers, single-phase earth fault currents.

For citation: M.A. Averbukh and D.A. Prasol, "Assessment of influence of higher harmonics on single-phase earth fault currents in 6-10 kV networks with isolated neutral", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 26-40, 2021.
DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_26

I. Введение

В настоящее время сети среднего напряжения 6-10 кВ с изолированной нейтралью широко используются в системах электроснабжения промышленных предприятий и объектов. Одной из проблем таких сетей является наличие токов утечки и однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). В процессе внедрения в промышленные сети 6-10 кВ мощных электроприемников, таких как полупроводниковые преобразователи, регулируемые электроприводы, дуговые сталеплавильные печи, печи сопротивления, сварочные цеха, происходит значительный рост нелинейных нагрузок. Это в свою очередь приводит к генерированию в сеть высших гармоник (ВГ). Если влияние высших гармоник на качество электроэнергии, потери мощности в сетях достаточно хорошо изучены [1, 2], то влияние ВГ на токи утечки и на токи ОЗЗ, и соответственно на работу защит, требует дополнительного изучения. ОЗЗ – вид повреждений, преобладающий в сетях среднего напряжения, который составляет 70-90 % от общего числа повреждений [3-6]. Зачастую именно ОЗЗ становятся первопричиной серьезных аварий, многофазных коротких замыканий. В настоящее время не все методики расчета этих токов учитывают влияние токов ВГ, несмотря на постоянный рост числа нелинейных электроприемников в сетях с изолированной нейтралью.

II. Характеристика объекта исследования

Исследование состава высших гармонических составляющих тока ОЗЗ проводится на примере фрагмента электрической сети рудодобывающего предприятия (рис. 1). К наиболее энергоемким потребителям электрической энергии рудника относятся следующие объекты: центральные подземные подстанции, скиповая и клетевая подъемные установки, компрессоры, вентиляторы проветривания.

На фрагменте схемы электроснабжения представлены только две секции (К1.1 и К1.3) распределительного устройства 6 кВ главной понижающей подстанции рудника, образующих гальванически связанную цепь для протекания токов утечки и ОЗЗ.

В нормальном режиме секции К1.1 и К1.3 работают отдельно, секционный выключатель $QF1$ отключен. В аварийном режиме, при отключении, например, одного из трансформаторов, секционный выключатель $QF1$ включается и секции работают совместно.

Основной особенностью фрагмента схемы на рис. 1 является наличие электроприводов постоянного тока скиповой и клетевой подъемных установок, которые представляют собой мощную нелинейную нагрузку.

Параметры основных элементов схемы электроснабжения представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1.
Параметры кабельных линий

Table 1.
Parameters of cable lines

Кабельные линии 6 кВ				
Марка кабеля/участок	L , км	$r_{уд}$, Ом/км	$x_{уд}$, Ом/км	$b_{уд}$, мкСм/км
ААБлГ 3×150/ГПП–РУ-6 кВ ЗПМ КПУ	0,45	0,206	0,074	288
ААБлГ 3×150/ГПП–РУ-6 кВ ЗПМ СПУ	0,45	0,206	0,074	288
ААБлГ 3×120/РУ-6 кВ ЗПМ – КТП ЗПМ №1	0,05	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×120/РУ-6 кВ ЗПМ – КТП ЗПМ №2	0,05	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×150/ГПП–РУ-6 кВ «Компрессорная»	2,50	0,206	0,074	288
ААБлГ 3×120/РУ-6 кВ ЗПМ – КТП «Котельная»	0,15	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×150/ГПП – КТП «Тоннель»	5,00	0,206	0,074	288
ААБлГ 3×120/КТП «Тоннель» – КТП «Закладочный комплекс»	3,00	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×120/КТП «Тоннель» – КТП «ЗКМ»	2,00	0,258	0,076	146
АПВВНГ 3×95/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №5	0,185	0,046	0,035	-
АПВВНГ 3×95/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №2	0,185	0,046	0,035	-
АПВВНГ 3×95/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №6	0,185	0,046	0,035	-
ААБлГ 3×120/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – КТП «Строитель»	2,50	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×120/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – КТП «Компрессорная»	1,50	0,258	0,076	146

Таблица 2.
 Параметры трансформаторов и синхронных двигателей

Table 2.
 Parameters of transformers and synchronous motors

Трансформаторы							
Тип	$S_{ном}$, кВА	$U_{ном}$, кВ		$\Delta P_{хх}$, кВт	$\Delta P_{кз}$, кВт	$u_{кз}$, %	$i_{хх}$, %
		ВН	НН				
ТРДН-25000/110	25000	115	6,3-6,3	27	120	10,5	0,7
ТСЗП-4000	4000	6,0	0,825	6,4	25	7,4	1
ГДТП-8000/10 У2	8000	6,0	1,05-1,05 (0,9-0,9)	6,3	53,3	6,0	0,145
ТМ-250	250	6,0	0,4	0,65	3,35	4,0	2,0
ТМ-400	400	6,0	0,4	0,93	4,6	4,0	1,9
ТМ-630	630	6,0	0,4	1,3	6,5	4,0	1,7
ТСЗ-1000/10	1000	6,0	0,4	3,0	11,2	5,5	1,5
Синхронные двигатели							
Тип	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, кВ	$n_{ном}$, об/мин	$\cos\phi_{ном}$	η , %		
СДН14-36-12У3	400	6	500	0,9	92,4		

III. Результаты исследования

Оценка высших гармонических составляющих токов в сети 6 кВ рудодобывающего предприятия выполнена на основании результатов экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились в действующей системе электроснабжения рудника, измерения параметров выполнялись во вводных цепях РУ-6 кВ ЗПМ [7, 8]. Фрагменты результатов измерений параметров и показателей высших гармонических составляющих по току во вводных цепях скиповой и клетевой ПУ приведены в табл. 3. На рис. 2 представлены спектры гармоник тока в сети 6 кВ рудодобывающего предприятия при работе скиповой и клетевой ПУ.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что наиболее выраженными являются канонические 11, 13, 23, 25, 35 и 37-я гармоники токов, поскольку тиристорные преобразователи выполнены по 12-пульсной схеме выпрямления. Однако, в сети также присутствуют высшие гармонические составляющие токов кратные трем, что определяет их влияние на токи ОЗЗ.

Значение тока искажения, создаваемого высшими гармониками, кратными трем до 40-й гармоники, определяются по выражению:

$$I_{И.н=3} = \sqrt{\sum_{i=1}^{3n} I_i^2} = \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2 + I_{27}^2 + I_{33}^2 + I_{39}^2}. \quad (1)$$

Таблица 3.
Величины коэффициентов гармонических составляющих по току

Table 3.
The values of the coefficients of harmonic current components

Скиповая ПУ									
$I_{(1)}, A$	$K_I, \%$	$K_{I(3)}, \%$	$K_{I(5)}, \%$	$K_{I(7)}, \%$	$K_{I(9)}, \%$	$K_{I(11)}, \%$	$K_{I(13)}, \%$	$K_{I(15)}, \%$	$K_{I(21)}, \%$
425,80	8,0	0,9	0,4	0,4	0,7	5,7	4,1	0,6	0,5
	$K_{I(23)}, \%$	$K_{I(25)}, \%$	$K_{I(27)}, \%$	$K_{I(29)}, \%$	$K_{I(31)}, \%$	$K_{I(33)}, \%$	$K_{I(35)}, \%$	$K_{I(37)}, \%$	$K_{I(39)}, \%$
	2,0	1,9	0,5	0	0,1	0,30	0,80	1,0	0,30
Клетевая ПУ									
$I_{(1)}, A$	$K_I, \%$	$K_{I(3)}, \%$	$K_{I(5)}, \%$	$K_{I(7)}, \%$	$K_{I(9)}, \%$	$K_{I(11)}, \%$	$K_{I(13)}, \%$	$K_{I(15)}, \%$	$K_{I(21)}, \%$
438,84	9,37	1,32	0,81	0,43	1,85	7,18	2,83	1,35	1,57
	$K_{I(23)}, \%$	$K_{I(25)}, \%$	$K_{I(27)}, \%$	$K_{I(29)}, \%$	$K_{I(31)}, \%$	$K_{I(33)}, \%$	$K_{I(35)}, \%$	$K_{I(37)}, \%$	$K_{I(39)}, \%$
	2,92	1,08	1,12	0,19	0,79	1,25	1,38	0,81	0,89

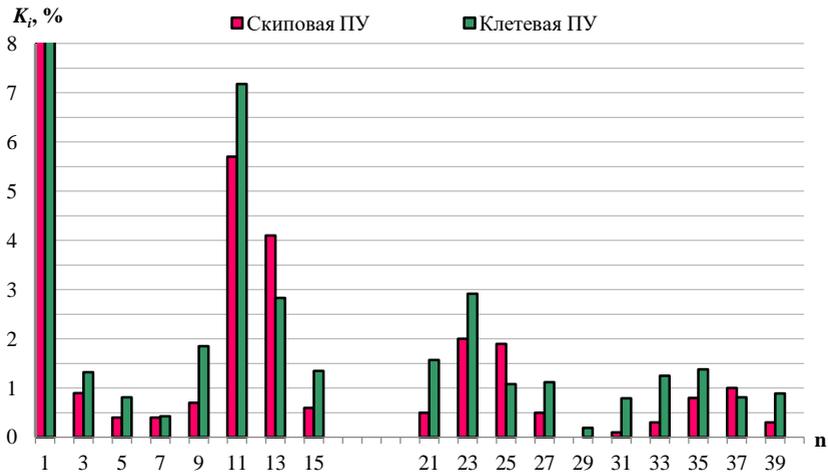


Рис. 2. Спектры гармоник тока на шинах 6 кВ
Fig. 2. Harmonic spectra of current on 6 kV buses

Результаты расчета значений токов высших гармонических составляющих, кратных трем, а также значений токов искажения, создаваемых этими гармониками, приведены в табл. 4.

Таблица 4.
Результаты расчета токов ВГ кратных трем и токов искажения

Table 4.
The results of the calculation of higher harmonic components of currents that are multiples of three and distortion currents

$K_I, \%$	$K_{I(n)}, \%$						
	3	9	15	21	27	33	39
8,0*	0,9	0,7	0,6	0,5	0,12	0,3	0,3
9,37**	1,32	1,85	1,35	1,57	1,12	1,25	0,89
	I_n, A						
$I_{(1)}, A$	3	9	15	21	27	33	39
425,80*	3,832	2,981	2,555	2,129	0,511	1,277	1,277
438,84**	5,793	8,119	5,924	6,890	4,915	5,486	3,906
	$I_{\Sigma, n=3}, A$						
	6,177*						
	15,86**						

Примечание: * – для скиповой ПУ; ** – для клетевой ПУ.

Значение емкостного тока однофазного замыкания на землю I_{OC} определяется как сумма емкостных токов линий электропередачи всей гальванически связанной сети $I_{OC,л}$, электродвигателей напряжением выше 1 кВ, присоединенных к электрической сети, с учетом распределительных устройств, относящихся к данной сети [9, 10]:

$$I_{OC} = \left(\sum_{i=1}^n I_{OC,л} + \sum_{i=1}^m I_{OC,д} \right) \cdot K_{py}, \quad (2)$$

где K_{py} – коэффициент, учитывающий увеличение емкостного тока однофазного замыкания на землю электрической сети за счет емкости оборудования распределительных устройств. Значения K_{py} принимают 1,05-1,1 для воздушных и кабельных линий электрических сетей напряжением 6-10 кВ [9, 10].

Емкостной ток ОЗЗ отдельных электродвигателей определяется по формуле [11]:

$$I_{\text{ос.д}} = 2\sqrt{3} \cdot \pi \cdot f \cdot C_{\text{д}} \cdot U_{\text{ном}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота питающей сети, $f_{\text{ном}} = 50$ Гц; $C_{\text{д}}$ – емкость одной фазы статора двигателя, принимая по данным завода-изготовителя или согласно [11] для синхронных двигателей.

Для ориентировочных расчетов при отсутствии сведений завода-изготовителя допускается использовать выражение для определения параметра $C_{\text{д}}$ для электродвигателей [11]:

$$C_{\text{д}} \approx \frac{13,33 \cdot \sqrt[4]{S_{\text{ном}}^3} \cdot 10^{-6}}{(U_{\text{ном}} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n_{\text{ном}}}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность электродвигателя, МВА; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение электродвигателей, В; $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Расчет емкостного тока однофазного замыкания на землю для кабельных линий может быть рассчитан по формуле [9, 10]:

$$I_{\text{ос.л}} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot l}{n}, \quad (5)$$

где n – емкостной коэффициент, $n = 10$, если в электрической сети преобладают кабели сечением выше 70 мм^2 и $n = 6-7$ для всех остальных сечений; l – длина кабельной сети, км.

Расчет емкостных ОЗЗ на землю производится в следующей последовательности:

- 1) составляется расчетная однолинейная схема электроснабжения с учетом максимально возможного количества подключаемого высоковольтного оборудования и при максимальной длине линий электропередач;
- 2) составляется таблица всех элементов, формирующих емкостные токи однофазного замыкания на землю;
- 3) по представленной выше методике производится расчет емкостных токов однофазного замыкания на землю каждого элемента сети;
- 4) суммированием токов гальванически связанных элементов сети определяется максимальный расчетный ток однофазного замыкания на землю.

В табл. 5 представлены значения емкостных токов отдельных элементов сети и суммарных токов замыкания в нормальном и аварийном режимах работы.

Таблица 5.
Результаты расчета емкостных токов
отдельных элементов и суммарных токов ОЗС

Table 5.
The results of the calculation of the capacitive currents
of individual elements and the total currents of single-phase earth faults

Наименование элемента	Тип элемента	Ном. данные	Кол-во	I_{OC} , А	Прим.
Нормальный режим – секция К1.1 РУ-6 кВ ГПП					
Кабельные линии					
ГПП–РУ-6 кВ «Компрессорная»	ААБЛГ 3×150	$L = 2,5$ км	–	1,5	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №5	АПВВНГ 3×95	$L = 0,185$ км	–	0,111	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №2	АПВВНГ 3×95	$L = 0,185$ км	–	0,111	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №6	АПВВНГ 3×95	$L = 0,185$ км	–	0,111	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – КТП «Строитель»	ААБЛГ 3×120	$L = 2,5$ км	–	1,5	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – КТП «Компрессорная»	ААБЛГ 3×120	$L = 1,5$ км	–	0,9	–
Синхронные двигатели					
Компрессор №5, №2, № 6	СДН14-36-12У3	$P_{ном} = 400$ кВт	3	0,0025	$C = 0,25$ пФ
$I_{OC_K1.1} = (4,233 + 0,0025) \cdot 1,1 = 4,659$ А					
Нормальный режим – секция К1.3 РУ-6 кВ ГПП					
Кабельные линии					
ГПП–РУ-6 кВ ЗПМ КПУ	ААБЛГ 3×150	$L = 0,45$ км	–	0,27	–
ГПП–РУ-6 кВ ЗПМ СПУ	ААБЛГ 3×150	$L = 0,45$ км	–	0,27	–
РУ-6 кВ ЗПМ – КТП «Котельная»	ААБЛГ 3×120	$L = 0,15$ км	–	0,09	–
РУ-6 кВ ЗПМ – КТП ЗПМ №1	ААБЛГ 3×120	$L = 0,05$ км	–	0,03	–
РУ-6 кВ ЗПМ – КТП ЗПМ №2	ААБЛГ 3×120	$L = 0,05$ км	–	0,03	–
ГПП – КТП «Тоннель»	ААБЛГ 3×150	$L = 5,00$ км	–	3	–

Продолжение табл. 5
Table 5 (continued)

Наименование элемента	Тип элемента	Ном. данные	Кол-во	I_{OC} , А	Прим.
КТП «Тоннель» – КТП «Закладочный комплекс»	ААБЛГ 3×120	$L = 3,00$ км	–	1,8	–
КТП «Тоннель» – КТП «ЗКМ»	ААБЛГ 3×120	$L = 2,00$ км	–	1,2	–
$I_{OC_K1.3} = (6,69 + 0,0) \cdot 1,1 = 7,359$ А					
Аварийный режим – секции К1.1 и К1.3 РУ-6 кВ ГПП					
$I_{OC_AB} = I_{OC_K1.1} + I_{OC_K1.3} = 4,659 + 7,359 = 12,018$ А					

Как следует из результатов расчета (табл. 5), максимальный ток однофазного замыкания, который может быть принят за расчетный, составляет $I_{OC} = 12,02$ А.

Учет высших гармоник кратных трем осуществляется по формуле:

$$I_{Ci} = \sqrt{I_{OC}^2 + I_{и,n=3}^2}, \quad (6)$$

где $I_{и,n=3}$ – суммарный ток искажения гармоник, кратных трем.

Одновременная работа скиповой и клетевой ПУ исключена. Поэтому в сеть 6 кВ возможно генерирование ВГ составляющих токов, кратных трем, только одной подъемной установкой. Результаты расчетов токов ОЗЗ приведены в табл. 6.

Таблица 6.

Результаты расчета токов однофазного замыкания на землю с учетом ВГ составляющих токов, кратных трем

Table 6.

The results of the calculation of single-phase earth fault currents, taking into account the higher harmonic components of currents that are multiples of three

Режим	$I_{OC_K1.1}$, А	$I_{OC_K1.3}$, А	I_{OC_AB} , А	$I_{и*,n=3}$, А	$I_{и**,n=3}$, А	I_{Ci} , А	I_{Ci} / I_{OC}
Нормальный режим № 1: К1.3 + СПУ	–	7,359	–	6,177	–	9,608	1,31
Нормальный режим № 2: К1.3 + КПУ	–	7,359	–	–	15,86	17,484	2,38

Продолжение табл. 6
Table 6 (continued)

Режим	$I_{oc_к1.1},$ А	$I_{oc_к1.3},$ А	$I_{oc_ав},$ А	$I_{и^*,n=3},$ А	$I_{и^{**},n=3},$ А	$I_{ci},$ А	$I_{ci} /$ I_{oc}
Аварийный режим № 1: К1.1 + К1.3 + СПУ	4,659	7,359	12,018	6,177	–	13,512	1,12
Аварийный режим № 2: К1.1 + К1.3 + КПУ	4,659	7,359	12,018	–	15,86	19,899	1,66

Примечание: * – для скиповой ПУ; ** – для клетевой ПУ.

IV. Заключение

В сети среднего напряжения 6 кВ рудника с изолированной нейтралью токи однофазного замыкания на землю составили значения от 4,7 до 7,4 А в нормальном режиме и до 12 А – в аварийном режиме. На величину тока однофазного замыкания на землю, в первую очередь, влияет наличие протяженных кабельных линий 6 кВ, а также мощных высоковольтных электродвигателей, например, синхронных двигателей компрессорных установок. Доказано, что электроприводы подъемных установок, выполненные по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, являются главными источниками генерации ВГ в высоковольтную рудничную сеть [7, 8].

Определены суммарные токи высших гармонических составляющих, кратных трем, генерируемые электроприводами подъемных установок. Значения токов высших гармонических составляющих, кратных трем, не зависят от режима однофазного замыкания, они одинаковы как в нормальном режиме работы, так и при однофазных замыканиях. Определены максимальные значения токов ОЗЗ при учете высших гармоник, кратных трем, необходимые для определения уставок защит [12, 13]. Максимальные значения токов ОЗЗ с учетом ВГ составляющих токов, кратных трем, составили от 9,6 А и до 19,9 А в различных режимах работы схемы. Токи высших гармонических составляющих, кратных трем, увеличивают токи однофазного замыкания на землю более чем в 2 раза. Поэтому оценка высших гармоник, кратных трем, является важной и актуальной задачей.

