

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тульский государственный университет»

ISSN 2071-6168

*65 лет Победы
в Великой Отечественной войне*



80 лет

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 3

Часть 5

**Издательство ТулГУ
Тула 2010**

ISSN 2071-6168

УДК 62-83

Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч.5., 102 с.

Рассматриваются научно-технические проблемы в области автоматизированного электропривода, теоретические основы электропривода, программные и технические средства технологического применения автоматизированного электропривода в машиностроении, нефтегазовой и оборонной промышленности, энерго- и ресурсосбережение средствами электропривода, вопросы подготовки и переподготовки инженерных и научных кадров по электроприводу.

Настоящий сборник составлен по результатам и докладам конференций: Международная конференция «**Энергосбережение -2010**» Тула, 10-12 марта 2010, Международная конференция «**Автоматизированный электропривод - 2010**», **28 сентября – 1 октября 2010 г.**, г. Тула, **7-я Международная специализированная конференция – «Силовая электроника и энергетика», 28 ноября – 2 декабря 2010 г.**, г. Москва, 5-я международная конференция – семинар молодых ученых и специалистов «**Энергосбережение. Теория и практика**» 18-22 октября, г. Москва.

Материалы предназначены для научных работников, преподавателей вузов, студентов и аспирантов, специализирующихся в данной проблематике технических наук.

Редакционный совет

М.В. ГРЯЗЕВ - председатель, **В.Д. КУХАРЬ** - зам. председателя, **В.В.ПРЕЙС** - главный редактор, **В.А. АЛФЕРОВ**, **И.А. БАТАНИНА**, **О.И. БОРИСКИН**, **В.И.ИВАНОВ**, **В.С. КАРПОВ**, **Р.А. КОВАЛЕВ**, **А.Н. ЧУКОВ**, **Е.А. ФЕДОРОВА**, **А.А. ХАДАРЦЕВ**

Редакционная коллегия

О.И. Борискин (отв. редактор), В.С. Карпов (зам. отв. редактора), Р.А. Ковалев (зам. отв. редактора), А.Н. Чуков (зам. отв. редактора), В.Б. Морозов (отв. секретарь), А.Е. Гвоздев, А.Н. Иноземцев, А.Б. Копылов, Е.А. Макарецкий, Е.П. Поляков, В.В. Прейс, П.Г. Сидоров, В.М. Степанов, А.А.Трещёв, С.С. Яковлев, А.С. Ямников

Подписной индекс 27851

по Объединённому каталогу «Пресса России»

«Известия ТулГУ» входят в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора наук

©Авторы научных статей, 2010

©Издательство ТулГУ, 2010

Содержание

М.Г. Юньков ВСЕСОЮЗНЫЕ (ВСЕРОССИЙСКИЕ) НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОНФЕРЕНЦИИ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ (К 80-ЛЕТИЮ КОНФЕРЕНЦИЙ ПО ЭЛЕКТРОПРИВОДУ)	5
Ю.Н. Сергиевский СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОТ КОНФЕРЕНЦИИ К КОНФЕРЕНЦИИ.....	10
S. Barbanti P. Pelkonen LARGE DRIVES SYSTEMS SOLUTIONS FOR CHALLENGING METALS PLANTS APPLICATIONS	15
В.М. Степанов В.С. Косырихин СРЕДСТВА ГЕНЕРАЦИИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИХ СИСТЕМАХ	21
В.М. Степанов В.С. Косырихин ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИХ.....	25
СИСТЕМАХ И ИХ СНИЖЕНИЕ.....	25
В.М. Степанов В.С. Косырихин ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ	32
В.М. Степанов В.С. Косырихин РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ НА ИХ РАБОТУ	34
В.М. Степанов В.С. Косырихин ВЫБОР ЦЕХОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С УЧЕТОМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ	38
В.М. Степанов В.Ю.Карницкий КАТОДНЫЕ СТАНЦИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПОЧВЕННОЙ КОРРОЗИИ	44
В.М. Степанов В.Ю.Карницкий КОМПАКТНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	49
В.Ю.Карницкий САМОНЕСУЩИЕ ИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА СИП ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ ТИПА ВЛИ И ВЛЗ	52
В.Ю.Карницкий ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ..	56
В.Ю.Карницкий ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	59
В.М. Степанов С.В. Ершов ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ И ЕМКОСТИ КАБЕЛЕЙ	62
С.В. Ершов ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ	