В электрических системах, работающих с изолированной нейтралью, спектр ВГ как в токах нулевой последовательности неповрежденных присоединений, так и в токе ОЗЗ определяется спектром ВГ на поврежденной фазе в момент до возникновения повреждения [12-17]. Влияние на уровень гармонических искажений в токе ОЗЗ также оказывают параметры контура протекания тока.

© Авербух М.А., 2021

© Прасол Д.А., 2021

Поступила в редакцию 22.03.2021

Received 22.03.2021

Библиографический список

- [1] Вагин Г.Я., Юртаев С.Н. К вопросу о нормировании несинусоидальности напряжения и ущерба от высших гармоник // Промышленная энергетика. 2017. № 1. С. 43-47.
- [2] Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6 (1055). С. 54-59. DOI: 10.34831/EP.2019.1055.44184.
- [3] Калихман С.А., Злобин Ю.И. Режимы нейтрали и перенапряжения. Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1994. – 64 с.
- [4] Щуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных поврежденных электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
- [5] Шуин В.А. Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, в электрических сетях 3–35 кВ: дис. д-ра техн. наук, ВНИИЭ, Москва, 1994. – 523 с.
- [6] Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. Киев: Наукова Думка, 1985. – 264 с.
- [7] Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В. Экспериментальная оценка параметров режимов в высоковольтных рудничных сетях с мощными нелинейными электроприемниками // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 2. С. 75–84. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-75-84.
- [8] Авербух М.А., Прасол Д.А. Анализ электромагнитной совместимости сети высокого напряжения горнорудного предприятия // Энергетик. 2018. № 2. С. 36–41.
- [9] Дударев Л.Е., Лукьянцев Н.М. К расчету установившихся емкостных токов замыкания на землю в схемах электроснабжения промышленных предприятий // Автоматизация и оптимизация режимов электрических систем и приводов. Донецк: Изд-во ДПИ, 1971. С. 105–108.
- [10] Дударев Л.Е., Запороженко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. 1971. № 8. С. 64–66.
- [11] Корогодский В.И., Куженов С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 315 с.
- [12] Кискачи В.М. Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник // Электричество. 1967. № 9. С. 24–29.
- [13] Ширковец А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги // Релейная защита и автоматизация. 2011. № 4. С. 14–19.
- [14] Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. 1957. № 5. С. 31–36.

- [15] Вайнштейн В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания на землю // Промышленная энергетика. 1986. № 1. С. 39–40.
- [16] Шклярский Я.Э., Брагин А.А., Добуш В.С. Влияние гармонического состава тока и напряжения на мощность искажения // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 4. С. 26–31.
- [17] Винокурова Т.Ю., Добрягина О.А., Шагурина Е.С., Шуин В.А. Применение имитационного моделирования для оценки уровня нестабильности высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. 2014. Вып. 6. С. 31–38.

References

- [1] G.Ya. Vagin and S.N. Yurtaev, “To the rationing of voltage nonsinusoidality and detriment attributed to higher harmonics”, *Industrial Power Engineering*, no. 1, pp. 43–47, 2017.
- [2] G.Ya. Vagin and A.L. Kulikov “Electricity quality in power supply systems. Analysis of rationing and control methods”, *Electrical Stations*, no. 6 (1055), pp. 54–59, 2019. DOI: 10.34831/EP.2019.1055.44184.
- [3] S.A. Kalikhman and Yu.I. Zlobin, *Rezhimy nejtrali i perenapryazheniya [Neutral and overvoltage modes]*. Cheboksary: Chuvash University, 1994 (in Russian).
- [4] V.I. Shchutsky, V.O. Zhidkov and Yu.N. Il'yin, *Zashchitnoe shuntirovanie odnofaznykh povrezhdenij elektroustanovok [Protective shunting of single-phase faults of electrical installations]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [5] V.A. Shuin, “Teoriya i prakticheskaya realizaciya zashchit ot odnofaznykh zamykanij na zemlyu, osnovannyh na ispol'zovanii perekhodnyh processov, v elektricheskikh setyah 3–35 kV [Theory and practical implementation of protection against single-phase ground faults based on the use of transient processes in electrical networks 3–35 kV]”, D. of Tech. S. dissertation, VNIIE, Moscow, 1994 (in Russian).
- [6] I.M. Sirota, S.N. Kislenko and A.M. Mikhailov, *Rezhimy nejtrali elektricheskikh setej [Neutral modes of electrical networks]*. Kiev: Naukova Dumka, 1985 (in Russian).
- [7] M.A. Averbukh, D.A. Prasol and S.V. Khvorostenko, “Experimental evaluation of mode parameters in high-voltage mine networks with powerful nonlinear electric receivers”, *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, vol. 21, no. 2, pp. 75–84, 2017. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-75-84.
- [8] M.A. Averbukh and D.A. Prasol, “Electromagnetic compatibility in the high-voltage network of a mining enterprise”, *Energetik*, no. 2, pp. 36–41, 2018 (in Russian).
- [9] L.E. Dudarev and N.M. Luk'yantsev, “K raschetu ustanovivshihся emkostnykh tokov zamykaniya na zemlyu v skhemah elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij [To the calculation of the steady-state capacitive earth fault currents in the power supply circuits of industrial enterprises]”, in *Automation and optimization of electrical systems and drives modes*. Donetsk: Publishing house of DPI, pp. 105–108, 1971 (in Russian).
- [10] L.E. Dudarev, S.I. Zaporozhchenko and N.M. Luk'yantsev, “Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyah [Arc earth fault in cable networks]”, *Electrical Stations*, no. 8, pp. 64–66, 1971 (in Russian).

- [11] V.I. Korogodskiy, S.L. Kuzhenov and L.B. Paperno, *Relejnaya zashchita elektrodvigatelej napryazheniem vyshе 1 kV [Relay protection of electric motors with voltage above 1 kV]*. Moscow: Energoatomizdat, 1987 (in Russian).
- [12] V.M. Kiskachi, “Selektivnost' signalizacii замыkaniy na zemlyu s ispol'zovaniem vysshih garmonik [Selectivity of signaling earth faults using higher harmonics]”, *Electricity*, no. 9, pp. 24–30, 1967 (in Russian).
- [13] A.I. Shirkovets, “Investigations on the parameters of higher harmonics in ground fault current and evaluation of their influence on the quenching of single phase-to-ground arc”, *Relay Protection and Automation*, no. 4, pp. 14–19, Dec. 2011.
- [14] N.N. Belyakov, “Issledovanie perenapryazhenij pri dugovyh замыkaniyah na zemlyu v setyah 6 i 10 kV s izolirovannoj nejtral'yu [Investigation of overvoltages in arcing faults to the earth in networks of 6 and 10 kV with isolated neutral]”, *Electricity*, no. 5, pp. 31–36, 1957 (in Russian).
- [15] V.L. Vaynshteyn, “Issledovanie vysshih garmonik toka замыkaniya na zemlyu [Investigation of higher harmonics of the earth fault current]”, *Industrial Power Engineering*, no. 1, pp. 39–40, 1986 (in Russian).
- [16] Ya.E. Shklyarskiy, A.A. Bragin and V.S. Dobush, “Effect of current and voltage harmonic spectrum on the distortion power”, *The online edition “Oil and Gas Business”*, no. 4, pp. 26–31, 2012.
- [17] T.Yu. Vinokurova, O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin, “Application of simulation to evaluation of higher harmonics instability of single-phase earth fault current in 6–10 kV compensated cable networks”, *Vestnik IGEU*, no. 6, pp. 31–38, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Авербух Михаил Александрович, доктор технических наук, профессор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

Michael A. Averbukh, D. Sci. (Eng.), professor of the Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation.

Прасол Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

Dmitriy A. Prasol, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation.

УДК 621.313.32

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_41

СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Т.Э. Муртазин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия
tm.murtazin@yandex.ru

В.Г. Титов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия
eos@nntu.ru

Представлена структура векторного управления синхронным электродвигателем, а также инженерная методика расчета элементов системы управления. Предложена математическая имитационная модель частотно-регулируемого синхронного электропривода с векторным управлением. Приведены результаты моделирования. Изучение и разработка систем векторного управления актуальна, поскольку в настоящее время подавляющее большинство регулируемых синхронных электроприводов разрабатывается с таким типом управления. Современное программное обеспечение имитационного моделирования позволяет на этапе проектирования оценивать качество переходных процессов токов, скорости и момента электродвигателя. На основе полученных результатов имеется возможность сформировать требования к синхронным машинам, к полупроводниковым элементам силовой части и преобразователям в целом. Результаты моделирования подтверждают правильность настройки контуров регулирования и позволяют говорить о пригодности разработанной модели для инженерных расчетов.

Ключевые слова: векторное управление, имитационное математическое моделирование, синхронный электропривод, частотное регулирование.

Для цитирования: Муртазин Т.Э., Титов В.Г. Синхронный электропривод с векторным управлением // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 41-52. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_41

SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH VECTOR CONTROL

T.E. Murtazin

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
tm.murtazin@yandex.ru

V.G. Titov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
eos@nntu.ru

Abstract. The study and development of vector control systems is relevant, since currently the vast majority of regulated synchronous electric drives are developed with this type of control. Modern simulation software allows you to evaluate the quality of transient processes of currents, speed and torque of the electric motor at the design stage. Based on the results obtained, it is possible to form requirements for synchronous machines, for semiconductor elements of the power part and for converters in general. The simulation results confirm the correct adjustment of the control loops and allow us to talk about the suitability of the developed model for engineering calculations.

Keywords: frequency control, simulation mathematical modeling, synchronous electric drive, vector control.

For citation: T.E. Murtazin and V.G. Titov, "Synchronous electric drive with vector control", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 41-52, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_41

I. Введение

Одним из основных направлений развития синхронного электропривода является применение различных преобразователей частоты с векторным управлением для регулирования скорости вращения [1-5]. Постоянно развивающиеся инструменты моделирования, а также усовершенствованные технологии в области электропривода определяют актуальность изучаемого вопроса. Рассматривается имитационное математическое моделирование частотно-регулируемого синхронного электропривода с постоянными магнитами на роторе с векторным управлением [6]. В электроприводе с векторным управлением имеется возможность воздействовать на положение пространственного вектора тока статора относительно связанного с ротором вектора потока ротора, что позволяет задавать и регулировать электромагнитный момент машины.

II. Описание синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе во вращающейся системе координат

Векторная диаграмма (рис. 1) отображает процессы в синхронном двигателе [7]. Она рассматривается в декартовой вращающейся системе координат dq , ось d которого сонаправлена с вектором потока ротора $\vec{\Psi}_f$.

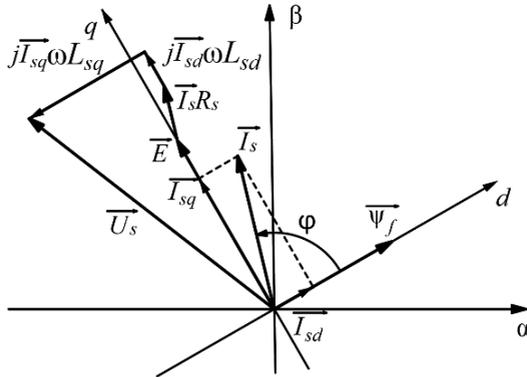


Рис. 1. Векторная диаграмма процессов в синхронном двигателе с явнополюсным ротором из постоянных магнитов
Fig. 1. Vector diagram of processes in a synchronous motor with a single-pole rotor made of permanent magnets

Вектор $\vec{\Psi}_f$ отстает от вектора тока статора \vec{I}_s на угол φ , который называется углом скручивания. Запишем основные уравнения, описывающие процессы в синхронном двигателе.

Амплитуда вектора ЭДС E , В:

$$E = \Psi_f \cdot \omega = \Psi_f \cdot Z_p \cdot \omega_R, \quad (1)$$

где $\omega = Z_p \cdot \omega_R$ – электрическая скорость вращения, рад/с; Z_p – число пар полюсов электрической машины; ω_R – частота вращения ротора, рад/с.

Вектор напряжения статора \vec{U}_S , В, исходя из диаграммы на рис. 1, описывается выражением:

$$\vec{U}_S = \vec{E} + \vec{I}_s \cdot R_s + j\omega(\vec{I}_{sd} \cdot L_{sd} + \vec{I}_{sq} \cdot L_{sq}), \quad (2)$$

где \vec{I}_s – вектор тока статора, А; \vec{I}_{sd} и \vec{I}_{sq} – проекции вектора тока статора на оси d и q , А; L_{sd} и L_{sq} – индуктивности статора по осям d и q соответственно, Гн; R_s – активное сопротивление статора, Ом.

Выражение модуля момента M , Н·м:

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot |\vec{I}_s| \cdot |\vec{\Psi}_s| \cdot \sin \varepsilon = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot (I_{sq} \cdot \Psi_d - I_{sd} \cdot \Psi_q), \quad (3)$$

где Ψ_d и Ψ_q – потокоцепления статора по соответствующим осям, Вб:

$$\Psi_d = L_{sd} \cdot I_{sd} + \Psi_f; \quad (4)$$

$$\Psi_q = L_{sq} \cdot I_{sq}. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (3), получаем:

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot |\vec{I}_s| \cdot |\vec{\Psi}_s| \cdot \sin \varepsilon = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot (I_{sq} \cdot \Psi_f + I_{sd} \cdot I_{sq} \cdot (L_{sd} - L_{sq})). \quad (6)$$

Векторная диаграмма для синхронной машины с неявнополюсным ротором представлена на рис. 2.

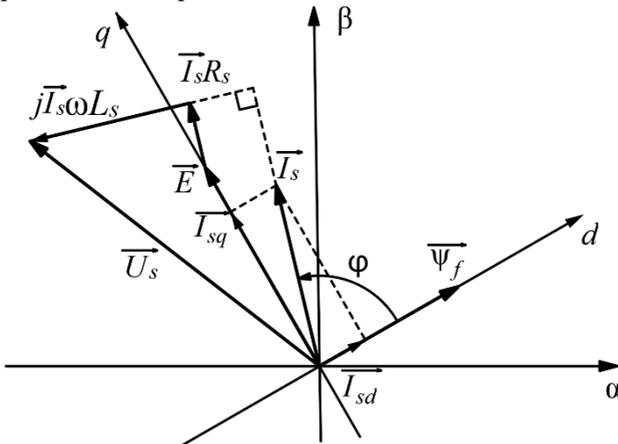


Рис. 2. Векторная диаграмма процессов в синхронном двигателе с неявнополюсным ротором

Fig. 2. Vector diagram of processes in a synchronous motor with an implicit pole rotor

Вышеперечисленные выражения также справедливы для неявнополюсной синхронной машины. Исходя из того, что $L_{sd} = L_{sq}$, выражение для момента упрощается:

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot I_{sq} \cdot \Psi_f. \quad (7)$$

Из (7) видно, что ток I_{sd} не участвует в создании момента и является паразитным. Поэтому следует настроить систему регулирования таким образом, чтобы вектор тока статора ориентировался вдоль оси q :

$$|I_s| = I_{sq} = \frac{2 \cdot M}{3 \cdot Z_p \cdot \Psi_f}. \quad (8)$$

При этом векторная диаграмма примет следующий вид (рис. 3).

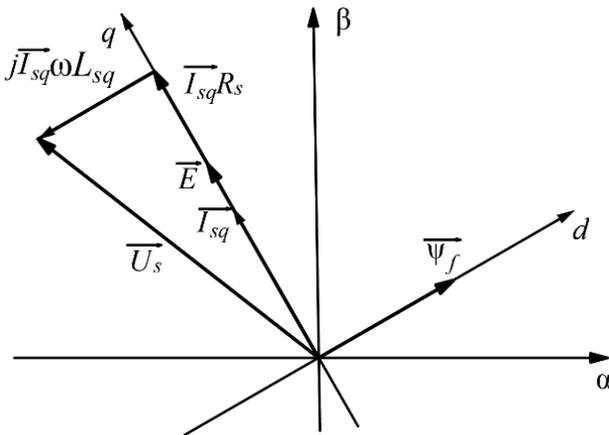


Рис. 3. Векторная диаграмма процессов в синхронном двигателе с ориентацией тока статора по оси q

Fig. 3. Vector diagram of processes in a synchronous motor with a stator current oriented along the q axis

Уравнения равновесия статора в системе координат dq :

$$U_{sd} = I_{sd} \cdot R_s + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega \cdot \Psi_{sq}; \quad (9)$$

$$U_{sq} = I_{sq} \cdot R_s + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega \cdot \psi_{sd}. \quad (10)$$

Подставив (4) и (5), получаем:

$$U_{sd} = I_{sd} \cdot R_s + L_{sd} \cdot \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega \cdot L_{sq} \cdot I_{sq}; \quad (11)$$

$$U_{sq} = I_{sq} \cdot R_s + L_{sq} \cdot \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega \cdot L_{sd} \cdot I_{sd} + \omega \cdot \psi_f. \quad (12)$$

В системе существуют перекрестные связи, которые необходимо исключить (компенсировать) путем добавления напряжения компенсации канала к выходному напряжению соответствующих регуляторов тока. Схема компенсации перекрестных связей позволяет избежать взаимных возмущений, что, естественно, улучшает качество регулирования. Напряжение компенсации каналов U_{Kd} , U_{Kq} , В, определяется как

$$U_{Kd} = \omega \cdot L_{sq} \cdot I_{sq}; \quad (13)$$

$$U_{Kq} = -\omega \cdot (L_{sd} \cdot I_{sd} + \psi_f). \quad (14)$$

III. Расчет параметров имитационной модели

На основе вышеописанных уравнений составлена структура системы векторного управления синхронным двигателем [7] (рис. 4.).

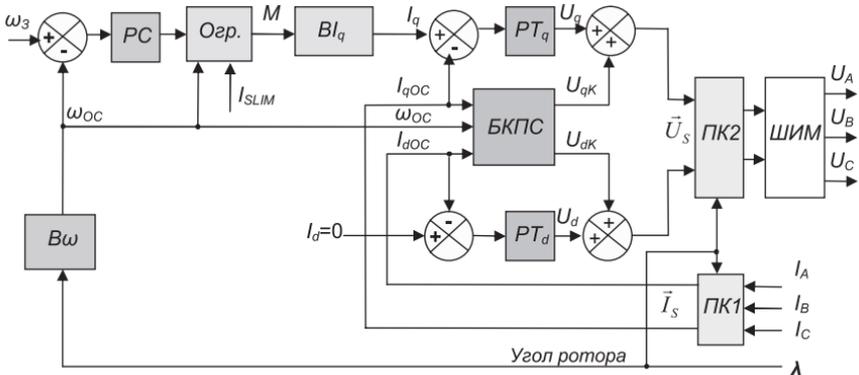


Рис. 4. Структура системы векторного управления синхронным двигателем
Fig. 4. Structure of the synchronous motor vector control system

Моделирование системы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами на роторе проведем для двигателя, параметры которого представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры синхронного электродвигателя

Table 1.
Synchronous motor parameters

Номинальная мощность P , Вт	800
Номинальная частота питающего напряжения, Гц	125
Номинальное напряжение, В	24
Номинальный момент M , Н·м	5
Номинальная скорость n , об/мин	1500
Число фаз	3
Форма обратной ЭДС	синусоидальная
Тип ротора	неявнополюсный
Число пар полюсов p	5
Активное сопротивление фазы статора R_s , Ом	0,032645
Индуктивность фазы статора L_s , Гн	0,000039
Момент инерции ротора J , кг·м ²	0,001

Моделирование будем производить в среде *Matlab Simulink* [8, 9]. Силовая часть представлена на рис. 5.

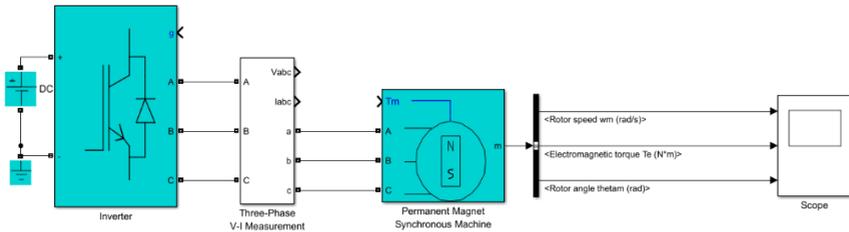


Рис. 5. Силовая часть синхронного электропривода
Fig. 5. Synchronous electric drive power circuit

Блок «*Inverter*», построенный на базе *IGBT* транзисторов, получает питание от идеального источника постоянного напряжения «*DC*». Затем через блок измерений «*Three-Phase V-I Measurement*» инвертированное напряжение поступает на двигатель. С помощью элемента «*Bus selector*» и блока «*Scope*» будем наблюдать за сигналами скорости и момента двигателя.

Схема векторного управления (рис. 6) построена на основе структуры (рис. 4) и на основании уравнений, описанных выше.

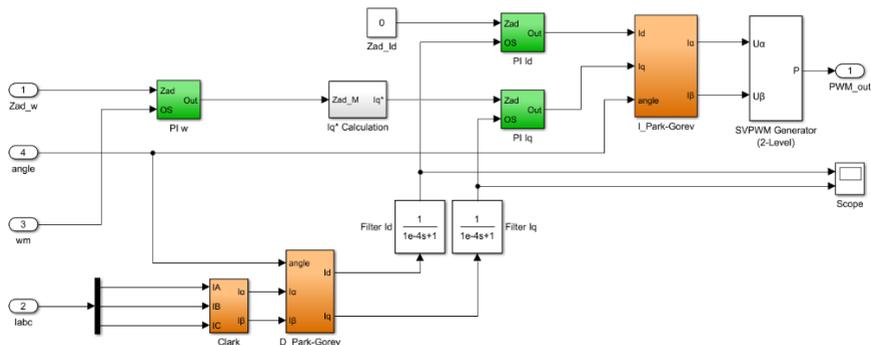


Рис. 6. Модель структуры векторного управления (блок «Control system»)

Fig. 6. Model of the vector control structure («Control system» block)

Блоки «Clark», «D_Park-Gorev» и «I_Park-Gorev» осуществляют координатные преобразования из трехфазной неподвижной системы в двухфазную неподвижную, из неподвижной системы во вращающуюся и из вращающейся системы координат в неподвижную соответственно. Блок « $I_q^* Calculation$ » производит вычисление задания на ток по оси q . Блоки «Filter I_d » и «Filter I_q » предназначены для фильтрации сигналов обратных связей по току оси d и q соответственно от высокочастотных искажений. Блоки «PI w », «PI I_d » и «PI I_q » – ПИ-регуляторы скорости, тока I_d и тока I_q соответственно.

Система управления выдает сигналы напряжения U_a и U_b . Для реализации данных векторов использован блок векторной ШИМ «SVPWM Generator (2-Level)», который на основе этих сигналов выдает импульсы, частотой 10 кГц, на затворы транзисторов инвертора. Блок «Scope» позволяет отобразить сигналы текущего состояния токов I_d и I_q . Система управления и регулирования построена по подчиненному принципу и имеет два внутренних параллельных контура тока и один внешний контур скорости. Если математическое выражение коэффициентов является практически невозможным для такой сложной системы, можно прибегнуть методам подбора [10]. Воспользовавшись одним из методов подбора, определим коэффициенты пропорциональной и интегральной части ПИ-регуляторов токов и скорости. Таким образом, математическая имитационная модель системы векторного управления синхронным электроприводом полностью собрана (рис. 7). Переходные процессы токов оси d и q при настроенных методом подбора регуляторов показаны на рис. 8. Переходные процессы пуска с последующим приложением номинального момента показаны на рис. 9.

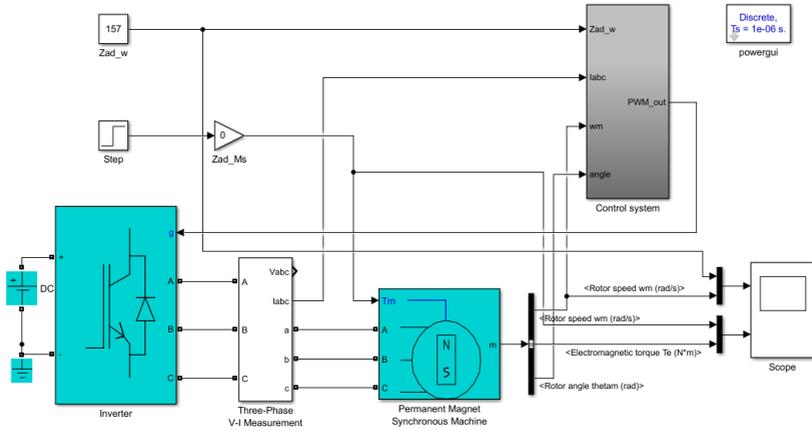


Рис. 7. Модель системы векторного управления синхронным электроприводом

Fig. 7. Model of a vector control system for a synchronous electric drive

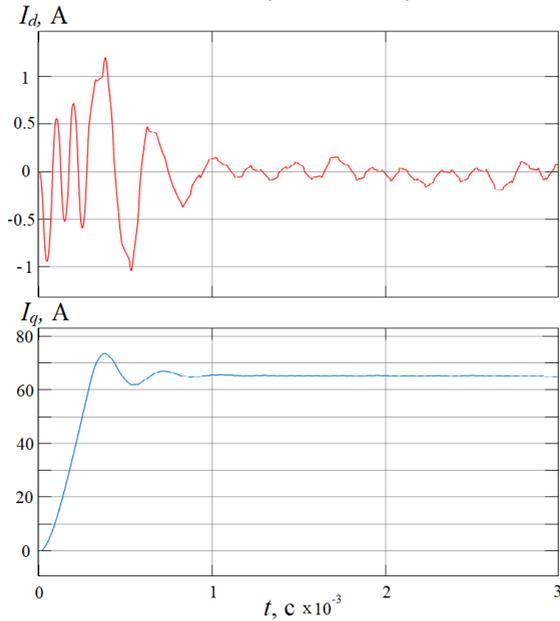


Рис. 8. Переходные процессы токов I_d и I_q

Fig. 8. I_d and I_q current transients

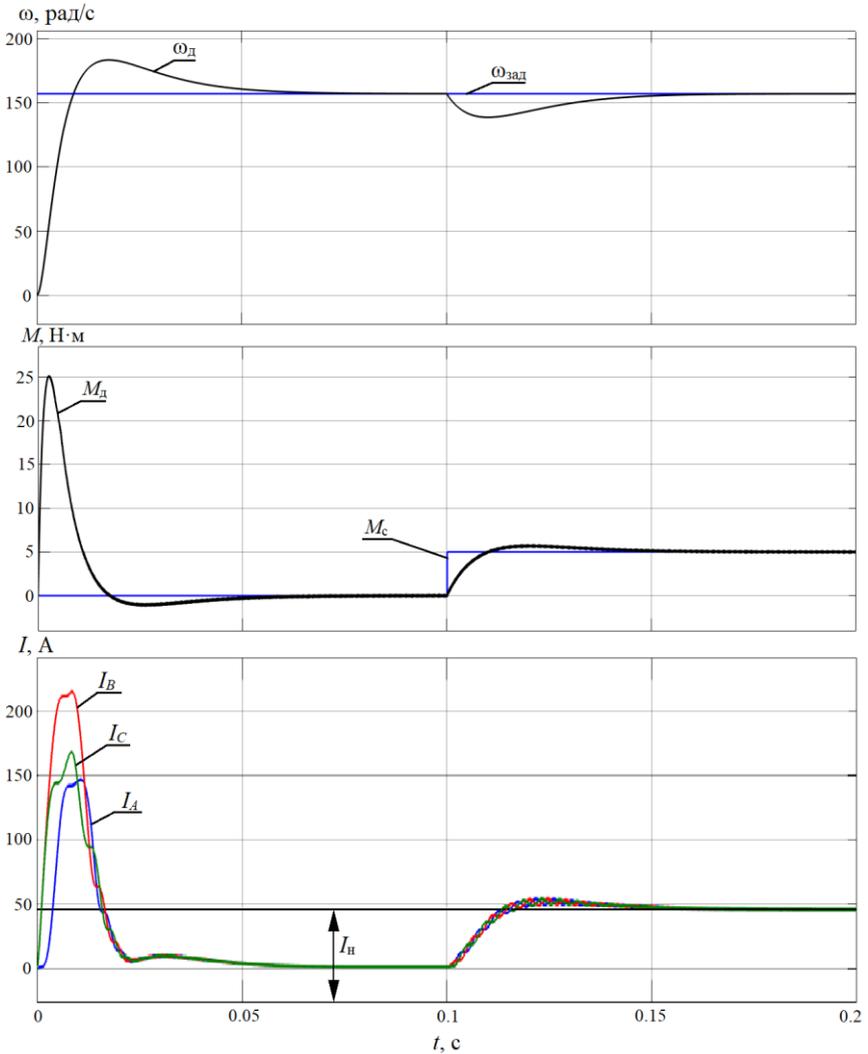


Рис. 9. Переходные процессы скорости и момента двигателя
 $\omega_{д}$ – скорость вращения двигателя; $\omega_{зад}$ – задание на скорость;
 $M_{д}$ – электромагнитный момент двигателя; $M_{с}$ – момент нагрузки;
 I_A, I_B, I_C – токи двигателя в фазах A, B и C ; I_n – номинальный ток двигателя

Fig. 9. Transients of engine speed and torque

$\omega_{д}$ – engine speed; $\omega_{зад}$ – setting speed;
 $M_{д}$ – electromagnetic torque; $M_{с}$ – load torque;
 I_A, I_B, I_C – motor currents in phases A, B , and C ; I_n – rated motor current

Переходные процессы имеют хорошее быстродействие и необходимую устойчивость. Статическая ошибка скорости при работе электродвигателя под нагрузкой отсутствует.

IV. Заключение

Анализ результатов моделирования показал, что предложенный вариант системы векторного управления частотно-регулируемым синхронным электроприводом с постоянными магнитами работоспособен. Методика расчета параметров системы управления применима практически для любого синхронного электропривода. Следует заметить, что структура управления для электроприводов любой мощности одинакова. Однако в приводах большой мощности часто применяются усложненные схемы инверторов, а также, для повышения энергоэффективности, управляемые выпрямители. Поэтому необходимо дополнить и усложнить систему управления. Для синхронных электродвигателей с обмоткой возбуждения на роторе также следует учесть управление возбудителями.

© Муртазин Т.Э., 2021

© Титов В.Г., 2021

Поступила в редакцию 08.06.2021

Received 08.06.2021

Библиографический список

- [1] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 265 с.
- [2] Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4 (83). С. 190-204.
- [3] Михеев Е.А. Частотное регулирование электропривода // Символ Науки: Международный научный журнал. 2016. № 11-3. С. 124-126.
- [4] Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2005. –304 с.
- [5] Patel V., KGiri V. Field oriented control of PMSM drive using SVPWM // International Journal of Emerging Engineering Research and Technology. 2014. Т. 2. Вып. 3. С. 246-255.
- [6] Фролов В.Я., Жилиготовов Р.И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 92-97. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92.
- [7] Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 72 с.
- [8] Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
- [9] Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.

- [10] Вадутов О.С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера–Никольса. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 10 с.

References

- [1] G.G. Sokolovsky, *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem [Variable frequency AC drives]*. Moscow: Academya, 2006 (in Russian).
- [2] V.A. Tikhomirov, V.G. Titov and S.V. Khvatov, “Technical and economic aspects of the using controlled drive constant and alternating current”, *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (83). pp. 190-204, 2010.
- [3] E.A. Mikheev, “Chastotnoye regulirovaniye elektroprivoda [Electric drive variable frequency control]”, *Symbol of Science: International scientific journal*, no. 11-3, pp. 124-126, 2016 (in Russian).
- [4] V.M. Terekhov and O.I. Osipov, *Sistemy upravleniya elektroprivodov [Electric drive control systems]*. Moscow: Akademiya, 2005 (in Russian).
- [5] V. Patel and V. KGiri, “Field oriented control of PMSM drive using SVPWM”, *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 2, is. 3, pp. 246-255, June 2014.
- [6] V.Y. Frolov and R.I. Zhiligitov, “Development of sensorless vector control system for permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink”, *Journal of Mining Institute*, vol. 229, pp. 92-97, 2018 (in Russian). DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92.
- [7] Y.N. Kalachev, *Vektornoye regulirovaniye (zametki praktika) [Vector control (practitioner's notes)]*. Moscow: MPEI, 2013 (in Russian).
- [8] V.P. Diakonov. *MATLAB. Polniy samouchitel [MATLAB. Complete tutorial]*. Moscow: DMK Press, 2012 (in Russian).
- [9] V.P. Diakonov. *Simulink 5/6/7: Samouchitel [Simulink 5/6/7: Tutorial]*. Moscow: DMK Press, 2008 (in Russian).
- [10] O.S. Vadutov, *Nastroyka tipovykh regulyatorov po metodu Tsiglera-Nikol'sa [Setting up standard regulators using the Ziegler-Nichols method]*. Tomsk: TPU, 2014 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Муртазин Тимур Эмильевич, магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Timur E. Murtazin, master of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Титов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Vladimir G. Titov, D. Sci. (Eng.), professor, professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_53

**АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОЙ
РАЗГРУЗКИ ЦИФОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ 6-10(20)/0,4 кВ****А.С. Панкова**

ПАО «ТНС Энерго НН»

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0002-4624-3855 demidova.anya@mail.ru

О.А. Пронина

АО «Атомэнергoproject»

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0001-8572-8356 olgapronina11@gmail.com

К.Е. Чумарин

ООО «Газпром проектирование»

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0002-9680-1990 ingenum16@gmail.com

Д.С. Огнев

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0003-2608-6407 dima.ognef@yandex.ru

Описаны подходы к построению цифровых интеллектуальных сетей. Рассмотрена проблема недогруженности силовых трансформаторов, функционирующих в системе электроснабжения городов. Приведена структура цифровой подстанции, как одно из направлений развития цифровизации. Представлен алгоритм системы длительной автоматической разгрузки по току, реализующий свою работу в цифровых энергосистемах. Алгоритм позволяет определять по заданным условиям максимальные и аварийные допустимые значения переменного тока в распределительной сети, а также прогнозировать пропускную способность сечений в линиях электропередач.

Ключевые слова: алгоритм, токовая разгрузка, интеллектуальные энергосистемы, цифровая подстанция, цифровизация.

Для цитирования: Панкова А.С., Пронина О.А., Чумарин К.Е., Огнев Д.С. Алгоритмизация процесса автоматической разгрузки цифровых подстанций 6-10(20)/0,4 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 53-65.
DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_53

ALGORITHMIZATION OF PROCESS OF LONG-TERM AUTOMATIC UNLOADING OF 6-10(20)/0,4 kV DIGITAL SUBSTATIONS

A.S. Pankova

PJSC «TNS energo NN»

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-4624-3855 demidova.anya@mail.ru

O.A. Pronina

JSC «Atomenergoproekt»

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0001-8572-8356 olgapronina11@gmail.com

K.E. Chumarin

JSC «Cazprom proektirovanie»

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-9680-1990 ingenum16@gmail.com

D.S. Ognev

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0003-2608-6407 dima.ognev@yandex.ru

Abstract. The article describes approaches to building digital smart grids. The problem of underloading of power transformers operating in the power supply system of cities is considered. The structure of a digital substation is given as one of the directions for the development of digitalization. An algorithm of the system of long-term automatic unloading by current is presented, which realizes its work in digital power systems. The algorithm makes it possible to determine, according to the given conditions, the maximum and emergency permissible values of alternating current in the distribution network, as well as to predict the throughput of cross-sections in power lines.

Keywords: algorithm, current unloading, smart grids, digital substation, digitalization.

For citation: A.S. Pankova, O.A. Pronina, K.E. Chumarin and D.S. Ognev, “Algorithmization of process of long-term automatic unloading of 6-10(20)/0.4 kV digital substations”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 53-65, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_53

1. Введение

Темпы развития городов растут с каждым годом. Основные отрасли промышленности, определяющие прогресс производства, постоянно модифицируются. Основой этих процессов является энергетика. Независимо от того, что создаются запасы мощностей на источниках генерации и трансформаторных подстанциях (ТП) высокого напряжения (ВН), имеют место трудности для подключения потребителей из-за отсутствия резерва мощности ТП, что является отражением дисбалансов в вопросах развития сетей разных классов напряжения. Во многом подобная схема планирования развития электроэнергетики связана с ориентиром на улучшение и модернизацию сетей ВН.

При этом расчетные электрические нагрузки, используемые для проектирования систем электроснабжения низкого и среднего напряжения (НН и СН), в настоящий момент завышены в 1,5-2,5 раза относительно фактических [1]. Это стало результатом прогнозирования, который предполагал рост расхода потребления электроэнергии населением за счет увеличения количества бытовых электрических приборов, улучшающих качество жизни людей.

Построенные кабельные сети и ТП 0,4/10 кВ по факту оказываются недогруженными. Достаточно большое количество ТП работают в режиме максимальной загрузки в течение года менее 30 %, а из них порядка 40-50 % ТП работают с максимальной загрузкой в течение года менее 15 % [1]. В крупных городах загрузка ТП выше, 66 % и 83 % ТП загружены до 50 % (рис. 1). Это свидетельствует о повышенных потерях в силовых трансформаторах относительно силовых трансформаторов, работающих с загрузкой в 70 %; о неэффективном использовании инвестиций; завышенной стоимости коммерческих и жилых помещений; завышенной стоимости технологического присоединения к электрическим сетям; увеличенных сроков строительства распределительных сетей.

Возникают проблемы электроснабжения в данных городах, связанных с постоянным увеличением нагрузок. В существующих электрических сетях образуется дефицит сетевых мощностей. При этом плотность застройки городов очень велика, что приводит к невозможности строительства новых ТП. Таким образом складывается парадоксальная ситуация: большая часть силовых трансформаторов недогружена, поскольку ТП по документам загружены полностью, что приводит к появлению «запертой электрической мощности». В итоге возведение новых ТП крайне затруднительно, а потребность в новых мощностях растет.