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ.....	65
В.М. Степанов Н.М. Меркулов	
МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУСИЛИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	69
Т.Ю. Чернова Н.А. Фрозинов	
УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ РАСЧЕТЕ МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА	72
Т.Ю. Чернова С.В. Гумилевский	
ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ И МОНИТОРИНГ ПРОФИЛЕЙ МОЩНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	75
В. М. Степанов В. Е. Кулешов	
ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	77
В. М. Степанов С. В. Кузьмина	
УСТРОЙСТВО РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	79
В.М. Степанов Р.В.Рябчиков	
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ В КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОМ СЕКТОРЕ.	81
Ю.Н. Тимонин В.М. Степанов	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО ТЕМПЕРАТУРЕ НАИБОЛЕЕ НАГРЕТОЙ ТОЧКИ ЕГО ОБМОТКИ	83
Ю.Н. Тимонин Ю.И. Горелов	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ.....	86
Ю.Н. Тимонин С.В. Ершов	
ПОТЕРИ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗКАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	89
В.М. Степанов П.А.Борисов	
МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ ПОВРЕЖДЁННЫХ УЧАСТКОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35-500 КВ.....	94
П.А.Борисов	
УСТРОЙСТВА ТРАССИРОВКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35-500 КВ	97
В.Г.Галяткина	
ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ТОКОВ КОРОТКОГО	98
ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ	98
О.А. Кузнецова, С.Н. Абашин, М.А. Лосев	
МОДЕЛЬ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЗВЕНОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА.....	102
О.А. Кузнецова., С.Н. Абашин, М.А. Лосев.....	105
ФАЗОВАЯ ТРАЕКТОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	105

УДК 621.32

М.Г. Юньков, д-р техн. наук, проф., (495) 608-21-60

info@el-privod.ru (Россия, Москва, ОАО «Электропривод»)

ВСЕСОЮЗНЫЕ (ВСЕРОССИЙСКИЕ) НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОНФЕРЕНЦИИ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ (К 80-ЛЕТИЮ КОНФЕРЕНЦИЙ ПО ЭЛЕКТРОПРИВОДУ)

Дан анализ основных решений, сформулированных на конференциях по электроприводу за 80-летнюю историю их проведения результатов их реализации, что свидетельствует о важном значении конференций для развития электропривода как одного из важнейших научно-технических направлений в электротехнике.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, конференция.

Развитие науки и техники невозможно без постоянного творческого обмена мнениями специалистов. Всесоюзные (Всероссийские, международные) научно-технические конференции по электроприводу, проводимые на протяжении 80 лет в СССР и России, явились действенной формой коллективного творчества по обобщению и обмену опытом ученых и инженеров, постановке новых проблем в электроприводе, обсуждению и выработке рекомендаций по наиболее важным научно-техническим и экономическим проблемам, координации перспективных научных исследований и использованию научных достижений в производстве.

Начиная с 20-х годов прошлого века, и по сей день, отечественный электропривод развивался и продолжает развиваться как важнейшее направление электротехнической науки и электротехнического производства. Электротехническая отрасль глубоко научна по своему характеру, масштабна по объему научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ.

Постановка новых проблем в электроприводе, пути их решения, правильная организация работ по их выполнению и т.д. — вопросы, при решении которых нельзя обойтись без коллективного разума научно-технической общественности. Именно поэтому в решении научно-технических и производственных задач в области электропривода Всесоюзные и международные конференции сыграли значительную роль.

Обращаясь к истории проводимых конференций по электроприводу, следует уточнить хронологию их проведения. В 60-е годы отсчет этих конференций велся с послевоенного времени, с заседания научно-технической секции по электроприводу в декабре 1947г. в Ленинграде, проведенной по инициативе и непосредственном руководстве проф. Попова В.К.- выдающегося представителя отечественной электротехнической школы, автора фундаментальных работ по электроприводу. Следует, однако, отдать должное и тем специалистам, которые 80 лет назад организовали действительно первую Всесоюзную конференцию по электромоторным приводам, состоявшуюся в г. Харькове в апреле 1930г.

Проведению первой конференции предшествовало создание в ЛЭТИ С.А. Ринкевичем первой кафедры электропривода. Но главным было, то обстоятельство, что в этот период времени подводились итоги выполнения плана ГОЭЛРО и намечались пути дальнейшей электрификации СССР. Это был период индустриализации страны, и перед научными работниками ставились задачи по развитию технического уровня промышленности. На первой конференции с обстоятельными докладами выступали Попов В.К., Костенко М.П. и др. В докладах ставились задачи повышения эффективности электроприводов за счет широкого применения индивидуального привода, лучшего использования установленных двигателей, применения безредукторного привода и сращивания электродвигателя с исполнительным органом рабочей машины. Ставились задачи правильного выбора двигателей, повышения коэффициента мощности и др.

Так были заложены традиции проведения Всесоюзных конференций. В резолюции первой Всесоюзной конференции записано: «Отмечая всю плодотворность работы настоящего 1-го совещания и расценивая его как первый шаг по объединению всех товарищей, занятых в разнообразных отраслях промышленности, конференция считает необходимым поддержать первое начинание в этом направлении и созывать подобные совещания регулярно как по общим вопросам электромоторного привода, так и по отдельным отраслям промышленности, как например, металлургической, горной, текстильной, машиностроительной и др.»

В последующие предвоенные годы конференции по электроприводу состоялись в г. Харькове (1933г.), Москве (1938г.), Ленинграде (1939г.).