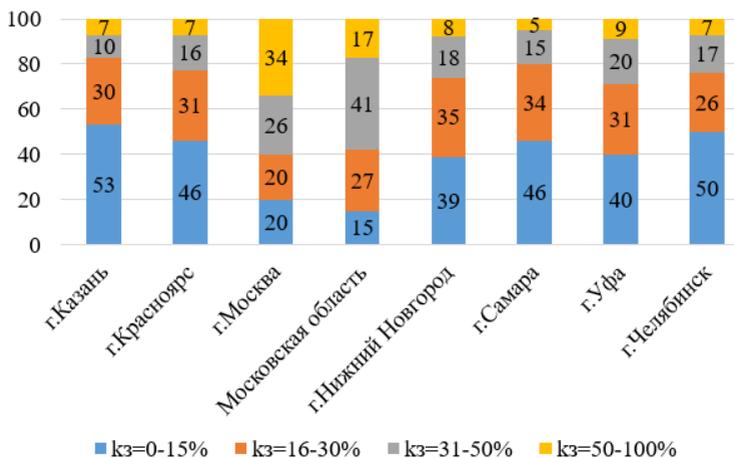


Рис. 1. Загрузка трансформаторных подстанций 0,4/10 кВ

Fig. 1. Loading transformer substations 0,4/10 kV

Появляется необходимость в усовершенствовании элементов городской электрической сети и создании алгоритмов управления распределительными сетями.

II. Цифровая трансформация энергии

Цифровая подстанция является элементом цифровизации электроэнергетического комплекса. Она отвечает требованиям стандарта МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях». Это международный стандарт, регулирующий системы связи, диспетчерское управление и сбор данных (SCADA системы) и системы автоматизации на подстанциях [2].

Цифровая подстанция реализована с использованием элементов и компонентов (рис. 2). Хотя данная схема не является единственным способом реализации цифровой подстанции, она представляет собой один из наиболее распространенных подходов [3].

Применяя различные элементы, необходимые для подстанции (автоматические выключатели, реле защиты, CTS и VTs и т.д.), и соединяя их с помощью оптического волокна, физическая реализация подстанции становится проще, в то же время повышается ее надежность и ясность. По сравнению с традиционной подстанцией, где все соединено сотнями отдельных медных кабелей, преимущества становятся очевидными.

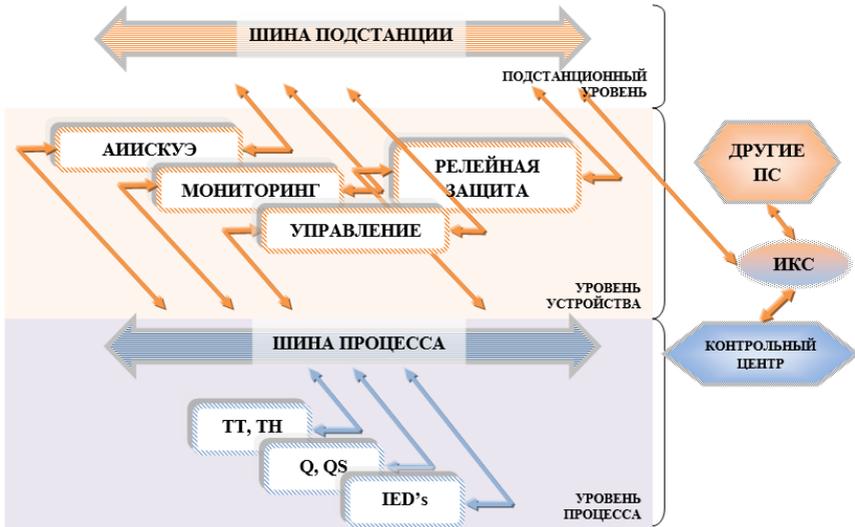


Рис. 2. Принцип построения ЦПС
 Fig. 2. The principle of building a digital substation

Цифровые подстанции состоят из нескольких ключевых компонентов и элементов.

Первичные устройства подстанции (реле защиты, трансформаторы тока и др.) реализуются в виде интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ). Эти устройства могут взаимодействовать друг с другом (и управлять подстанцией более высокого уровня) через оптическую сеть.

Сеть цифровой подстанции работает по протоколу *Ethernet*. В рамках этой структуры традиционные цифровые сигналы передаются с использованием *GOOSE*-сообщений (*Generic Object-Oriented Substation Event*). Протокол *GOOSE* – это специфическое форматирование данных, которое позволяет передавать сигналы состояния защиты в течение периода времени менее 4 мс. Это необходимо для обеспечения надежной и своевременной работы взаимосвязанных ИЭУ.

Коммуникационные шины (станционная и шина процесса) позволяют обмениваться сигналами между ИЭУ уровня присоединений и уровнем управления станцией (станционная шина) и ИЭУ уровня процесса – системным оборудованием, устройствами и преобразователями (шина процесса).

Системы станционных и шин процесса обычно реализуются с использованием коммутаторов *Ethernet* (внешних или встроенных в ИЭУ), объединенных вместе кольцевой конфигурацией.

Измерительные блоки собирают сигналы для различных элементов оборудования и преобразователей. Эти сигналы затем передаются по шине процесса на другие устройства. Измерительный блок — это интерфейс между традиционными аналоговыми сигналами и контроллерами уровня присоединений и защитными реле.

Развитие систем передачи и распределения электрической энергии, внедрение возобновляемых источников в существующие сети, создание нового оборудования привели к существенному изменению характеристик и усложнению алгоритмов управления системами электроснабжения [4].

Необходимым условием для реализации работы цифровых подстанций является создание архитектуры управления цифровыми подстанциями и разработка адаптивных алгоритмов управления режимом распределительной сети и на базе стандарта серии МЭК 61850.

III. Способы разгрузки существующей распределительной сети

Рассмотрим участок городской распределительной сети (рис. 3), которая имеет два центра питания, секционный выключатель, измерительные органы и нагрузку. Данный участок сети условно можно разделить на три части – три ТП. Если на одном из участков сети происходит перегрузка, а другой участок сети недогружен, то необходимо произвести перераспределение мощности. В целом существуют приоритеты в рамках, которых возможно производить переключения в схеме.

Первый способ – включение секционного выключателя $QF3$. Нагрузка разделена между двумя секциями шин для обеспечения резерва. Секционный выключатель в нормальном состоянии разомкнут. Работают оба фидера. В случае перегрузки работы одного из питающих фидеров (нарушение электроснабжения) осуществляется переключение питания на секционный выключатель (резервную секцию). Автоматический выключатель, выполнявший ранее роль питающего фидера, размыкается, и замыкается секционный выключатель. После этого обе секции питаются от одного фидера.

Второй способ – включение выключателя $QF4$, соединяющего ТП-3 с соседней ТП-1. Данное переключение возможно, когда $U_1' > U_1$, что говорит о том, что ТП-1 является недогруженной и существует возможность разгрузить ТП-3.

Третий способ – включение выключателя $QF15$, соединяющего ТП-3 с соседней ТП-2. Данное переключение возможно, когда $U_2' > U_2$, что говорит о том, что ТП-2 является недогруженной и существует возможность разгрузить ТП-3.

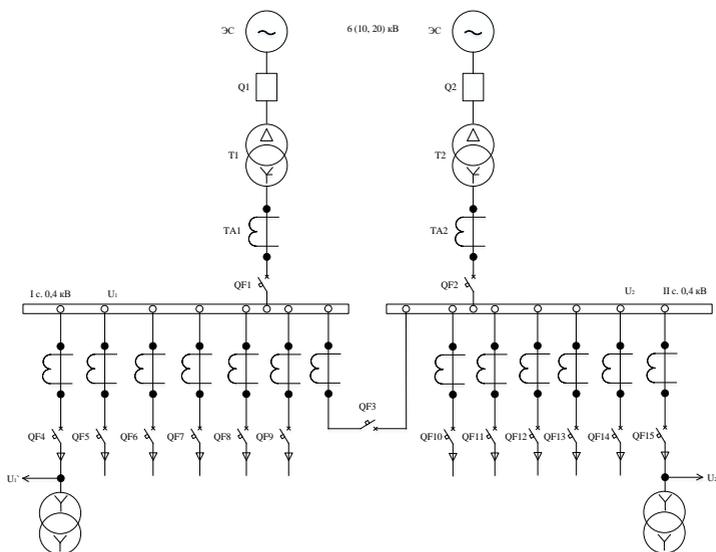


Рис. 3. Схема распределительной сети 6-10(20)/0,4 кВ

Fig. 3. Distribution network scheme 6-10(20)/0,4 kV

Четвертый способ – разгрузка шин подстанции с помощью алгоритма управления. Алгоритм прописывается в программном обеспечении устройства, который в режиме реального времени собирает информацию о состоянии сети. В момент возможного нарушения работы системы происходит разгрузка сети и необходимое переключение.

IV. Адаптивный алгоритм работы системы длительной автоматической разгрузки по току

Для решения режимных задач в энергосистемах необходимо определить пропускную способность электрических сетей. Допустимые перетоки мощности определяются по наиболее неблагоприятным режимам, рассчитанным ранее традиционными методами. Использование данной схемы расчетов приводит к ограничению потоков мощности и является узким местом для роста экономических показателей работы энергосетевого комплекса.

Большое количество возможных схемно-режимных ситуаций и неопределенностей разного характера (например, человеческий фактор) не позволяет заранее предусмотреть в алгоритме управления все возможные сценарии развития аварийных ситуаций, поэтому возникает необходимость создания адаптивных алгоритмов управления режимом распределительной сети, в основе которого расчет условий происходит в режиме реального времени.

Создание активно-адаптивного алгоритма позволит определять из исходных условий состояния сети в настоящий момент времени максимальные и аварийные допустимые токовые нагрузки в опасных сечениях, прогнозировать и определять «узкие места» сети [5]. Прогнозирование возможных аварийных ситуаций сети достигается за счет измерения токов в узлах и расчета производной от этих значений в реальном времени. Используя получаемые данные и «пропуская» их через математический аппарат алгоритма, можно построить актуальные графиков нагрузки, а также предвидеть изменения и предпринять меры по устранению аварии.

Алгоритм (рис. 4) осуществляет свое действие, исходя из измеренных значений тока на стороне 0,4 кВ ТП 6/0,4 кВ. Сравнивающий элемент выбирает большее из действующих значений тока и посылает на пусковой орган. Пусковой орган сравнивает полученное значение с предельно допустимым, и, если данное значение превышает предельно допустимое, на выходе пускового органа появляется логическая единица (1). Далее сигнал подается на устройство выдержки времени t_1 (5 с – моделируется выдержка 5 мин). Таким образом, осуществляется также отстройка от сквозных токов – длительность любого короткого замыкания (КЗ) значительно меньше длительности выдержки. Если измеряемый ток не снижается за время выдержки t_1 пусковой орган остается в работе и после времени выдержки t_1 подается сигнал на отключение выключателя потребителя III категории надежности электроснабжения на РУ 0,4 кВ ТП 6/0,4 кВ.

Далее алгоритм повторяется с увеличением выдержки времени на 0,5 с (аналог 30 с) до тех пор, пока ток на стороне 0,4 кВ трансформатора Т1 не снизится до допустимого значения. В данном случае отключения остальных потребителей не происходит, система остается в устойчивом состоянии до прибытия ремонтной бригады.

V. Моделирование системы управление сети на основе токовой разгрузки

Алгоритмизация процесса токовой разгрузки была апробирована на имитационной модели распределительной сети 6/0,4 кВ (рис. 3) в ПО PSCAD. С помощью логических элементов была построена схема управления различными выключателями потребителей 0,4 кВ (рис. 5).

В 0,0 с начинается работа схемы. Все элементы работают в номинальном режиме, все присоединения 0,4 кВ подключены к секциям, секционный выключатель находится в отключенном состоянии, выключатель перемычки 6 кВ также отключен.

В момент 2,9 с с начала моделирования (аналог 2,9 мин) происходит КЗ на стороне ВН силового трансформатора Т2 длительностью 1,0 с. Через 0,1 с срабатывает система защиты, и трансформатор отключается с двух сторон.

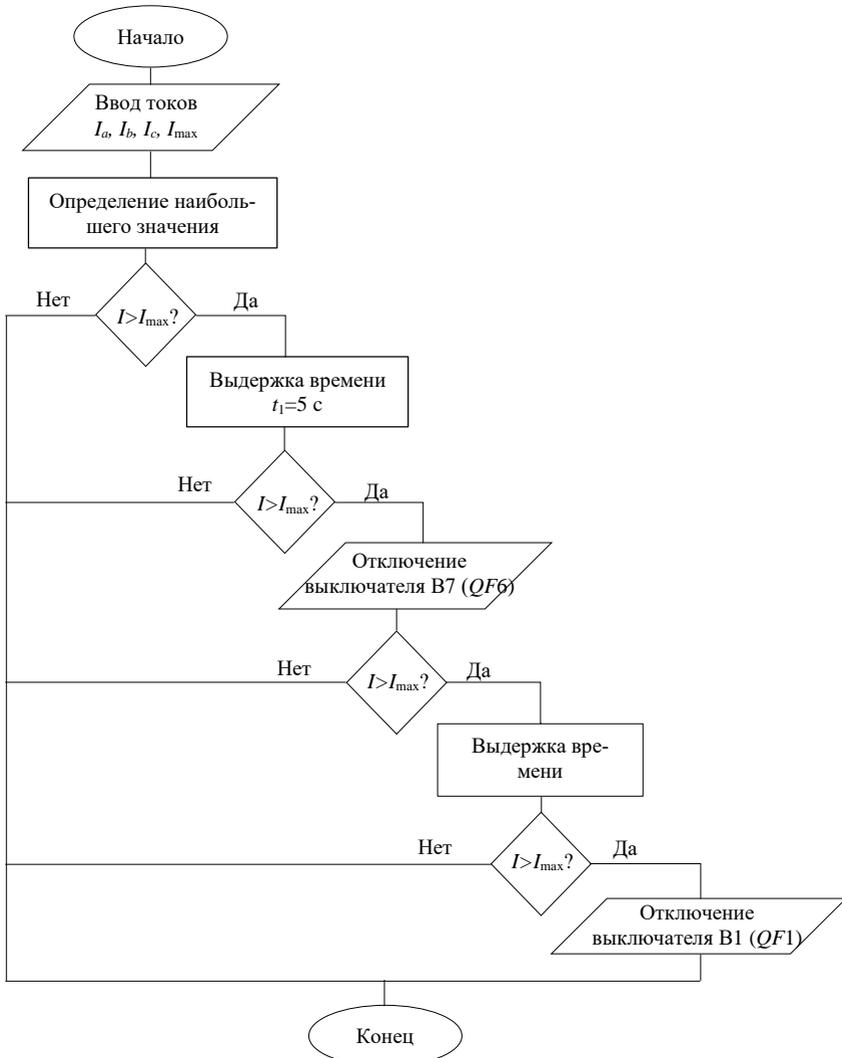


Рис. 4. Блок-схема алгоритма длительной автоматической разгрузки по току
Fig. 4. Block diagram of the long-term automatic current unloading algorithm

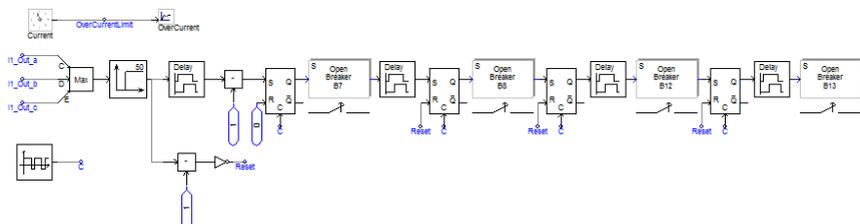


Рис. 5. Общий вид логической части разрабатываемой модели

Fig. 5. General view of the logical part of the developed model

В момент 3,1 с происходит включение секционного выключателя на стороне 0,4 кВ в результате срабатывания автоматики АВР. Система находится в аварийном состоянии: трансформатор Т1 перегружен и нуждается в разгрузке. В работу вступает алгоритм длительной автоматической разгрузки.

Осциллограммы токов на сторонах НН трансформаторов Т1 и Т2 в промежутке времени [0-5] с (во вторичных значениях) приведены на рис. 6 и 7. Они показывают, что алгоритм прекратил отключение потребителей после снижения тока. Ответственные потребители остаются в работе до прибытия ремонтной бригады и устранения последствий аварии.



Рис. 6. Действующие значения токов на стороне НН трансформатора Т1 на интервале времени 0...5 с

Fig. 6. The effective values of the currents on the LV side of the transformer T1 in the time interval 0...5 s

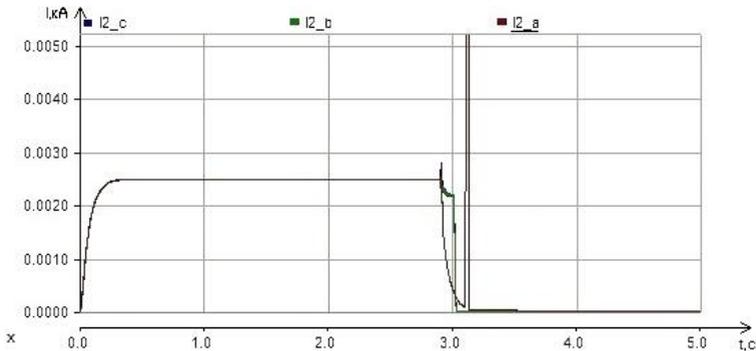


Рис. 7. Действующие значения токов на стороне НН трансформатора Т2 на интервале времени 0...5 с

Fig. 7. The effective values of the currents on the LV side of the transformer T2 in the time interval 0...5 s

VI. Заключение

Рассмотрена проблема появления «запертой электрической мощности» вследствие недогруженности существующих силовых трансформаторов (70-80 %) из-за устаревших требований к проектированию электрических сетей. Как направление развития цифровизации рассмотрена архитектура цифровой подстанции, в последующем используемая как объект алгоритмизации.

В ходе работы предложен алгоритм системы длительной автоматической разгрузки по току, приводящий к усовершенствованию электрической сети. Разработанный алгоритм может быть осуществим с помощью цифровых устройств в составе цифровой трансформаторной подстанции, что повысит надежность энергоснабжения потребителей, повысит экономичность за счет применения трансформаторов с большими коэффициентами загрузки.

© А.С. Панкова, 2021

© О.А. Пронина, 2021

© К.Е. Чумарин, 2021

© Д.С. Огнев, 2021

Поступила в редакцию 19.03.2021

Received 19.03.2021

Библиографический список

- [1] Soluyanov Yu., Fedotov A., Bakhteev K. Electrical loads of human settlement and the choice of power facilities for their power supply // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 18-22, 2020, Sochi, Russia, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111894.
- [2] Кузьмин В.В. Цифровизация и развитие конкуренции на электроэнергетическом рынке // Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития, Июнь 26, 2019, Санкт-Петербург, Россия. М.: Изд-во МЭИ, 2019. С. 170-186.
- [3] Лоскутов А.Б., Панкова А.С., Пронина О.А., Чумарин К.Е. Разработка алгоритма системы управления и релейной защиты в замкнутых распределительных сетях // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4 (127). С. 91-103.
- [4] Лоскутов А.Б., Демидова А.С., Пронина О.А., Чумарин К.Е. Разработка алгоритма управления замкнутыми сетями с устройствами регулирования потоков мощности // V Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч. «Актуальные проблемы энергетики», Декабрь 17, 2019, Н. Новгород, Россия. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 229-234.
- [5] Опадчий Ф.Ю. Цифровизация энергетики: принципы реализации, пилотные проекты // Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития, Июнь 26, 2019, Санкт-Петербург, Россия. М.: Изд-во МЭИ, 2019. С. 28-39.

References

- [1] Yu. Soluyanov, A. Fedotov and K. Bakhteev, "Electrical loads of human settlement and the choice of power facilities for their power supply", in proc. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 18-22, 2020, Sochi, Russia, pp. 1-6.
- [2] V.V. Kuzmin, "Tsifrovizatsiya i razvitiye konkurentsii na elektroenergeticheskom rynke [Digitalization and development of competition in the electric power market]", in proc. *Tsifrovaya energetika: novaya paradigma funktsionirovaniya i razvitiya [Digital energy: a new paradigm of functioning and development]*, June 26, 2019, Saint-Petersburg, Russia. Moscow: MPEI, 2019, pp. 170-186 (in Russian).
- [3] A.B. Loskutov, A.S. Pankova, O.A. Pronina and K.E. Chumarin, "Development of control system and relay protection algorithm in closed distribution networks", *Transactions of NNSTU n.a. R.E.Alekseev*, no. 4 (127), pp. 91-103, 2019.
- [4] A.B. Loskutov, A.S. Demidova, O.A. Pronina and K.E. Chumarin, "Razrabotka algoritma upravleniya zamknutyimi setyami s ustroystvami regulirovaniya potokov moshchnosti [Development of a control algorithm for closed networks with power flow control de-vices]", in proc. *V All-Russian Conf. Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]*, Dec. 17, 2019, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 229-234 (in Russian).
- [5] F.Yu. Opadchiy, "Tsifrovizatsiya energetiki: printsipy realizatsii, pilotnyye projekty [Energy digitalization: implementation principles, pilot projects]", in proc. *Tsifrovaya energetika: novaya paradigma funktsionirovaniya i razvitiya [Digital energy: a new paradigm of functioning and development]*, June 26, 2019, Saint-Petersburg, Russia. Moscow: MPEI, 2019, pp. 28-39 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Панкова Анна Сергеевна, начальник отдела балансов департамента реализации электроэнергии ПАО «ТНС Энерго НН», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anna S. Pankova, head of the balance division of the electricity sales department of the PJSC «TNS energo NN», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Пронина Ольга Александровна, инженер 3 категории АО «Атомэнергопроект», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Olga A. Pronina, engineer of the JSC «Atomenergoproekt», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Чумарин Кирилл Евгеньевич, инженер ООО «Газпром проектирование», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Kirill E. Chumarin, engineer of the JSC «Gazprom proektirovanie», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Огнев Дмитрий Сергеевич, магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Dmitry S. Ognev, undergraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.311+004.43

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_66

МЭК 61850: ЯЗЫК ОПИСАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ПОДСТАНЦИИ

В.С. Чайкин

РОССЕТИ Научно-технический центр
Москва, Россия
chaikin@ftc-energo.ru

А.В. Иванов

РОССЕТИ Научно-технический центр
Москва, Россия
ivanov@ftc-energo.ru

Статья посвящена языку разметки *SCL* (*System Configuration description Language*), описывающему конфигурацию цифровой подстанции. Перечислены основные составляющие серии международных стандартов МЭК 61850. Описана роль информационной модели и языка разметки *SCL*. Рассмотрены глобальные *SCL* элементы с указанием их семантики согласно положениям МЭК 61850-6 ред. 2.0 и 2.1.

Ключевые слова: информационная модель, МЭК 61850, цифровизация, SCL, SCL schema.

Для цитирования: Чайкин В.С., Иванов А.В. МЭК 61850: язык описания конфигурации подстанции // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2. С. 66-71. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_66

IEC 61850: SYSTEM CONFIGURATION DESCRIPTION LANGUAGE

V.S. Chaykin

ROSSETI Research and development center
Moscow, Russian Federation
chaikin@ftc-energo.ru

A.V. Ivanov

ROSSETI Research and development center
Moscow, Russian Federation
ivanov@ftc-energo.ru

Abstract. The article is devoted to the markup language SCL (System Configuration description Language), which describes the configuration of a digital substation. The

basic components of international standards of the IEC 61850 series are listed. The roles of information model and SCL language are described. The article deals with global SCL elements with an indication of their semantics under the IEC 61850-6 ed. 2.0 and 2.1.

Keywords: digitalization, IEC 61850, information model, system configuration description language, SCL, SCL schema.

For citation: V.S. Chaykin, A.V. Ivanov, “IEC 61850: System configuration description language”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 66-71, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_66

I. Введение

Главная цель МЭК 61850 как серии международных стандартов – формирование у специалистов электроэнергетики из разных стран единого представления о разработке, интеграции и поддержке цифровых коммуникационных сетей и систем на энергообъекте. При этом необходимо (рис. 1):

- 1) регламентировать структуру для большого объема данных, являющихся критически важными для безаварийного функционирования энергообъекта, с целью их однозначной интерпретации и быстрой обработки [1];
- 2) обеспечить высокую гибкость серии стандартов для возможности ее быстрой корректировки в будущем в случае смены используемых информационных технологий.



Рис. 1. Требования к МЭК 61850 как к серии международных стандартов
Fig. 1. Requirements to IEC 61850 as to series of international standards

МЭК 61850 условно можно разделить на три составляющие (рис. 2):

- 1) информационная модель;
- 2) язык разметки *SCL* (*System Configuration description Language*);
- 3) протоколы передачи данных (*MMS*, *GOOSE*, *SV*).

Будучи главной составляющей, информационная модель необходима для формирования у специалистов электроэнергетики единого понимания о структуре данных цифрового энергообъекта на концептуальном уровне (рис. 3) [2].



Рис. 2. Основные составляющие серии стандартов МЭК 61850

Fig. 2. Basic components of IEC 61850 series



Рис. 3. Роли информационной модели МЭК 61850 и языка разметки SCL

Fig. 3. Roles of IEC 61850 information model and markup language SCL

Особенностью МЭК 61850 в сравнении с другими коммуникационными стандартами является полная независимость информационной модели от других составляющих [1]. Это позволяет однозначно регламентировать структуру данных и сохранять при этом гибкость: внесение изменений в модель не затрагивает используемые коммуникационные протоколы, и наоборот – замена коммуникационных протоколов не требует корректировок модели. Помимо сформированного единого понимания, для специалистов необходим также единый инструмент для представления конфигураций информационной модели (ее реализации для конкретного проекта) в формализованном машиночитаемом виде. Таким инструментом в рамках МЭК 61850 является язык разметки SCL [3, 4], основанный на расширяемом языке разметки XML (рис. 3) [5].

Ввиду вышесказанного необходимо рассмотреть основные SCL элементы (секции) и описать семантику каждого из них. Далее в статье рассматриваются глобальные элементы, которые являются дочерними по отношению к корневому элементу $\langle SCL \rangle \langle /SCL \rangle$.

II. Глобальные элементы (секции) SCL документа

Корневым элементом любого SCL документа является `<SCL></SCL>`, который обозначает начало и окончание документа, содержит информацию об используемых в документе пространствах имен и их префиксах, указывает на используемую при разработке документа конфигурацию (ревизия, версия и релиз) языка SCL.

Глобальные SCL элементы, согласно МЭК 61850-6 редакции 2.1, представлены на рис. 4 [4]. Последовательность элементов на рис. 4 соответствует требованиям SCL schema.

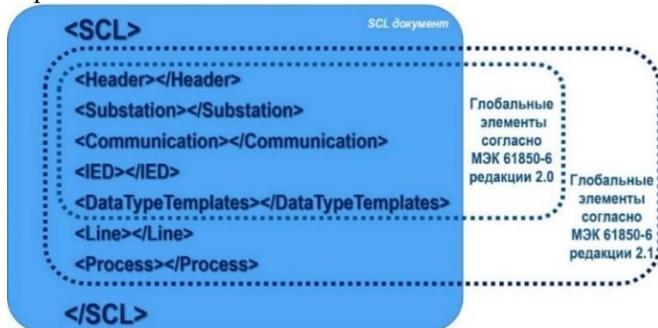


Рис. 4. Глобальные SCL элементы по МЭК 61850-6 редакций 2.0 и 2.1

Fig. 4. Global SCL elements according to IEC 61850-6 edition 2.0 and 2.1

По сравнению с редакцией 2.0 [3], элементы `<Line></Line>` и `<Process></Process>` являются новыми, их появление в редакции 2.1 связано с расширением области применения серии стандартов, а именно: применение МЭК 61850 для организации коммуникаций между подстанциями и центром управления сетями (control center). Основное назначение элементов `<Line></Line>` и `<Process></Process>` – описание электрических и функциональных связей группы подстанций, являющихся частью рассматриваемой энергосистемы. Элемент `<Process></Process>` может содержать в себе элементы `<Substation></Substation>`, `<Line></Line>` и используемый для описания силового первичного оборудования элемент `<ConductingEquipment></ConductingEquipment>`. Помимо этого, для элемента `<Process></Process>` разрешена рекурсивная связь, т.е. в его содержании разрешено повторно использовать элемент `<Process></Process>`. Единственное ограничение: на одной ветке иерархии документа не должно быть элементов `<Process></Process>` с идентичными значениями атрибута *type*. Элемент `<Header></Header>` является обязательным и должен присутствовать в любом SCL документе. `<Header></Header>` содержит информацию о текущей конфигурации SCL документа (уникальный идентификатор

документа, его текущие версия и ревизия, используемый при разработке инструмент и др.), а также историю его изменения.

Элемент `<Substation></Substation>` главным образом предназначен для описания однолинейной схемы подстанции – перечисления единиц силового оборудования и точек их соединения. Посредством логических узлов (элемент `<LNode></LNode>`) может быть представлено распределение функций релейной защиты, автоматики, управления и т.д.

При этом, с помощью атрибутов `iedName` и `lnType`, элемент `<LNode></LNode>` может ссылаться на подробное описание (конфигурацию) используемого логического узла: какие опциональные объекты данных используются, какие значения имеют атрибуты и т.д. Сами описания представляются элементом `<LNodeType></LNodeType>`, содержащемся в элементе `<DataTypeTemplates></DataTypeTemplates>`.

SCL элементы `<Communication></Communication>`, `<IED></IED>` и `<DataTypeTemplates></DataTypeTemplates>` тесно взаимосвязаны и предназначены для описания параметров (конфигурации) организованного на цифровой подстанции информационного обмена между ИЭУ. `<IED></IED>` описывает конфигурацию каждого отдельного ИЭУ: имеющиеся точки доступа и содержащиеся экземпляры классов логических устройств, логических узлов и объектов данных.

Используемые конфигурации логических узлов определяются через ссылку на соответствующий `<LNodeType></LNodeType>`. Элемент `<Communication></Communication>` указывает, какие точки доступа, описанные в элементах `<IED></IED>`, объединены в одну подсеть и какие ИЭУ могут осуществлять информационный взаимообмен без участия маршрутизатора согласно указанному коммуникационному протоколу.

III. Заключение

Язык разметки *SCL* – это используемый в рамках серии стандартов МЭК 61850 инструмент формализованного представления данных, позволяющий автоматизировать их обработку.

Единое понимание структуры данных и использование единого инструмента по их формализованному представлению у электроэнергетиков в совокупности позволяют обеспечить взаимодействие (*interoperability*) и взаимозаменяемость (*interchangeability*) ИЭУ и программных обеспечений.

© Чайкин В.С., 2021

© Иванов А.В., 2021

Поступила в редакцию 23.06.2021

Received 23.06.2021

Библиографический список

- [1] МЭК 61850-1. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 1: Введение и обзор. Введ. 2013-03-01. МЭК: 2013. – 78 с.
- [2] МЭК 61850-7-1. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 7-1: Базовая структура связи для подстанций и линейного оборудования. Принципы и модели. Введ. 2020-08. МЭК: 2020. – 200 с.
- [3] МЭК 61850-6. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 6: Язык описания конфигурации для связи между интеллектуальными электронными устройствами на электрических подстанциях. Введ. 2009-12. МЭК: 2009. – 220 с.
- [4] МЭК 61850-6. Изм. 1. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 6: Язык описания конфигурации для связи между интеллектуальными электронными устройствами на электрических подстанциях. Введ. 2018-06. МЭК: 2018. – 274 с.
- [5] Расширяемый язык разметки (XML) 1.0, редакция 5. Консорциум Всемирной паутины (W3C), 2008. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.w3.org/TR/xml/> (дата обращения 20.06.2020).

References

- [1] Communication networks and systems for power utility automation – Part 1: Introduction and overview, IEC 61850-1, March 2013.
- [2] Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-1: Basic communication structure – Principles and models, IEC 61850-7-1, Aug. 2019.
- [3] Communication networks and systems for power utility automation – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs, IEC 61850-6, Dec. 2009.
- [4] Communication networks and systems for power utility automation – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs, IEC 61850-6. Amd. 1, June 2018.
- [5] Extensible Markup language (XML) 1.0, Edition 5. World Wide Web Consortium (W3C), 2008. [Online]. Available at: <https://www.w3.org/TR/xml/>. [Accessed: Jun. 20, 2020].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чайкин Вячеслав Сергеевич, начальник управления цифровых технологий и IT-решений «РОССЕТИ научно-технический центр», г. Москва, Российская Федерация.

Иванов Антон Валерьевич, ведущий эксперт управления цифровых технологий и IT-решений «РОССЕТИ научно-технический центр», г. Москва, Российская Федерация.

Vyacheslav S. Chajkin, head of the Office of information technology and IT-solutions «ROSSETI Research and development center», Moscow, Russian Federation.

Anton V. Ivanov, lead expert of the Office of information technology and IT-solutions «ROSSETI Research and development center», Moscow, Russian Federation.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.314.263

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_72

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

Л.Э. Рогинская

Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия
ORCID: 0000-0003-3192-9042 roginskaya36@mail.ru

А.С. Горбунов

Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия
ORCID: 0000-0002-5047-666X freizer-anton@yandex.ru

А.А. Меднов

Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия
ORCID: 0000-0002-1128-2408 antonkind@inbox.ru

Описана структура источника питания электротехнологической установки, включающей индукционный нагрев. В типовом варианте она состоит из трех основных блоков: управляемого или неуправляемого полупроводникового выпрямителя, автономного инвертора тока или напряжения, либо резонансного инвертера и устройства для согласования с нагрузкой – согласующего или многофункционального высокочастотного трансформатора. Особое внимание в этой структуре уделяется многофункциональному трансформатору, позволяющемуратно увеличивать частоту выходного напряжения, совмещающая при этом функции согласующего трансформатора по согласованию выходного напряжения или тока источника питания. Кроме того, многофункциональный трансформатор является устройством регулирования или стабилизации выходных параметров, не требующим отключения питания электроустановки, и обеспечивающим гальваническую развязку источника питания и нагрузки, и по своей конструкции при этом не требует расширения элементной базы источника питания. Описаны принципы модульного использования многофункциональных трансформаторов для кратного увеличения в 2^n раз выходных частот источников питания. Приведен ряд ключевых преимуществ, получаемых при совместной работе полупроводниковых и ферромагнитных преобразователей частоты

в источнике питания. Также приведены полученные путем аппроксимации по методу Бесселя математические модели, позволяющие описать процессы намагничивания магнитопроводов в основных режимах работы многофункциональных трансформаторов (режим холостого хода и режим нагрузки) с умножением частоты в 2 и 4 раза, а также выполнить расчет его основных параметров: индукция и напряженность магнитного поля в магнитопроводах, выходные токи и напряжения.

Ключевые слова: источник питания электротехнологической установки, метод Бесселя, многофункциональный трансформатор, полупроводниковый преобразователь частоты, умножитель частоты ферромагнитный.

Для цитирования: Рогинская, Л.Э. Преобразователи частоты для электротехнологических процессов, включающих индукционный нагрев / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, А.А. Меднов // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 72-82. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_72

FREQUENCY CONVERTERS FOR INDUCTION HEATING ELECTROTECHNOLOGICAL PROCESSES

L.E. Roginskaya

Ufa State Aviation Technical University

Ufa, Russia

ORCID: 0000-0003-3192-9042 roginskaya36@mail.ru

A.S. Gorbunov

Ufa State Aviation Technical University

Ufa, Russia

ORCID: 0000-0002-5047-666X freizer-anton@yandex.ru

A.A. Mednov

Ufa State Aviation Technical University

Ufa, Russia

ORCID: 0000-0002-1128-2408 antonkind@inbox.ru

Abstract. The article describes an induction heating electrotechnological installation power supply structure. In a typical version, this electrical installation includes three main units: a controlled or uncontrolled semiconductor rectifier, an autonomous current or voltage inverter, or a resonant inverter and a device for matching with the load – a matching or multifunctional high-frequency transformer. Special attention in this structure is paid to a multifunctional transformer that allows to multiply the output voltage frequency, while combining the matching transformer functions to match the output voltage or current of the power supply. In addition, a multifunctional transformer is a device for regulating or stabilizing output parameters that does not require disconnecting the electrical installation

power supply, and provides power supply galvanic isolation from the load, and by its design does not require element base expansion of the power supply. The principles of the multifunctional transformers modular use for a multiple in 2^n times increase of the power supply output frequencies are described. A number of key advantages obtained when working together with semiconductor and ferromagnetic frequency converters in a power supply are presented. The article also presents mathematical models obtained by approximation using the Bessel's method, which allow describing the magnetic cores magnetization processes in the multifunctional transformers main operating modes (idle mode and load mode) with frequency multiplication in 2 and 4 times, as well as calculating its basic parameters, such as magnetic flux density and magnetic field strength in magnetic cores, output currents and voltages.

Keywords: electrotechnological installation power supply, Bessel's method, multifunctional transformer, semiconductor frequency converter, ferromagnetic frequency multiplier.

For citation: L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov and A.A. Mednov, "Frequency converters for induction heating electrotechnological processes", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 72-82, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_72

I. Введение

Электротехнологические установки, основным элементом которых является источник питания, преобразующий трехфазное напряжение промышленной частоты в однофазное напряжение повышенной или высокой частоты, нашли широкое распространение во многих отраслях промышленности, в том числе, в устройствах, включающих индукционный нагрев [1-4]. Широкий диапазон основных выходных параметров – активных мощностей, частот, напряжений – требует создания специализированных источников питания, отличающихся, наряду с перечисленными свойствами, высоким значением КПД (не ниже 90 %) в режимах, близких к номинальным, а также возможностью удобного регулирования перечисленных параметров. На рис. 1 приведена упрощенная схема источника питания с звеном повышенной частоты.

Согласно рис. 1, два первых блока – это выпрямитель и инвертор. Первый блок - выпрямитель, преобразующий трехфазное напряжение промышленной частоты в постоянное напряжение, которое может быть как нерегулируемым, так и регулируемым. Второй блок – инвертор преобразует постоянное напряжение в однофазное переменное напряжение. Имеется много разных схем инверторов, однако в большинстве случаев он представляет собой тиристорное или транзисторное звено высокой частоты, соответствующим образом соединяемое с нагрузкой. Нагрузка, чаще всего, может быть представлена двумя, тремя и четырьмя блоками [5, 6].

В состав третьего блока в настоящее время входит высокочастотный трансформатор, предназначенный для согласования требуемого напряжения нагрузки с выходным напряжением инвертора. Блок управления и защиты служит для формирования заданного алгоритма работы индукционной установки путем формирования структуры управляющих импульсов в различных режимах работы установки.