Кроме того, состоялось большое число конференций и совещаний по отдельным частным вопросам электропривода отраслевого направления. Однако, проведение таких конференций и совещаний не носило систематического характера, они не могли выполнять основную задачу определения общих проблем развития электропривода.

Эффективность научно-технических конференций во многом предопределяется их четкой организацией, периодичностью, тщательным формированием программы.

С 1964 г. работу по организации и проведению конференций возглавила кафедра Автоматизированного электропривода Московского энергетического института в тесном сотрудничестве с институтом ВНИИЭЛЕКТРОПРИВОД и другими организациями. Конференции стали проводиться систематически, а их решения определяли основные задачи на период между очередными конференциями. В работе конференций принимали участие представители различных отраслей промышленности, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, высших учебных заведений.

За 80 лет было проведено 20 Всесоюзных (Всероссийских) конференций по электроприводу, данные о которых сведены в табл. 1.

Таблица 1.

Всесоюзные (Всероссийские, международные) конференции по автоматизированному электроприводу

Полное наименование конференции или совещания	Дата и место проведения	Число участников	Число докладов
Первая Всесоюзная конференция по электромоторным приводам	Апрель 1930г. Харьков	282	50
Вторая Всесоюзная конференция по электроприводу	1933г. Харьков	Данных нет	Данных нет
Третья Всесоюзная конференция по электроприводу	1938г. Москва	Данных нет	Данных нет
Четвертая Всесоюзная конференция по электроприводу	1939г. Ленинград	Данных нет	Данных нет
Научно-техническая сессия по электроприводу	1947г. Ленинград	127	70
Совещание по автоматизированному электроприводу переменного тока	1955г. Москва	370	30
Третье Всесоюзное объединенное совещание по автоматизации производственных процессов в машиностроении и автоматизированному электроприводу в промышленности	1959г. Москва	Данных нет	53 (по электроприводу)
IV Всесоюзная конференция по автоматизированному электроприводу	1964г. Ереван	400	230
V Всесоюзная конференция по автоматизированному электроприводу	1968г. Тбилиси	700	412
VI Всесоюзная научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу	1972г. Баку	442	148
VII Всесоюзная научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу	1975г. Таллинн	444	82
VIII Всесоюзная научно-техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода, силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе	1979г. Ташкент	604	238
IX Всесоюзная научно-техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1983г. Алма-Ата	410	158
X Всесоюзная научно-техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1987г. Воронеж	287	130
XI Всесоюзная научно-техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1991г. Суздаль.	289	115
XII Всероссийская (I международная) научно-техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1995г. Санкт-Петербург	300	100
XIII Всероссийская (II международная) научно-техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1998г. Ульяновск	150	124
XIV Всероссийская (III международная) научно-техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	2001г. Нижний Новгород	200	178
XV Всероссийская (IV международная) научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу	2004г. Магнитогорск	300	230

Полное наименование конференции или совещания	Дата и место проведения	Число участников	Число докладов
XVI Всероссийская (V международная) научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу	2007г. Санкт-Петербург	280	202
VI Международная (XVII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу	2010г. Тула		

Большое значение в развитии электротехнической промышленности и формировании научных школ по электроприводу в бывших республиках и промышленно развитых регионах СССР сыграла политика организаторов, в силу которой конференции проводились в различных регионах страны, а в качестве принимающей стороны выступали ведущие учебные заведения. В разные годы такие конференции проходили в Ереване, Тбилиси, Баку, Таллинне, Ташкенте, Алма-Ате, Суздале, Воронеже и др. городах. Сегодня эту почетную обязанность принял на себя один из старейших городов и научно-промышленных центров России - г. Тула.

В настоящее время к участию в конференциях привлекаются и иностранные специалисты. Впервые с международным участием была проведена конференция в 1991 г. Начиная с 1995 г. конференции приобретают статус международных.

Труды конференций пользуются большой популярностью у специалистов. Показательно, что труды V конференции были изданы тиражом 6000 экземпляров, VI 8000 экз., IX 9000 экз., X — 13000 экземпляров. Анализ тематики и основных рекомендаций, сформулированных на конференциях по электроприводу за 80-летнюю историю их проведения и результатов их реализации, наглядно свидетельствуют о важнейшем значении конференций, как для развития промышленности, так и для развития автоматизированного электропривода как самостоятельного научного направления.

Основная тематика некоторых конференций приведена в табл. 2.