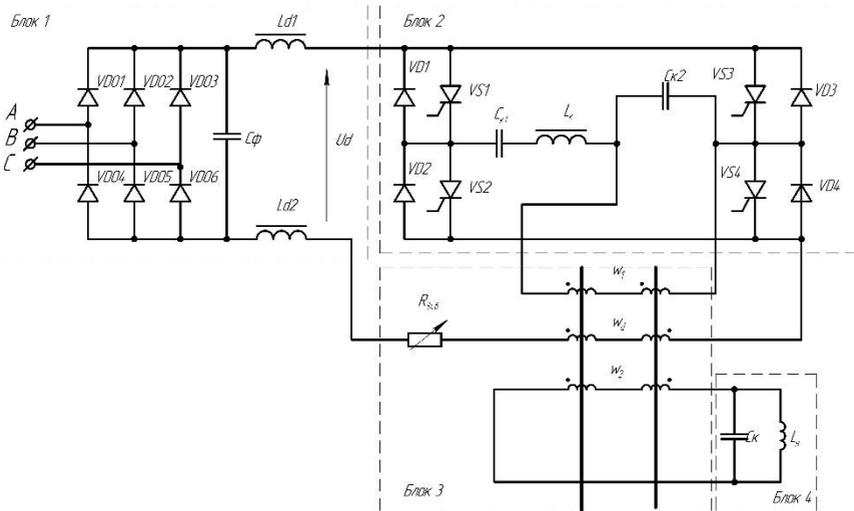


Рис. 1. Схема источника питания с звеном повышенной частоты
Fig. 1. Scheme of a power supply with a high-frequency link

Функции третьего блока рационально расширить, совершенствуя работу установки в целом. Это возможно благодаря применению многофункционального трансформатора, роль которого выполняет ферромагнитный умножитель частоты, подключенный к выходным зажимам инвертора. Данный многофункциональный трансформатор позволяет расширить частотный диапазон полупроводниковых преобразователей в кратное число раз, обеспечить работу установки при нескольких частотах с постоянной структурой инвертора, плавно регулируя выходное напряжение, т.е. обеспечивая согласование параметров инвертора и нагрузки.

Преобразование частоты в многофункциональных трансформаторах осуществляется благодаря нелинейным свойствам их магнитопроводов, определяемым насыщением. Поскольку частота первичного напряжения достаточно высока, насыщение магнитопроводов осуществляется путем поляризации постоянным полем, следовательно, умножение частоты происхо-

дит в четное число раз, и число однофазных насыщающихся трансформаторов кратно двум [7]. В индукционных установках обычно используются умножители частоты в два или в четыре раза [8], однако, в общем случае, частота может увеличиваться в 2^n раз. На рис. 2 приведены схемы многофункциональных преобразователей в 2 и 4 раза. Как видим, число ферромагнитных преобразователей равно 2^{n-1} , причем каждый преобразователь состоит из двух обычных однофазных трансформаторов. Первичные обмотки w_1 этих трансформаторов соединены встречно и подключены к выходным зажимам симметричных полупроводниковых преобразователей. Первичные напряжения изменяются по одинаковому закону и сдвинуты по фазе на угол $2\pi/n$.

Кроме первичных обмоток, имеется еще три: выходная (вторичная) обмотка w_2 , частота напряжения на выходе которой равна $f_2 = f_1 \cdot 2^n$, обмотка подмагничивания постоянным током w_d и обмотки самоподмагничивания w_c , выходная частота которых равна $f_2/2$. Эти обмотки в каждом преобразователе соединены последовательно согласно, а их соединения между преобразователями обеспечивают на выходе обмоток w_2 , w_d напряжение, изменяющееся с частотой f_2 , причем по обмотке подмагничивания протекает постоянный ток I_d , а напряжение на зажимах обмотки w_c изменяется с частотой $f_2/2$. Полупроводниковый преобразователь может иметь трехфазный выход и тогда многофазное первичное напряжение может быть получено соответствующим соединением первичных обмоток многофункционального трансформатора.

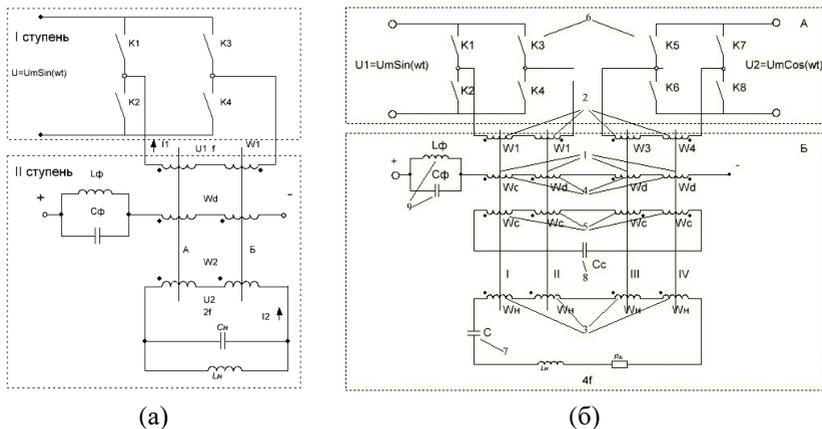


Рис. 2. Схемы многофункциональных преобразователей: с удвоением частоты (а) и с умножением частоты в четыре раза (б)

Fig. 2. Multifunctional converters schemes: with frequency doubling (a) and with frequency multiplication by four times (b)

Как указывалось, для электротермии рационально применять многофункциональные трансформаторы с умножением частоты в два и четыре раза (удвоители и учетверители частоты). Оба преобразователя (рис. 2 а, б) являются частными случаями ферромагнитных преобразователей. В первом случае $n = 1$, во втором $n = 2$. В первом случае достаточно одного инвертора и одного многофункционального преобразователя, во втором – два преобразователя подключены либо к двум одинаковым инверторам, выходные напряжения которых сдвинуты на 90^0 , либо к одному трехфазному инвертору, причем первичные обмотки многофункциональных трансформаторов соединены по Т-образной схеме [9].

Выходное напряжение симметричных инверторов при наиболее благоприятном режиме работы ферромагнитного преобразователя имеет либо прямоугольную, либо синусоидальную форму. При известных величинах первой гармоники магнитной индукции B_{1m} , постоянного тока I_d , а также параметров трех основных конструктивных систем трансформаторов можно определить характеристики преобразователя частоты для электротехнологических процессов, включающих индукционный нагрев. Для вывода выражений, определяющих характеристики ферромагнитного преобразователя, воспользуемся дедуктивным методом научного исследования – приближенным гармоническим анализом с определением гармоник по методу Бесселя [9].

Для расчета аппроксимируем кривую намагничивания трансформаторной стали, например, гиперболическим синусом: $h = \text{arsh}\beta B$, обозначая через $h = h/\alpha$, а через $B = \beta B$, получим, разделяя четные и нечетные составляющие напряженности и индукции магнитного поля:

$$\sum_{k=1}^{2n+1} h_{k1} + \sum_{k=0}^{2n} h_{k2} = \text{sh}\left(\sum_{k=1}^{2n+1} B_{k1} + \sum_{k=0}^{2n} B_{k2}\right). \quad (1)$$

В (1) $n = 0, 1, 2, \dots$ Поскольку многофункциональный преобразователь представляет собой удвоитель или учетверитель частоты, т.е. состоит из двух или четырех трансформаторов, при анализе электромагнитных процессов можно ограничиться гармоническими составляющими не выше четных. Тогда (1) будет иметь вид:

$$F_1 = h_1 + h_3 + h_0 + h_2 + h_4 = \text{sh}(B_1 + B_0 + B_2 + B_4). \quad (2)$$

Для определения четных гармонических составляющих напряженности и индукции получим зависимость между напряженностями и индукциями магнитного поля:

$$F_{\text{четн}} = \text{ch}B_1 \text{sh}(B_0 + B_2 + B_4). \quad (3)$$

Для определения нечетных гармоник согласно (2) имеем:

$$F_{\text{неч}} = \text{sh}B_1 \text{ch}(B_0 + B_2 + B_4). \quad (4)$$

Пользуясь (3) и (4), можно рассчитать основные характеристики многофункциональных трансформаторов, позволяющих увеличить выходную частоту в два и четыре раза.

II. Характеристики удвоителя частоты

Режим холостого хода.

Вторая гармоника магнитной индукции B_{2m} :

$$B_{2m} = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \text{arsh} \left(\frac{h_0}{\text{ch}(B_{1m} \cos k \omega t_k)} \right) \cos(2k \omega t_k),$$

где ω – выходная частота инвертора.

Постоянная составляющая магнитной индукции B_0 :

$$B_0 = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \text{arsh} \frac{h_0}{\text{ch}(B_{1m} \cos k \omega t_k)}.$$

Выходное напряжение при известной магнитной индукции равно:

$$U_{2m} = 4\omega B_{2m} Q w_2,$$

где Q – сечение стержня трансформатора удвоителя; w_2 – число витков выходной обмотки.

Амплитуды первой гармоники напряженности магнитного поля [7]:

$$H_{1m(1)} = 0,5 \text{sh}B_{1m} \text{ch}(B_0 - B_{2m}) + \text{ch}B_{0m}.$$

Режим нагрузки.

При расчете режима нагрузки полагаем, что в режиме короткого замыкания индукция B_2 равна нулю. Тогда напряженность H_{2m} в этом режиме определится из уравнения:

$$\sum_{k=0}^{k-1} \text{arsh} \frac{h_0 + H_{2m} \cos k 2\omega t_k}{\text{ch}(B_{1m} \cos k \omega t_k)} \cos 2k \omega t_k = 0. \quad (5)$$

Определив из (5) зависимость $H_{2m}=f(h_0)$ рассчитываем сопротивление короткого замыкания $x_2=E_{20}/I_2$, где E_{20} и I_2 действующие значения ЭДС вторичной обмотки при холостом ходе и ток той же обмотки при коротком замыкании. Эти величины определяются следующим образом:

$$E_{2m} \approx U_{2m} I_{2m} = H_{2m} l w_2.$$

Таким образом, (5) дает возможность построить внешние характеристики преобразователя при изменении нагрузки.

III. Характеристики умножителя частоты в четыре раза (учетверитель)

Данный многофункциональный преобразователь позволяет получить на выходе три различных частоты при одной выходной частоте инвертора. Наряду с частотой ω , равной выходной частоте полупроводникового преобразователя, возможны выходные частоты 2ω и 4ω . Как и в первом случае, рассмотрим сначала режим холостого хода.

Режим холостого хода.

В режиме холостого хода ток $I_2 = 0$, к зажимам обмотки w_c подключен конденсатор, поэтому по ней протекает ток $i_c = I_{cm} \cos 2\omega t_k$, по фазе совпадающий с потоком Φ_2 . Очевидно, также изменяется и напряженность h_2 . Значения B_{2m} , B_{4m} , B_0 определим из (2,3):

$$B_{2m} = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \operatorname{arsh} \frac{h_0 + h_{cm} \cos(2k\omega t_k)}{\operatorname{ch}(B_{1m} \cos k\omega t_k)} \cos(2k\omega t_k).$$

Ток выходной обмотки w_2 равен нулю, индукция изменяется по закону: $B_4 = B_{4m} \cos t$. Значения B_{4m} и постоянной составляющей индукции B_0 определяются из следующих соотношений:

$$B_{4m} = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \operatorname{arsh} \frac{h_0 + h_{cm} \cos(2k\omega t_k)}{\operatorname{ch}(B_{1m} \cos k\omega t_k)} \cos(4k\omega t_k);$$

$$B_0 = \frac{2}{k} \sum_{k=0}^{k-1} \operatorname{arch} \frac{h_0 + h_{cm} \cos(4k\omega t_k)}{\operatorname{ch}(B_{1m} \cos k\omega t_k)}.$$

Можно принять, что при изменении нагрузки, то есть тока выходной обмотки, ток и напряжение обмотки самоподмагничивания не изменяются, поэтому режимы нагрузки данного многофункционального трансформатора рассчитываются также как для удвоителя.

Режим нагрузки.

Как и ранее, предполагаем, что в режиме короткого замыкания выходной обмотки, индукция B_{4m} равна нулю и напряженность в этом режиме определяем аналогично (5):

$$\sum_{k=0}^{k-1} \operatorname{arsh} \frac{h_0 + H_{cm} \cos(2k\omega t_k) + H_{4m} \cos(4k\omega t_k)}{\operatorname{ch}(B_{1m} \cos k\omega t_k)} = 0.$$

Следует отметить, что напряженности $h_0 = I_d w_d / l$, $H_{cm} = I_{cm} w_c / l$ задаются. Дальнейший расчет производится так же, как расчет нагрузочного режима ферромагнитного преобразователя частоты в два раза. Приведенные зависимости с учетом того, что расчет полупроводниковых преобразователей освещен во многих источниках [10], позволяют определить параметры преобразователя частоты при каскадном включении обоих типов преобразователей.

IV. Заключение

1. Совместная работа полупроводниковых преобразователей частоты и многофункциональных трансформаторов позволяет расширить частотный диапазон в заданное число раз, осуществить работу полупроводникового преобразователя с разными частотами, согласовать выходные параметры инвертора и нагрузки, усовершенствовать защиту с учетом параметров ферромагнитных устройств.

2. Входные параметры преобразователя можно рассчитать, применяя приближенный гармонический анализ по методу Бесселя

3. Применение многофункциональных трансформаторов не приводит к расширению элементной базы электротехнологической установки, так как трансформаторы и сейчас применяются во многих установках, включающих индукционный нагрев

© Рогинская Л.Э., 2021

© Горбунов А.С., 2021

© Меднов А.А., 2021

Поступила в редакцию 28.06.2021

Received 28.06.2021

Библиографический список

- [1] Лебедев А.В. Выбор источников питания для индукционного нагрева // Электроника и информационные технологии. 2009. № 6. С. 1-7. [Электронный ресурс]. URL: http://fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/Induction_heating_source.pdf (дата обращения: 14.04.2021)

- [2] Nikitin Yu.A. The systems induction distributed low temperature heating and their application in the oil and gas industry // 2020 International Conference on Electro-technical Complexes and Systems (ICOECS), Oct. 27–30, 2020, Ufa, Russia, Ufa, Russia: IEEE, 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278518.
- [3] Shchukin V.G., Popov V.N. Evaluation of surface metal layer modification processes under high-frequency induction heating // AIP conference proceedings. 2019. Т. 2125. № 1. 030068. DOI: 10.1063/1.5117450.
- [4] Antipin A., Frizen V., Bychkov S. Determination of parameters of high-frequency matching transformer of installation of induction heating // 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), June 6–8, 2019, Varna, Bulgaria. P. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771648.
- [5] Аитов И., Камалетдинова Р. Вопросы проектирования систем и элементов защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2011. Т. 1. № 29. С. 59-64.
- [6] Аитов И. Тиристорные источники питания повышенной мощности для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 17. С. 80-86.
- [7] Бамдас А.М., Блинов И.В., Захаров Н.В., Шапиро С.В. Ферромагнитные умножители частоты М.: Энергия, 1968. – 176 с. (Серия «Трансформаторы», вып. 18).
- [8] Рогинская Л.Э., Латыпов А.Р., Меднов А.А. Выбор параметров многофункционального трансформатора // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 61-68. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-61-68.
- [9] Рогинская Л.Э., Латыпов А.Р. Расширение частотного диапазона полупроводникового преобразователя на базе многофункциональных трансформаторов (умножители частоты) // Практическая силовая электроника. 2015. № 2 (58). С. 41-45.
- [10] Медведев В.А. Расчет автономных резонансных инверторов для индукционного нагрева. Тольятти: ТГУ, 2010 – 47 с.

References

- [1] A.V. Lebedev, “Vybor istochnikov pitaniya dlya indukcionnogo nagreva [The choice of power sources for induction heating]”, *Elektronika i informacionnye tekhnologii [Electronics and information technology]*, no. 6, pp. 1-7, 2009. [Online]. Available at: http://fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/Induction_heating_source.pdf [Accessed: Apr. 14, 2021] (in Russian).
- [2] Yu.A. Nikitin, “The systems induction distributed low temperature heating and their application in the oil and gas industry”, in proc. *2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Oct. 27–30, 2020, Ufa, Russia, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278518.
- [3] V.G. Shchukin and V.N. Popov, “Evaluation of surface metal layer modification processes under high-frequency induction heating”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2125, is. 1, 030068. DOI: 10.1063/1.5117450.
- [4] A. Antipin, V. Frizen and S. Bychkov, “Determination of parameters of high-frequency matching transformer of installation of induction heating”, in proc. *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, June 6–8, 2019, Varna, Bulgaria, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771648.

- [5] I. Aitov and R. Kamaletdinova, “Voprosy proektirovaniya sistem i elementov zashchity tiristornyh preobrazo-vatelej chastoty dlya elektrotekhnologicheskikh ustanovok [Questions of designing systems and protection elements for thyristor frequency converters for electrotechnological installations]”, *Silovaya Elektronika [Power electronics]*, vol. 1, no. 29, pp. 59-64, 2011 (in Russian)
- [6] I. Aitov, “Tiristornye istochniki pitaniya povyshennoj moshchnosti dlya elektrotekhnologicheskikh ustanovok [Thyristor high-power power sources for electrotechnological installations]”, *Silovaya Elektronika [Power electronics]*, no. 17, pp. 80-86, 2008 (in Russian)
- [7] A.M. Bandas, V.I. Blinov, N.I. Zakharov and S.V. Shapiro, *Ferromagnitnye umnozhiteli chastoty [Ferromagnetic frequency converters]*. Moscow, Energiya, 1968 (in Russian).
- [8] L.E. Roginskaya, A.R. Latypov and A.A. Mednov, “The selecting of multifunctional transformer parameters”, *Vestnik MEI. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*, no. 1, pp. 61-68, 2019. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-61-68.
- [9] L.E. Roginskaya and A.R. Latypov, “Frequency range enhancement of semiconductor converter based on multifunctional transformers (frequency multipliers)”, *Practical Power Electronics*, no. 2 (58), pp. 41-45, 2015.
- [10] V.A. Medvedev, *Raschet avtonomnyh rezonansnyh invertorov dlya indukcionnogo nagreva [Calculation of autonomous resonant inverters for induction heating]*. Tolyatti: TSU, 2010. (in Russian),

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рогинская Любовь Эммануиловна, доктор технических наук, профессор Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация.

Lyubov E. Roginskaya, D. Sci. (Eng.), professor of the Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation.

Горбунов Антон Сергеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация.

Anton S. Gorbunov, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor of the Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation.

Меднов Антон Александрович, младший научный сотрудник Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация.

Anton A. Mednov, junior researcher of the Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation.

УДК 621.313.8

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_83

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ В ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТАХ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.А. Афанасьев

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
Чебоксары, Россия
afan39@mail.ru

Используя метод разделения переменных Фурье, получена двумерная аналитическая модель вентильного двигателя с постоянными магнитами в полярных координатах. В общую расчетную область модели входят ферромагнитные участки и постоянные магниты реальной конфигурации. Постоянные магниты ротора, токи обмотки статора и падения магнитного напряжения в зубцах статора являются источниками магнитного поля. Расчетные значения магнитной индукции в средах находятся с учетом геометрической структуры зубчатости статора, расположения постоянных магнитов и обмоточных гармоник магнитодвижущей силы. Расчетные значения функциональных характеристик вентильного двигателя, полученные с помощью численного моделирования, близки к его паспортным данным.

Ключевые слова: зубчатость статора, метод разделения переменных, обмоточные гармоники, постоянные магниты, электромагнитный момент.

Для цитирования: Афанасьев А.А. Применение метода разделения переменных в полярных координатах для расчета магнитоэлектрических вентильных двигателей // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 83-99.
DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_83

APPLICATION OF METHOD OF SEPARATION OF VARIABLES IN THE CALCULATION OF MAGNETOELECTRIC BRUSHLESS DC ELECTRIC MOTORS

A.A. Afanasiev

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov
Cheboksary, Russia
afan39@mail.ru

Abstract. A two-dimensional analytical model of a brushless DC electric motor with permanent magnets in polar coordinates is obtained on the basis of the Fourier

method. General design area of this model includes ferromagnetic sections and permanent magnets of a real configuration. The sources of the magnetic field are permanent magnets of the rotor, stator winding currents and the magnetic voltage drops in stator teeth. The calculated values of magnetic inductions in medium are based on the geometric structures of the stator gear, the location of permanent magnets and the winding harmonics of the magnetomotive force. The calculated values of the engine's functional parameters obtained on the model are close to its passport values.

Keywords: electromagnetic torque, Fourier method, separation of variables, permanent magnets, serration of the stator, winding harmonics.

For citation: A.A. Afanasiev, "Application of method of separation of variables in the calculation of magnetolectric brushless DC electric motors", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 83-99, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_83

I. Постановка задачи

Вентильные двигатели (ВД) с постоянными магнитами (ПМ) находят широкое применение в управляемых электроприводах различных промышленных механизмов (в робототехнике, медицинской аппаратуре и др.) благодаря хорошим регулировочным характеристикам, высокому КПД, минимальным пусковым токам и небольшим массогабаритным показателям [1]. Однако специфичность ВД с ПМ как электромеханического объекта вызывает трудности при их расчете и проектировании. Трудности связаны, во-первых, с двумя разными, по своей природе, источниками магнитного поля: обмоткой переменного тока и постоянными высокоэнергетическими магнитами; во-вторых, с наличием зубчатости статорного сердечника и высших обмоточных гармоник, вызывающих нежелательные пульсации электромагнитного момента и тепловые потери от вихревых токов в теле магнитов.

Используя метод разделения переменных Фурье в полярных координатах, можно получить двумерную аналитическую модель магнитоэлектрического ВД, учитывающую реальную геометрию высокоэнергетических ПМ, пазов статора и фиксированной конечной магнитной проницаемости зубцов и ярем сердечников статора и ротора.

II. Особенности метода разделения переменных в полярной системе координат

Из математической физики известны решения уравнения Лапласа $\nabla^2 u(r, \varphi) = 0$ для круга, кольца и их наружных областей в форме краевых задач Дирихле, Неймана и смешанного типа [2, 3]. Их частные решения могут иметь вид:

$$u(r, \varphi) = (Ar^n + Br^{-n})(C \cos n\varphi + D \sin n\varphi), \quad (1)$$

где A, B, C, D – постоянные коэффициенты, рассчитываемые по известным формулам, учитывающим краевые условия задачи.

В прикладных устройствах активная область может состоять из набора примыкающих друг к другу колец. В этом случае постоянные кольца из (1) будут находиться из условий сопряжения рассматриваемого поля на границах совокупности колец.

Расчетная схема магнитоэлектрического ВД, содержащая 6 колец (6 сред), показана на рис. 1.

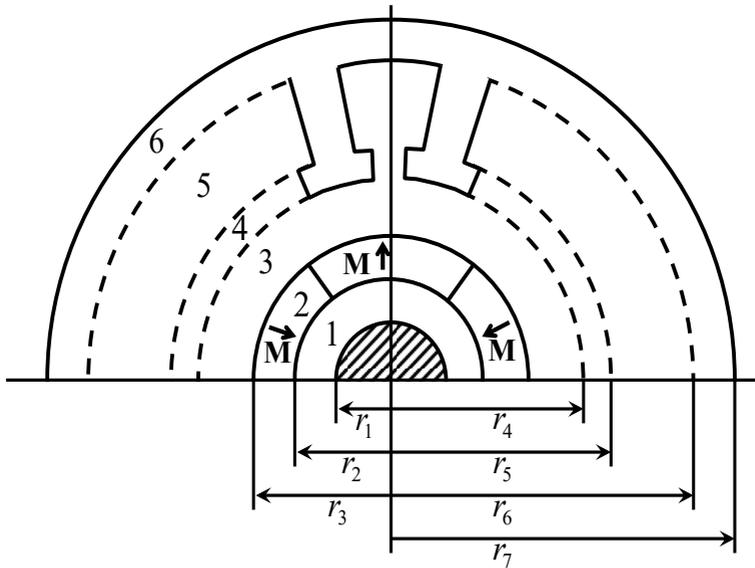


Рис. 1. Расчетная схема задачи с шестью средами:

- 1 – ярмо ротора; 2 – постоянные магниты с намагниченностью M ;
3 – воздушная среда (зазор); 4 – наконечники зубцов статора; 5 – зубцы статора;
6 – ярмо статора.

Fig. 1. Calculation scheme for a problem with six mediums:

- 1 – rotor yoke; 2 – permanent magnets with magnetization M ;
3 – air medium (gap); 4 – tips of stator teeth; 5 – stator teeth; 6 – stator yoke

Принятые следующие допущения [4].

1. Ферромагнитные среды линейны.
2. Вектор намагниченности магнитов имеет только одну компоненту $M = M_r$.
3. Справедлив принцип суперпозиции магнитных полей магнитов ротора (индуктора) и токов обмотки статора и магнитных напряжений в зубцах статора.

III. Расчет магнитного поля магнитов ротора

Исходные уравнения

Рассматриваемое магнитное поле потенциально и удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа $\nabla^2 u = 0$, которое можно решить методом разделения переменных Фурье отдельно для каждой из шести названных выше сред (колец), стыкуя их граничные значения путем вычисления соответствующих постоянных.

Скалярные магнитные потенциалы $u_n(r, \varphi)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{nr}(r, \varphi)$ в указанных средах ($n = 1, 2, \dots, 6$) находятся из решения краевой задачи Неймана, когда источником магнитного поля являются только магниты ротора (ферромагнитные зубцы и ток обмотки статора отсутствуют):

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{1k} \frac{r_1}{k} \left(\frac{r_1}{r} \right)^k \cos kp\varphi; \\ B_{1r}(r, \varphi) = -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_1}{\partial r} = \mu_0 \mu_p \sum_{k=1}^{\infty} B_{1k} \left(\frac{r_1}{r} \right)^{k+1} \cos p\varphi; \\ r_1 \leq r \leq r_2, \end{array} \right. \quad (2)$$

где μ_p – относительная магнитная проницаемость ярма ферромагнитного сердечника ротора; p – число пар полюсов.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_2(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{2k} \frac{r_2}{k} \left(\frac{r_2}{r} \right)^k \cos kp\varphi; \\ B_{2r}(r, \varphi) = \mu_0 \left(-\frac{\partial u_2}{\partial r} + \mu_m \sum_{k=1}^{\infty} M_{rk} \cos kp\varphi \right) = \\ = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} \left(B_{2k} \left(\frac{r_2}{r} \right)^{k+1} + \mu_m M_{rk} \right) \cos kp\varphi; \\ r_2 \leq r \leq r_3, \end{array} \right. \quad (3)$$

где μ_m – относительная магнитная проницаемость магнита.

Предполагается, что зависимость намагниченности $M = M(x)$ магнитов ротора известна и может быть представлена тригонометрическим рядом:

$$M(\varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} M_{rk} \cos kp\varphi; \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_3(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{3k} \frac{r_3}{k} \left(\frac{r_3}{r} \right)^k \cos kp\varphi, \\ B_{3r}(r, \varphi) = -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial r} = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} B_{3k} \left(\frac{r_3}{r} \right)^{k+1} \cos kp\varphi; \\ r_3 \leq r \leq r_4; \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_4(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{4k} \frac{r_4}{k} \left(\frac{r_4}{r} \right)^k \cos kp\varphi; \\ B_{4r}(r, \varphi) = -\mu_0 \frac{\partial u_4}{\partial r} = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} B_{4k} \left(\frac{r_4}{r} \right)^{k+1} \cos kp\varphi; \\ r_4 \leq r \leq r_5; \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_5(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{5k} \frac{r_5}{k} \left(\frac{r_5}{r} \right)^k \cos kp\varphi; \\ B_{5r}(r, \varphi) = -\mu_0 \frac{\partial u_5}{\partial r} = \mu_0 \sum_{k=1}^{\infty} B_{5k} \left(\frac{r_5}{r} \right)^{k+1} \cos kp\varphi; \\ r_5 \leq r \leq r_6; \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_6(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{6k} \frac{r_6}{k} \left(\frac{r_6}{r} \right)^k \cos kp\varphi; \\ B_{6r}(r, \varphi) = -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_6}{\partial r} = \mu_0 \mu_c \sum_{k=1}^{\infty} B_{6k} \left(\frac{r_6}{r} \right)^{k+1} \cos kp\varphi \\ r_6 \leq r \leq r_7. \end{array} \right. \quad (8)$$

Намагниченность магнита можно представить равенством:

$$M = M_r + k_M \cdot H.$$

Тогда выражение для магнитной индукции имеет вид:

$$B = \mu_0 \cdot [M_r + (1+k_M) \cdot H].$$

У высокоэнергетических ПМ относительная магнитная проницаемость $\mu_m = (1 + k_m)$ близка к единице (коэффициент восприимчивости $k_m \approx 0$). Поэтому намагниченность M в (4) можно принять равной остаточной намагниченности M_r .

Расчет постоянных в уравнениях потенциалов и индукций

Входящие в уравнения (2), (3), (5-8) шесть постоянных B_{nk} , ($n = 1, 2, \dots, 6$) определяются из следующих шести граничных условий, получаемых приравниванием магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах сред:

$$\begin{aligned} B_{1k} - B_{2k} &= 0; \\ -B_{2k} + \mu_p B_{1k} &= -m_k; \\ B_{2k} - B_{3k} &= 0; \\ B_{3k} - B_{4k} &= 0; \\ B_{4k} - B_{5k} &= 0; \\ -B_{5k} + \mu_c B_{6k} &= 0, \end{aligned}$$

где $m_k = M_k / k$.

По (5), (7) рассчитаны магнитные индукции в кольцах 3 и 5, вызванные магнитами ротора вентильного двигателя 6ДВМ 300 А35, показанные на рис. 2. Его технические данные: диаметр расточки статора 126 мм; активная длина 150 мм; высота неодим-железо-боровых магнитов 7,1 мм; $z = 24$; $2p = 4$.

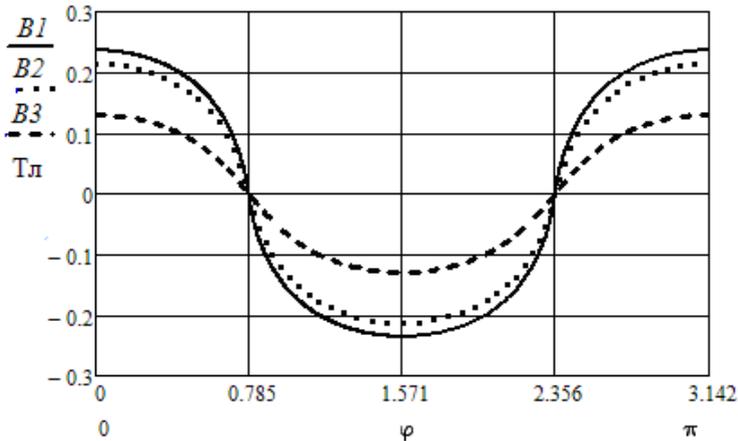


Рис. 2. Магнитные индукции: B_1, B_2 – на границах кольцевой области 3; B_3 – на середины кольцевой области 5

Fig. 2. Magnetic inductions: B_1, B_2 – at the boundaries of the annular region 3; B_3 – in the middle of the ring area 5

IV. Расчет магнитного поля обмотки статора

Магнитное поле \mathbf{H}^c , созданное током обмотки статора, является суммой потенциального \mathbf{H}^c_p и дополнительного \mathbf{H}^c_0 магнитных полей [5]:

$$\mathbf{H}^c = \mathbf{H}^c_p + \mathbf{H}^c_0. \quad (9)$$

Расчет дополнительного магнитного поля.

Вектор дополнительного магнитного поля \mathbf{H}^c_0 :

$$\mathbf{H}^c_0 = \int_{r_4}^r [\Delta d\mathbf{l}], \quad (10)$$

где Δ – вектор плотности тока в проводниках обмотки.

При взятии интеграла в (10) в направлении против координаты r вектор дополнительного поля \mathbf{H}^c_0 будет иметь только координатную составляющую φ , а магнитные листы с потенциалами МДС катушек обмотки статора будут расположены на нижней границе токового слоя (внизу пазов у шлицевых отверстий).

$$H^c_0 = H^c_{0\varphi} = \Delta[r - (r_4 - h_2)], \quad (11)$$

где h_2 – высота паза статора.

Для расположения дополнительного поля только в токовом слое обмотки устанавливаем на его верхней границе два магнитных листа МДС с противоположными знаками (они, очевидно, в совокупности не будут источниками магнитного поля), линейные плотности токов которых равны $\mp H_{0\max}$. Магнитный лист с плотностью $(-H_{0\max})$, являющийся дельта функцией $\delta(r - r_4)$, при взятии интеграла (10) обнулит дополнительное поле на линии $r = r_4$. Вторым магнитный лист МДС будет источником потенциального магнитного поля обмотки статора [6].

Для бесконечно тонкого магнитного листа (МДС) m фазной обмотки статора справедливо выражение для бегущих волн основной и высших гармоник [7]:

$$F^c = \frac{m}{2} \sum_{k=0}^{\infty} F_{\max(2mk \pm 1)} [\sin \omega t \cos(2mk \pm 1) p \varphi \mp \cos \omega t \sin(2mk \pm 1) p \varphi], \quad (12)$$

$$\text{где } F_{\max(2mk \pm 1)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I \frac{wk_{w(2mk \pm 1)}}{(2mk \pm 1)p}.$$

Расчет потенциального магнитного поля обмотки статора.

Потенциальное магнитное поле, создаваемое магнитным листом с МДС, рассчитывается методом разделения переменных Фурье, решая красную задачу Дирихле отдельно для каждой из шести областей на рис. 1 и стыкуя их граничные значения путем вычисления соответствующих постоянных. Определяем скалярные магнитные потенциалы $u_j(r, \varphi)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{jr}(r, \varphi)$ в областях ($j = 1, 2, \dots, 6$), вызванные синусной составляющей МДС в (12) для времени $t = 0$. Косинусная составляющая в этот момент равна нулю.

$$F_1 = F_{sv} \sin \nu r \varphi, \quad (13)$$

где $F_{sv} = \frac{m}{2} F_{\max} \cos \omega t$; $\nu = 2mk \pm 1$; $\omega t = 0$.

Будем иметь следующие выражения для магнитных потенциалов и индукций при отсутствии магнитов ротора и зубцов статора:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1(r, \varphi) = \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{1\nu} \left(\frac{r}{r_7} \right)^{\nu} \sin \nu r \varphi; \\ B_{1r}(r, \varphi) = -\mu_0 \mu_p \frac{\partial u_1}{\partial r} = -\mu_0 \mu_p \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu B_{1\nu} \frac{r^{\nu-1}}{r_7^{\nu}} \sin \nu r \varphi; \\ r_1 \leq r \leq r_2; \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_2(r, \varphi) = \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{2\nu} \left(\frac{r}{r_7} \right)^{\nu} \sin \nu r \varphi; \\ B_{2r}(r, \varphi) = -\mu_0 \frac{\partial u_2}{\partial r} = -\mu_0 \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu B_{2\nu} \frac{r^{\nu-1}}{r_7^{\nu}} \sin \nu r \varphi; \\ r_2 \leq r \leq r_3; \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_3(r, \varphi) = \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{3\nu} \left(\frac{r}{r_7} \right)^{\nu} \sin \nu p \varphi; \\ B_{3r}(r, \varphi) = -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial r} = -\mu_0 \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu B_{3\nu} \frac{r^{\nu-1}}{r_7^{\nu}} \sin \nu p \varphi; \\ r_3 \leq r \leq r_4; \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_3(r_3, \varphi) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \left(B_{3\nu} \left(\frac{r}{r_7} \right)^{\nu} + F_{s\nu} \right) \sin \nu p \varphi; \\ B_{3r}(r_3, \varphi) = -\mu_0 \frac{\partial u_3}{\partial r} = -\mu_0 \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu B_{3\nu} \frac{r^{\nu-1}}{r_7^{\nu}} \sin \nu p \varphi; \\ r = r_4; \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_4(r, \varphi) = \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{4\nu} \left(\frac{r}{r_5} \right)^{\nu} \sin \nu p \varphi; \\ B_{4r}(r, \varphi) = -\mu_0 \frac{\partial u_4}{\partial r} = -\mu_0 \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu B_{4\nu} \frac{r^{\nu-1}}{r_5^{\nu}} \sin \nu p \varphi; \\ r_4 \leq r \leq r_5; \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_5(r, \varphi) = \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{5\nu} \left(\frac{r}{r_7} \right)^{\nu} \sin \nu p \varphi; \\ B_{5r}(r, \varphi) = -\mu_0 \frac{\partial u_5}{\partial r} = -\mu_0 \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu B_{5\nu} \frac{r^{\nu-1}}{r_7^{\nu}} \sin \nu p \varphi; \\ r_5 \leq r \leq r_6; \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_6(r, \varphi) = \sum_{v=1}^{\infty} B_{6v} \left(\frac{r}{r_7} \right)^v \sin v\rho\varphi; \\ B_{6r}(r, \varphi) = -\mu_0\mu_c \frac{\partial u_6}{\partial r} = -\mu_0\mu_c \sum_{v=1}^{\infty} vB_{6v} \frac{r^{v-1}}{r_7^v} \sin v\rho\varphi; \\ r_6 \leq r \leq r_7. \end{array} \right. \quad (20)$$

Расчет постоянных в уравнениях потенциалов и индукций.

Входящие в (14)-(20) шесть постоянных B_{nv} , ($n = 1, \dots, 6$) определяются из следующих шести граничных условий, получаемых приравнованием магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах сред:

$$\begin{aligned} B_{1v} - B_{2v} &= 0; \\ -B_{2v} + \mu_p B_{1v} &= 0; \\ B_{2v} - B_{3v} &= 0; \\ B_{3v} - B_{4v} &= -F_{sv} \left(\frac{r_7}{r_3} \right)^v; \\ B_{4k} - B_{5k} &= 0; \\ -B_{5v} + \mu_c B_{6v} &= 0. \end{aligned}$$

Радиальные составляющие магнитной индукции в кольцевых областях 2, 3 и 5, вызванные номинальным током обмотки статора при отсутствии электротехнической стали в зубцовой зоне статора (в кольцах 4 и 5 на рис. 1) рассчитаны по (15), (16) и (19). Полученные зависимости показаны на рис. 3. Видим, что названные индукции сравнительно невелики.