Таблица 2. Основная тематика послевоенных конференций по электроприводу

Год проведения	Основные вопросы, рассматривавшиеся на конференции
1947	Теоретические вопросы электроприводов постоянного тока с применением электромашинных усилителей. Энергетика мощных электроприводов. Расширение областей применения индивидуального электропривода
1955	Создание и перспективы развития электроприводов переменного тока. Электроприводы с дроссельным управлением. Применение каскадных схем. Частотно-регулируемый электропривод на базе электромашинных и статических преобразователей. Развитие электроприводов постоянного тока с применением магнитных усилителей
1959	Электроприводы с управляемыми ртутными выпрямителями. Перспективы развития. Методы расчета статических и динамических режимов. Состояние развития электроприводов переменного тока
1964	Теоретические вопросы применения электроприводов постоянного тока с управляемыми тиристорными выпрямителями. Проблемы регулируемого электропривода переменного тока. Задачи комплексной автоматизации

Год проведения	Основные вопросы, рассматривавшиеся на конференции
	технологических процессов
1968	Электроприводы с тиристорными преобразователями. Оптимальные режимы работы электроприводов. Применение систем электропривода в различных отраслях народного хозяйства
1972	Теория и практика электроприводов с подчиненным регулированием координат. Системы дискретного электропривода. Применение управляющих вычислительных машин
1975	Вопросы развития общей теории электропривода. Теория и практическое использование линейных двигателей. Развитие теоретических основ и практики поставок комплектных электроприводов
1979	Принципы оптимизации электроприводов. Адаптивное управление в электроприводе. Новые технические средства. Методы проектирования и рационального использования силовых преобразователей
1983	Научно-технические аспекты повышения эффективности электроприводов. Развитие микропроцессорных средств и их применение в электроприводе
1987	Разработка методов автоматизированного проектирования электроприводов. Создание средств компенсации вредного влияния тиристорных электроприводов на питающую сеть
1991	Применение в системах электроприводов средств силовой преобразовательной техники. Состояние и перспективы развития электроприводов постоянного и переменного тока
1995	Состояние и тенденции развития электроприводов. Развитие следящих электроприводов мощных антенных установок. Перспективы развития преобразователей частоты для частотно регулируемого электропривода на базе новых силовых полупроводниковых приборов
1998	Проблемы электропривода на данном этапе развития. Энергосбережение средствами электропривода в различных технологиях и разработка технических средств для реализации энергосбережения
2001	Состояние и тенденции развития электроприводов. Совершенствование и создание новых моделей электрических двигателей для электроприводов. Развитие силовых полупроводниковых приборов и преобразовательной техники
2004	Применение электропривода в различных отраслях промышленности, в энергетике, на транспорте, в коммунальном хозяйстве и др. Развитие электроприводов и их технических средств (двигателей, преобразователей, микропроцессорных средств)
2007	Проблемы электропривода на данном этапе. Развитие элементной базы электропривода. Микропроцессорные системы управления. Развитие теории автоматического управления и применение новых способов управления в электроприводе
2010	Состояние и тенденции развития электроприводов. Высокоточные системы автоматического регулирования в электроприводе. Энергосбережение средствами электропривода в различных технологиях

И, наконец, следует вспомнить добрым словом тех ученых и крупных специалистов, которые вложили большой труд в организацию и проведение этих конференций. На последних конференциях всегда председателем и активным организатором был д.т.н. проф. Юньков М.Г. Огромный вклад был внесен известными учеными. В их числе: д.т.н. проф. Попов В.К., д.т.н. проф. Чиликин М.Г., д.т.н. проф. Соколов М.М., д.т.н. проф. Башарин А.В., д.т.н. проф. Сабинин Ю.А., д.т.н. проф. Ильинский Н.Ф., д.т.н. проф. Рассудов Л.Н. и др.

Ю.Н. Сергиевский, канд. техн. наук, доц., (495)673-13-48,
sergiyevskyy@mail.ru (Россия, Москва, МЭИ (ТУ)),

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОТ КОНФЕРЕНЦИИ К КОНФЕРЕНЦИИ

В статье описаны основные изменения, происшедшие за последние годы в социальной, технической, научной и образовательной сфере, связанной с электроприводом. По мнению автора, они не приведут к катастрофическим последствиям благодаря богатым традициям и устойчивому развитию сообщества профессионалов - электроприводчиков.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод

История проведения наших конференций по автоматизированному электроприводу, полно и систематизировано отраженная в статье М.Г. Юнькова, свидетельствует о том, что электропривод за 80 лет превратился в самостоятельную устойчиво развивающуюся область техники, науки и знаний, характеризующуюся следующими ключевыми признаками:

- сформировалось сообщество ученых-электроприводчиков, разрабатывающих и совершенствующих специфические для электропривода методы анализа, синтеза и управления электропривода как комплексного объекта;

- по всей территории России сформировались научно-образовательные школы электропривода, базирующиеся на коллективах ученых и преподавателей более 90 кафедр и ведущих научно-исследовательских и проектных институтов;

- комплексные и глубокие знания выпускников кафедр электропривода российских вузов определяют устойчивый, возрастающий спрос на них, многократно превышающий выпуск, со стороны производственных, образовательных, инжиниринговых и коммерческих структур как российских, так и зарубежных, в том числе в развитых странах Европы и Азии;

- регулярно проводятся международные и российские форумы электроприводчиков, к числу которых относятся данная конференция, конференции, организуемые УПИ, МГТУ, ТПУ и другими университетами, проводящаяся раз в 2 года и только что закончившаяся конференция по электротехнике, электромеханике и электротехнологиям в Алуште, а также ежегодный семинар на кафедре автоматизированного электропривода МЭИ.