V. Расчет магнитного поля,

вызванного падением магнитного напряжения в зубцах статора

Двумя другими источниками магнитного поля являются падения магнитного напряжения в ферромагнитных зубцах статора, принадлежащих двум средам (рис. 1): кольцу 4, содержащей узкие пазовые шлицы, и кольцу 5 с пазами статора. В первом приближении максимумы этих магнитных напряжений U_{mz4} и U_{mz5} (в некотором зубце) можно считать средними в названных полосах, вызванными магнитами ротора и током обмотки статора. Эти напряжения в ферромагнитных участках колец примем изменяющимися синусоидальным образом:

$$U_{z4(5)} = U_{mz4(5)} \cos p\varphi. \quad (21)$$

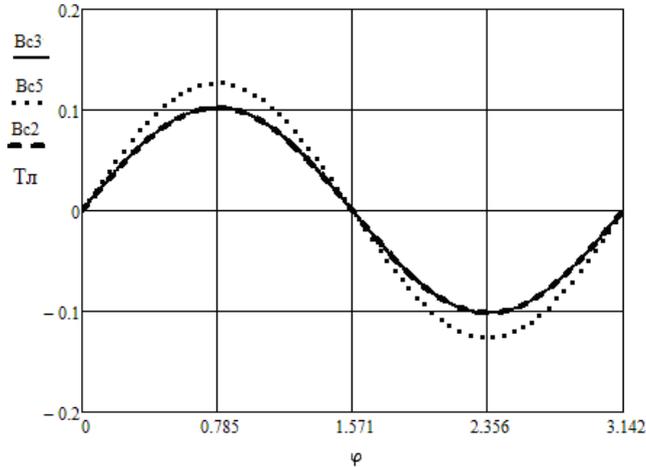


Рис. 3. Радиальные магнитные индукции от тока обмотки статора:
 B_{c2} – на нижнем краю кольца 2; B_{c3} – на середине воздушного зазора;
 B_{c5} – на нижнем краю кольца 5

Fig. 3. Radial magnetic inductions from the stator winding current:
 B_{c2} – at the bottom edge of ring 2; B_{c3} – in the middle of the air gap;
 B_{c5} – at the bottom edge of the ring 5

Магнитные напряжения в указанных областях формируют бесконечный тригонометрический ряд, коэффициенты которого вычисляются в предположении, что магнитные напряжения в воздушных участках (в шлицах и пазах) равны нулю:

$$u_{4(5)}(\varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{4(5)}(k) \cos kp\varphi, \quad (22)$$

где

$$U_{4(5)}(k) = \frac{4U_{mz4(5)}}{zt_z} \sum_{k=1}^{\frac{z}{2p}} \int_{(k-1)t_z + \frac{b_1(2)}{2}}^{kt_z - \frac{b_2(2)}{2}} \cos p\varphi \cos kp\varphi d\varphi; \quad (23)$$

$t_z = 2\pi / z$ – зубцовый шаг статора; b_1, b_2 – соответственно ширины шлица и паза статора в механических радианах.

Максимумы магнитных напряжений U_{mz4} и U_{mz5} связаны с кривой намагничивания электротехнической стали известными равенствами:

$$U_{mz4(5)} = H_{m4(5)} h_{4(5)}, \quad (24)$$

где $H_{m4(5)}$, $h_{4(5)}$ – соответственно максимум напряженности магнитного поля в стали и высоты соответствующих элементов зубца.

Исходные уравнения.

Скалярные магнитные потенциалы $u_n(r, \varphi)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{ny}(r, \varphi)$ в названных средах ($n = 1, 2, \dots, 6$) определяют, когда единственным источником магнитного поля являются магнитные напряжения (или более физично: напряженности магнитного поля) зубцов в области 4. Магниты ротора и токи обмотки статора отсутствуют.

При этом, очевидно, расчет магнитных индукций, как в области 4, так и в других областях, связан с умножением магнитной напряженности на магнитную проницаемость $\mu_4(\varphi)$ ферромагнитной области 4. В этом случае обеспечивается соблюдение граничных условий для рассматриваемых полюсов: равенство магнитных потенциалов $u_n(r, \varphi)$ и нормальных составляющих магнитных индукций $B_{ny}(r, \varphi)$ на границах областей (колец).

Магнитные проницаемости $\mu_{4(5)}(\varphi)$ находятся в предположении, что магнитная характеристика является прямой, проходящей через начало координат и рабочую точку магнитной индукции на нелинейной зависимости $B = f(H)$:

$$\mu_{4(5)}(\varphi) = \left| \sum_{k=1}^{\infty} \mu_{4(5)}(k) \cos kp\varphi \right|, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \mu_{4(5)}(k) &= \frac{4\mu_{z4(5)}}{zt_z} \sum_{k=1}^{\frac{z}{2p}} \int_{kt_z - h_{(2)}}^{kt_z} (\text{sign} \cos p\varphi) \cos kp\varphi d\varphi + \\ &+ \frac{4}{zt_z} \sum_{k=1}^{\frac{z}{2p}} \int_{kt_z - h_{(2)}}^{kt_z} (\text{sign} \cos p\varphi) \cos kp\varphi d\varphi. \end{aligned}$$

Значения максимальных проницаемостей в участках зубцов $\mu_{z4(5)}$ уточняются по результатам расчета суммарного магнитного поля в зубцах, вызванного всеми тремя его источниками.

Выражения для магнитных потенциалов и магнитных индукций в шести областях получены, решая для них краевые задачи Дирихле:

$$\begin{cases} u_1(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{1k} \left(\frac{r_1}{r} \right)^k \cos kp\varphi; \\ B_{1r}(r, \varphi) = -\mu_p \mu_4(\varphi) \frac{\partial u_1}{\partial r} = \mu_p \mu_4(\varphi) \sum_{k=1}^{\infty} kB_{1k} \frac{r_1^k}{r^{k+1}} \cos kp\varphi; \\ r_1 \leq r \leq r_2; \end{cases} \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_2(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{2k} \left(\frac{r_1}{r} \right)^k \cos kp\varphi; \\ B_{2r}(r, \varphi) = -\mu_0 \mu_4(\varphi) \frac{\partial u_2}{\partial r} = \mu_0 \mu_4(\varphi) \sum_{k=1}^{\infty} kB_{2k} \frac{r_1^k}{r^{k+1}} \cos kp\varphi; \\ r_2 \leq r \leq r_3; \end{array} \right. \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_3(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(B_{3k} \left(\frac{r_1}{r} \right)^k \right) \cos kp\varphi; \\ B_{3r}(r, \varphi) = -\mu_0 \mu_4(x) \frac{\partial u_3}{\partial r} = \mu_0 \mu_4(\varphi) \sum_{k=1}^{\infty} kB_{3k} \frac{r_1^k}{r^{k+1}} \cos kp\varphi; \\ r_3 \leq r \leq r_4, \end{array} \right. \quad (28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_4(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[B_{4k} \left(\frac{r_1}{r} \right)^k + U_4(k) \right] \cos kp\varphi; \\ B_{4r}(r, \varphi) = -\mu_0 \mu_4(x) \frac{\partial u_4}{\partial r} = \mu_0 \mu_4(\varphi) \sum_{\nu=1}^{\infty} kB_{4k} \frac{r_1^k}{r^{k+1}} \cos kp\varphi; \\ r_4 \leq r \leq r_5, \end{array} \right. \quad (29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_5(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{5k} \left(\frac{r_1}{r} \right)^k \cos kp\varphi; \\ B_{5r}(r, \varphi) = -\mu_0 \mu_4(x) \frac{\partial u_5}{\partial r} = \mu_0 \mu_4(\varphi) \sum_{k=1}^{\infty} kB_{5k} \frac{r_1^k}{r^{k+1}} \cos kp\varphi; \\ r_5 \leq r \leq r_6, \end{array} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_6(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{6k} \left(\frac{r_1}{r} \right)^k \cos k r \varphi; \\ B_{6r}(r, \varphi) = -\mu_0 \mu_4(x) \frac{\partial u_6}{\partial r} = \mu_c \mu_4(\varphi) \sum_{k=1}^{\infty} k B_{6k} \frac{r_1^k}{r^{k+1}} \cos k r \varphi; \\ r_6 \leq r \leq r_7. \end{array} \right. \quad (31)$$

Выражения, аналогичные (26)–(31), могут быть записаны для случая, когда источником магнитного поля являются магнитные напряжения зубцов в области 5.

Расчет постоянных.

Шесть постоянных B_{nk} , ($n = 1, 2, \dots, 6$), входящих в (26)–(31), определяются из следующих шести граничных условий, полученных приравнованием магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах сред:

$$\begin{aligned} B_{1k} - B_{2k} &= 0; \\ -B_{2k} + \mu_p B_{1k} &= 0; \\ -B_{2k} + B_{3k} &= 0; \\ B_{3k} - B_{4k} &= U_4(k) \frac{r_1^{k+1}}{r_1^k}; \\ -B_{4k} + B_{5k} &= 0; \\ -B_{5k} + \mu_c B_{6k} &= 0. \end{aligned}$$

Аналогичные уравнения для нахождения постоянных будем иметь для случая, когда источником магнитного поля являются магнитные напряжения зубцов в области 5.

Расчеты показывают, что при одинаковых магнитных индукциях, а значит и при одинаковых магнитных напряженностях в областях 4 и 5, магнитные напряжения в области 5 будут в h_5/h_4 раз больше напряжения области 4. Для рассматриваемого двигателя это отношение составит $h_5/h_4 = 40/1,5 = 26,7$. Это отношение будет еще больше, если учесть, что магнитная индукция в элементе зубца из области 4 будет существенно меньше, чем в остальной части зубца. Поэтому влиянием магнитного напряжения в области 4 (как одного из источников магнитного поля) на магнитные индукции в других областях можно пренебречь.

На рис. 4. показаны кривые распределения магнитных индукций в кольцевых областях 3 (воздушный зазор) и 5 (в зубцах статора), полученные

по формулам, аналогичным (28) и (30), когда источником магнитного поля являются магнитные напряжения зубцов, расположенных в области 5.

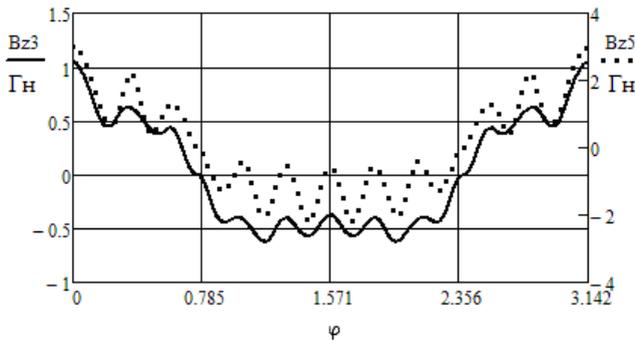


Рис. 4. Магнитные индукции, вызванные магнитными напряжениями зубцов статора: B_{z3} – в середине воздушного зазора ($r = r_3 + 0,5\delta$);

B_{z5} – в среднем сечении зубцов статора ($r = r_5 + 0,5h_2$)

Fig. 4. Magnetic inductions caused by the magnetic stresses of the stator teeth:

B_{z3} – in the middle of the air gap ($r = r_3 + 0,5\delta$);

B_{z5} – in the middle section of the stator teeth ($r = r_5 + 0,5h_2$)

Результирующая магнитная индукция в воздушном зазоре (области 3), вызванная всеми источниками магнитного поля, представлена на рис 5. Ее максимум составил 0,89 Тл.

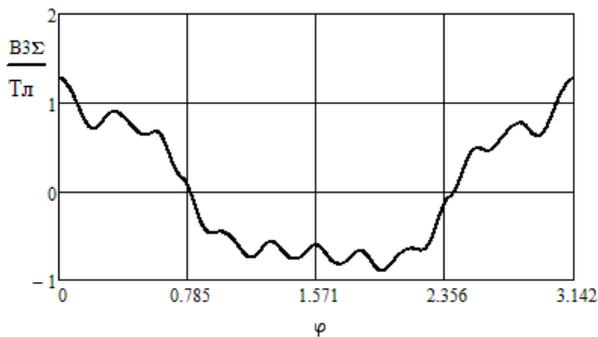


Рис. 5. Результирующая магнитная индукция на середине воздушного зазора (на средней линии кольца 3)

Fig. 5. The resulting magnetic flux density in the middle of the air gap (on the center line of the ring 3)

VI. Выводы

На основе метода разделения переменных Фурье получена двумерная аналитическая модель ВД с ПМ в полярных координатах, в которой магнитные напряжения зубцов статора выступают в качестве источников магнитного поля в дополнение к магнитам ротора и току обмотки статора.

Расчетные значения магнитных индукций в средах (кольцах) рассчитываются с учетом зубчатости статора, гармоник МДС обмотки и геометрической структуры расположения постоянных магнитов.

© Афанасьев А.А., 2021

Поступила в редакцию 16.06.2021

Received 16.06.2021

Библиографический список

- [1] Сеньков А.П., Лавренов С.Н., Макин П.В., Сан Ю. Особенности магнитного поля вентильных электродвигателей с зубцовым шагом обмотки статора // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2016. № 4. С. 79–88.
- [2] Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
- [3] Боголюбов А.Н., Кравцов В.В. Задачи по математической физике. М.: МГУ, 1998. – 350 с.
- [4] Афанасьев А.А. Аналитический расчет магнитоэлектрического вентильного двигателя // Вестник Чувацкого университета. 2020. № 1. С. 26–39.
- [5] Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И., Кузнецов В.А. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
- [6] Афанасьев А.А. Расчет магнитного поля проводника в пазу электрической машины. // Известия Академии Наук СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 4. С. 14–22.
- [7] Сергеев П.С. Электрические машины. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 280 с.

References

- [1] A.P. Senkov, S.N. Lavrenov, P.V. Makin and Yu Tshan, “Parameters of magnet field of permanent magnet motors with tooth pitch of stator winding”, Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies, no. 4, pp. 79-88, 2016.
- [2] A.D. Polyandin, *Spravochnik po linejnym uravneniyam matematicheskoy fiziki [A handbook of linear equations in mathematical physics]*. Moscow: Fizmatlit, 2001 (in Russian).
- [3] A.N. Bogolyubov and V.V. Kravtsov, *Zadachi po matematicheskoy fizike [Tasks for mathematical physics]*. Moscow: MSU, 1998 (in Russian).

- [4] A. Afanasyev, “Analytical calculation of the magnetoelectric valve motor”, *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, no. 1, pp. 26-39, 2020.
- [5] A.V. Ivanov-Smolensky, Yu.V. Abramkin, A.I. Vlasov and V.A. Kuznetsov, *Universal'nyj metod rascheta elektromagnitnyh processov v elektricheskikh mashinah [A universal method for calculating electromagnetic processes in electrical machines]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [6] A.A. Afanasiev, “Raschyot magnitnogo polya provodnika v pazu elektricheskoy mashiny [Calculation of the magnetic field of the conductor in the groove of an electric machine]”, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no 4, pp. 14-22, 1985 (in Russian).
- [7] P.S. Sergeev, *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Moscow – Leningraad: Gosenergoizdat, 1962 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Афанасьев Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Российская Федерация.

Aleksandr A. Afanasiev, D. Sci. (Eng.), professor, professor of the Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation.

ХРОНИКА

ШАКАРЯН ЮРИЙ ГЕВОНДОВИЧ
(23.10.1933 – 28.03.2021)

Юрий Гевондович Шакарян – выдающийся ученый-электротехник, доктор технических наук, профессор, заместитель председателя НТС «НТЦ Россети ФСК ЕЭС», председатель докторского совета при «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» действительный член Академии электротехнических наук РФ, член Международной энергетической академии, заслуженный деятель науки России, заслуженный член СИГРЭ, член редколлегии журналов «Электричество» и «Энергия Единой Сети». Он был руководителем международных проектов по программам ИНТАС и ТАСИС Европейского сообщества.

Автор более 300 научных трудов, в том числе 11 книг и монографий, учебных пособий, около 100 изобретений и патентов, Ю.Г. Шакарян многое

сделал для развития науки. Его монографии «Управляемая машина переменного тока» (1968), «Управляемые электрические генераторы переменной частоты» (1979), «Асинхронизированные синхронные машины» (1984), «Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока» (1986) пользуются широкой и заслуженной популярностью среди специалистов-электроэнергетиков. Юрий Гевондович вел активную педагогическую работу, создал известную научную школу, воспитал не одно поколение ученых-энергетиков, среди них 5 докторов и 22 кандидата технических наук.

Научные и практические работы, выполненные Ю.Г. Шакаряном, во многом значительно опережали мировой уровень исследований в электроэнергетике, его разработки стали фундаментальной основой создания асинхронизированных генераторов, не имевших аналогов в мировой практике и на их основе впервые в мировой практике разработаны, созданы и внедрены электрические машины нового типа - асинхронизированные. Исследования и разработки Ю.Г. Шакаряна стали основой создания под его руководством и при его активном участии не имевших аналогов в мировой практике асинхронизированных генераторов; в частности, двух генераторов мощностью 40 МВт Иовской ГЭС, двух турбогенераторов 200 МВт Бурштынской ГРЭС, серии асинхронизированных турбогенераторов с полностью воздушным охлаждением мощностью 110, 160 и 320 МВт, установленных в ОАО «Мосэнерго» и на других ТЭС страны.

Благодаря Юрию Гевондовичу было разработано новое направление инновационно-технологического развития Единой энергетической системы России по созданию управляемых линий электропередачи, позволяющих существенно повысить их пропускную способность и устойчивость энергосистем. Были проведены исследования по созданию для ГЭС и ГАЭС агрегатов, работающих с переменной частотой вращения, на базе асинхронизированных гидрогенераторов. В последние годы Ю.Г. Шакарян являлся научным руководителем работ по созданию и применению в энергосистемах управляемых систем электропередачи переменного тока (FACTS), устройств и технологий на основе сверхпроводимости, которые обеспечивают принципиально новое качество функционирования Единой энергосистемы России. Под его руководством создан целый ряд принципиально новых устройств FACTS (СТАТКОМ, асинхронизированные компенсаторы и др.). В 1995 г. Юрий Гевондовичу была присуждена премия им П.Н. Яблочкова РАН за цикл работ «Теория, проектирование и моделирование управляемых машинно-вентильных систем».

Много сделано Ю.Г. Шакаряном для подготовки кадров высшей квалификации в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева. Он выступал официальным оппонентом по защита

докторских и кандидатских диссертаций сотрудников электротехнического факультета.

Все, кому пришлось общаться с Юрием Гевондовичем, отмечают его высокий профессионализм ученого, доброту и мудрость наставника, скромность и интеллигентность в общении.

Юрий Гевондович Шакарян скончался 28 марта 2021 г. на 88 году жизни.

Светлая память о выдающемся ученом, мудром учителе, замечательном человеке сохранится в наших сердцах.

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 2

Nizhny Novgorod 2021

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2021. No. 2 (14). – 106 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL TEAM

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
I.A. Lipuzhin (executive editor), V.I. Kazakova (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vitezslav Styskala	Dr. Ing., Ph. D., associate professor VSB – Technical University of Ostrava (Ostrava-Poruba, Czech Republic)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIHE SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

Electronic version of the journal:

<http://www.ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2021

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
G.Ya. Vagin , State and prospects of electric power industry in Russia.....	4
L.A. German, I.P. Karpov , Refined method for calculating short-circuit currents in AC traction network.....	15
M.A. Averbukh, D.A. Prasol , Assessment of influence of higher harmonics on single-phase earth fault currents in 6-10 kV networks with isolated neutral.....	26
T.E. Murtazin, V.G. Titov , Synchronous electric drive with vector control	41
A.S. Pankova, O.A. Pronina, K.E. Chumarin D.S. Ognev , Algorithmization of process of long-term automatic unloading of 6-10(20)/0.4 kV digital substations.....	53
V.S. Chaykin, A.V. Ivanov , IEC 61850: System configuration description language.....	66
POWER ENGINEERING	72
L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov, A.A. Mednov , Frequency converters for induction heating electrotechnological processes.....	72
A.A. Afanasiev , Application of method of separation of variables in the calculation of magnetoelectric brushless DC electric motors.....	83
CHRONICLE	100
Shakaryan Yuri Gevondovich	100

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 29.07.2021. Дата выхода в свет: 14.08.2021

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.