Прошло 3 года после нашей встречи в данном формате в Санкт-Петербурге. Что изменилось за это время? Мы ведь потому и собираемся с интервалом в 3 года, что это – срок, за который перемены в технике и сознании таковы, что требуют обсуждения, согласования и, может быть, коррекции курса.

Что же произошло за эти 3 года?

Плавно, но качественно меняется кадровый состав.

Ускоренно растут возможности информационной техники и технологий.

Пережит финансово-экономический кризис.

Происходит реформа образования.

Интенсивно растет спрос на выпускников инженерных специальностей.

Если первые два обстоятельства сопровождают нас уже на протяжении нескольких последних лет, то остальные для нас новы. Рассмотрим все их подробнее.

Кадровый состав, информационный и технический прогресс

Если в среднем активный профессиональный стаж принять 40 лет, можно считать, что ушло около 8% представителей школы 70-х годов, а пришло столько же - школы сегодняшней. Как бы мы ни блюли наши традиции, следует признать, что школы меняются, а еще более отличается внешняя (внепрофессиональная) среда формирования личности – приходят люди, родившиеся и воспитанные в новой социально-экономической формации и в новой информационной и технической среде. Причем оба изменения проходят весьма динамично, по крайней мере, гораздо быстрее, чем удастся психологически адекватно их воспринять. Авторитарное мышление, снобизм, тщеславие в целом не характерны для нашего электроприводческого сообщества, поэтому данная проблема, хоть и существенна, но, думаю, решается.

В трудах данной конференции около 15% работ посвящено анализу моделей процессов без ясного указания целей моделирования, без проверки и обсуждения его результатов в конкретной предметной области. Растет соблазн на уже созданных кем-то программных модулях методом проб и ошибок, не тратя практически времени и средств, добиться нужного результата вместо того, чтобы путем изнурительных и дорогостоящих экспериментов, размышлений, обсуждений, корректировок и новых экспериментов открывать истину и воплощать ее в продукции. Растет искушение, «кликнув» мышкой на случайную ссылку, мгновенно добыть информацию в глобальной сети вместо того, чтобы «перелопатить» литературу или переговорить с несколькими специалистами. И беда не только в том, что виртуальные модели могут быть неправильные или неподходящие, а информация в Интернете безгранична, не систематизирована и в большинстве своем представлена дилетантами. Беда в ином: исчезает практика рационального мышления, дискуссий, лень становится думать, делая, говоря и слушая. Традиционные лекции не воспринимаются, толстые учебники не читаются, сущность физических объектов и процессов не познается.

Автор этих строк не собирается «сражаться с мельницами», призывая отказаться от использования компьютеров и ссылок на Интернет-ресурсы, писать проекты от руки, анализировать динамику с помощью ЛАЧХ, чертить листы презентаций на чертежной доске. Нет, все чудеса информационных технологий должны быть освоены, но используются не как замена творческих процессов, а как помощь в рутинных процедурах, всегда сопутствующих

творчеству. Кое-что мы делаем в этом направлении: сокращаем число лекций в пользу практических и лабораторных занятий на современной технике, индивидуализируем расчетные задания и курсовые проекты, большинство выпускных работ выполняется на реальную тематику. Вновь обращаюсь к близким нам фактам. Достаточно взглянуть на состав нашей конференции – около 70% авторов статей – молодые специалисты, аспиранты и студенты, за большинством докладов стоит большой, имеющий ясную практическую направленность, труд молодежи. Две трети из них имеют практическую направленность и доведены до внедрения.

Теоретические	Практические	Разработки	Обзоры
30%	22%	42%	6%

Другая проблема для молодых (и не только!) специалистов - синдром всемогущества современной техники управления. Да, для современных контроллеров не предел 300 млн. операций в секунду, параллельные процессоры, встроенные функции датчикового и бездатчикового векторного управления инвертором, DC/DC преобразователями, цифровыми СИФУ, обеспечение беспроводной связи и т.п. Рынок насыщен всевозможными предложениями «железа» и «софта» как по комплектующим для разработчика, так и по готовым решениям для конечного пользователя. Делу подчас вредит эйфория от универсальных возможностей предлагаемого продукта. Ибо только кажется, что масса денег, вложенная в умеющее «все и вся» решение, принесет ожидаемую отдачу. Но об этом подробнее - ниже. Между тем, после тщательного анализа требований конкретной технологии оказывается достаточным простой продукт, одновременно более дешевый, быстродействующий, малогабаритный и надежный. Труды конференции показывают, что сообщество электроприводчиков такими возможностями обладает, вот только вектору наших усилий надо не дать повернуться по ветру.

Финансово-экономический кризис

Мы пережили финансово-экономический кризис, если считать, что социального у нас в стране нет. Что кризис отнял и дал нам, представителям «большой» техники и прикладной науки? Отнял иллюзии, что финансовые механизмы (будь то государственное финансирование или частное) сами по себе могут обеспечить устойчивость развития науки, техники и экономики. Дал понимание непреходящей ценности инженерного профессионализма – трезвого, точно-практически направленного, практикой востребованного. Дал понимание того, что пока мы из империи олигархов и чиновников не превратимся в империю профессионалов и интеллектуалов, из империи финансов – в империю знаний, Россия не станет вновь великой державой. В этом смысле думаю, что нам на руку здоровый прагматизм молодежи, который надо без брюзжания или эйфории осмыслить, принять и использовать во благо делу.

Как ни кощунственно это звучит, но данный кризис подарил нам и еще кое-что. Резкое падение спроса на рынке высокооплачиваемого труда позволило направить освободившееся время и интеллектуальный потенциал на повышение квалификации. Иллюстрирую данный факт динамикой роста защит кандидатских диссертаций по нашей специальности 05.09.03 за последние 3 года. В 2008г. их всего было защищено 35, в 2009г. – 83, а только за первую половину 2010г. – 51! То есть, к концу 2010 г. можно ожидать четырехкратного прироста за этот период защищаемых кандидатских диссертаций.



Рис.1 Диаграмма защит кандидатских диссертаций за последние годы

Практически все участники рынка: потребители, коммерсанты, производители, а также инвесторы поняли, что надо не столько придумывать что-то новое (это сегодня становится слишком накладно), сколько учиться экономить на том многом, что уже сегодня мы имеем. В наших руках умение разрабатывать, делать и регулировать электропривод – мощнейшее средство экономии электроэнергии, топлива, тепла, воды, материалов, неквалифицированного, но высокооплачиваемого труда.

Реформа образования

Мы переживаем реформу образования, заключающуюся в переходе к двухступенчатому в нашей области знаний и возможном изменении схемы финансирования. Данный переход для нас означает 2 важных обстоятельства.

Первое – уменьшение количества бюджетных и наиболее качественно подготовленных выпускников второй ступени высшего образования. Думаю, свято место пусто не бывает, и рынок будет обеспечен коммерческими магистрами. Но не сразу. Некоторое время понадобится, чтобы четырехлетних бакалавров адаптировать к требованиям работодателя. Кое-что мы для этого постарались сделать – об этом подробнее будет сказано в докладах образовательной (5-й) секции. К примеру, вузовская (вне-федеральная) часть образовательных программ по объему приблизилась к инженерной: то есть, у нас появилась возможность за 4 года готовить «почти» полноценных инженеров. Какие резервы для этого есть? Во времени – точно, ведь не секрет, что большинство студентов со второго-третьего курса уже работают. При доброй воле и участии будущего работодателя,

сумевшего материально обеспечить студента достойной стипендией, при правильной организации учебного процесса, о чем было сказано выше, этот временной резерв мог бы быть эффективно использован.

Имеется и другой резерв – система послевузовской подготовки, которая уже в течение ряда лет успешно функционирует на ряде наших кафедр. Бакалавр, закончивший первую ступень высшего образования, практически без отрыва от производства может направленно совершенствовать свою квалификацию в этой системе по различным предлагаемым кафедрой траекториям.

Второе обстоятельство связано с конкурсом, который необходимо выиграть претенденту на вторую ступень образования. Этот конкурс призван предоставить равные условия студентам данного направления всех вузов, в частности и тех, где не останется бюджетной магистратуры. Таким образом, будут созданы условия для приема на бюджетные места в магистратуре наиболее достойных претендентов.

Спрос на выпускников

Последние несколько лет в нашей стране наблюдается забытая с середины прошлого века картина: растет спрос на выпускников инженерных специальностей, в частности, по направлению «Электроэнергетика и электротехника». В особо благоприятном положении находится профиль (в прежней терминологии - специальность) «Электропривод и автоматика». Например, база заявок со стороны российских организаций на выпускников кафедры автоматизированного электропривода МЭИ на порядок превышает выпуск. Похожая ситуация характерна для большинства из 90 российских выпускающих кафедр этого профиля. Данное обстоятельство можно объяснить тем фактом, что электропривод - комплексная специальность, требующая подготовки в области электромеханики, микро- и силовой электроники. Именно такие специалисты сегодня нужны многочисленным малым и средним предприятиям, которые не могут позволить себе многочисленный штат глубоко, но узко подготовленных сотрудников. Да и в крупных фирмах системные интеграторы – на вес золота.

Интересно, что на рынке труда Европы – схожая ситуация. Ряд университетов Германии, Франции, Финляндии постоянно «атакуют» МЭИ предложениями об организации включенного обучения студентов и стажировок аспирантов и молодых специалистов на их территории. Предлагаются стипендии, второй диплом европейского университета, конечно с последующим трудоустройством там же, на что практически никто из «наших» не идет.

Благоприятная для наших выпускников конъюнктура рынка труда – наша с вами общая и заслуга и удача. Она же позволяет нам удерживать достойный прием при сильнейшем прессинге демографического спада. Она же вселяет в нас уверенность в правильной траектории наших усилий и требует не расслабляться.

УДК 621.313

S. Barbanti, Executive Manager, Desing Motors&drives Dept, +39 0432 518 163, s.barbanti@dca.it (Italy, Buttrio (Ud), Danieli Automation SpA),

P. Pelkonen, (Finland, Helsinki, ABB Oy)

LARGE DRIVES SYSTEMS SOLUTIONS FOR CHALLENGING METALS PLANTS APPLICATIONS

Danieli Automation, a worldwide known system integrator of proven experience in automation for Metal applications process control, is able to provide a wide range of solutions for any large drive system, for the most challenging applications in terms of dynamics, overriding control system automation integration, existing supply networks compatibility and filtering requirements, operation flexibility and limited budget constrains. Beside the various case studies drives systems detailed descriptions and technical features, also the solutions adopted for the complete plant automation architecture and the supply network filtering and compensation are shown, providing reference cases and solutions for the readers.

1. Introduction

As case studies this paper presents the two typical plants scenarios that could be found in the modern steel complexes for the large drive systems :

- New drives systems installations for a Flat product Cold and Hot Mill complex, realized with state of art large Medium Voltage three levels NPC voltage source converters, with Active Line Front-end, in the 6 to 9 MW range.

- New drives systems installation for a long product Rolling Mill, realized with state of art large Low Voltage (0.69 kV) two level voltage source converters, with Fundamental Front- end, up to 3 MW AC drives range.

2. New large drives systems installations for a Flat product Cold and Hot Mill complex

Danieli Automation has supplied turnkey electrical plants for the Flat product Cold and Hot Mill complexes including the complete electrical HV, MV & LV power supplies distribution & filtering systems, the MV & LV Main & auxiliary drives systems, all the AC motors-gear motors of the plants and the complete plant automation & process control ranging from L1 to L3 automation levels. The two plants are completely AC driven plants. The auxiliary drives are 2-level PWM inverters and the main drives are 3-level PWM inverters. The focus here is given to the Main Medium Voltage Large Drives systems. The reversing Cold Rolling Mill (CRM) consists of two rolling stands (6100 kW 300/1100 rpm) and two coilers (2800 kW 500/1500 rpm). All the motors are linked in one drive (ABB ACS 6000) via a common DC bus, enabling multi-drive operation with only one DC bus. The common DC bus system allows motoring and generating power of the coilers flow between the inverters through the DC bus resulting in high efficiency, and the Active Front End line AC/DC PWM converters (ARU) supplying and regulating the common dc bus are providing the best possible

supply network impact, in terms of absorbed reactive power and easiness of filtering requirements, even for the most demanding supply networks standards at point of common coupling point (PCC) (in this case IEC 61800-2), more details are provided afterward.

ABB ACS 6000 is a modular Medium Voltage drive designed for the most demanding single- and multi-drive applications. It is available with several inverter modules (3, 5, 7, 9 and 11 MVA) for induction and synchronous motors. The configuration for CRM is done with 3x9 MVA Active Rectifier Units (ARU) and 11 MVA Inverters (INU) for each Stand and 5 MVA Inverters for each coiler.

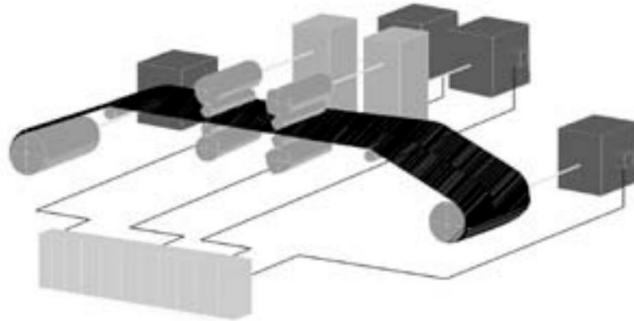


Fig. 1. Two stand Cold Rolling Mill supplied by one common ACS6000 drive.

The Hot Strip Mill (HSM) consists of two Roughing stands (6600 kW 111/170 rpm & 7800 kW 130/300 rpm) and four Finishing Stands (2 x 9500 kW 220/560rpm & 2 x 8500 kW 220/570 rpm). The size of the ARUs and INUs is 2x9 MVA.

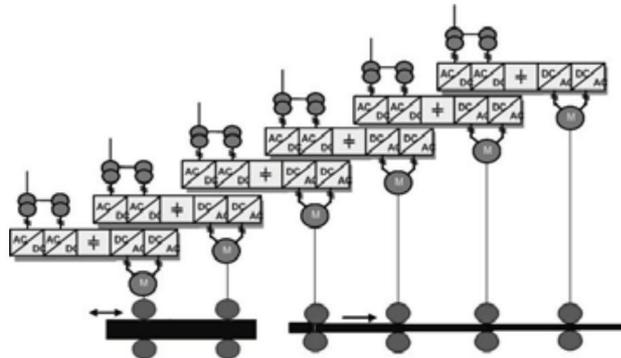


Fig. 2. Each Stand is driven by a Synchronous Machine and ACS6000 drive.

The high performance of the Drives is based on the ABB's Direct Torque Control (DTC) having integrated torque controller and modulator with torque control in every 25 micro second, see [2] for more details.

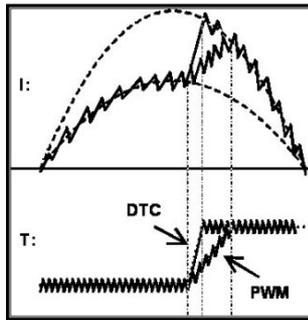


Fig. 3. The performance of the Direct Torque Control (DTC). The limits are today defined by the Motors and Mill mechanics - not by the drive inverters

As already highlighted the drive ACS6000 makes it possible to compensate the Reactive Power and eliminates most of the harmonic voltages towards the network. The primary windings of the drive transformers are connected in series in order to have the same current flow in all transformers.

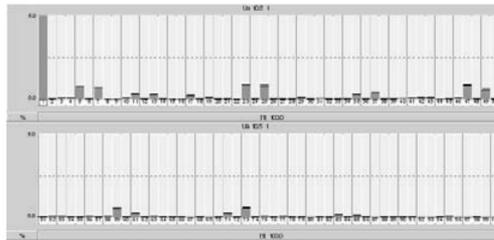


Fig. 4. The amount of harmonics up to 100th (scale 0 to 5%)

The auxiliary equipment (pumps, fans, heaters etc.) of the Drive Equipment is supplied, controlled and monitored by Auxiliary Control Cabinets (ACC). Only one

Low Voltage feeder is needed for each Drive Package, the signals are transferred to/from automation system via field bus.

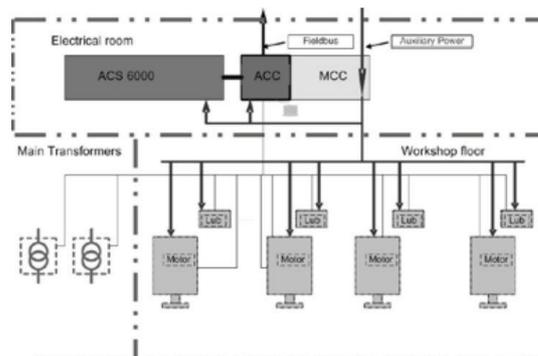


Fig.5 The distribution of the auxiliary power and handling of the signals for the Drive Package

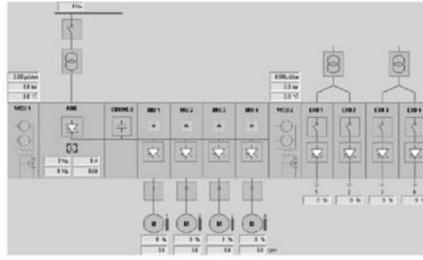


Fig. 6. The main display screen on the door panel of ACC

3. New large drives systems installation for a long product Rolling Mill

In this case also Danieli Automation has supplied as turnkey plant, for the long product Rolling Mill complex, the complete electrical HV, MV & LV power supply distribution & filtering systems, the LV Main and Auxiliary drives systems, all the AC motors-gear motors of the plant and the complete plant automation & process control ranging from L1 to L3 automation levels.

In this case also the plant is a completely AC driven plant. The main drives are low voltage 2- level PWM inverters (0.69 kV), with regenerative Fundamental Frequency Front-end common dc link ac/dc converters, in the 0.250 to 3 MW range.

The focus here is on the Main LV drives arrangement, with emphasis on the used innovative common dc link ac/dc converters topology.

The topology of the used common dc link ac/dc converters is the so called F3E-converter (according to [1]) that consists of a "Fundamental Frequency Front End" or "F3EAIC" (F3E Active Infeed Converter), connected to standard PWM inverters for motors feeding.

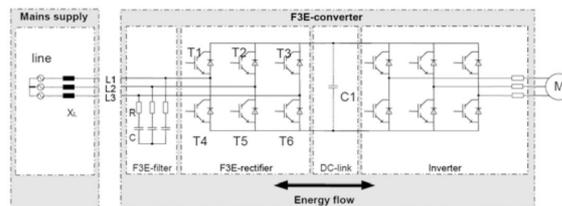


Fig. 7. F3E Converter topology

Compared to the standard PWM inverter topology with diode rectifier ac/dc converter front-end, braking choppers and large dc link smoothing inductors & electrolytic capacitors, two major advantages, energy regeneration to main applicable also in case of troublesome power supply networks (no commutation failures are here possible due to forced commutation), and lower harmonics - no inductors necessary on the dc-link side, must be noted.

From practical experience it has been shown that nearly no additional mains side inductor is necessary - even with weak networks - to protect other equipment, fed by the same supply system, against voltage distortion caused by the F3E-Infeed.

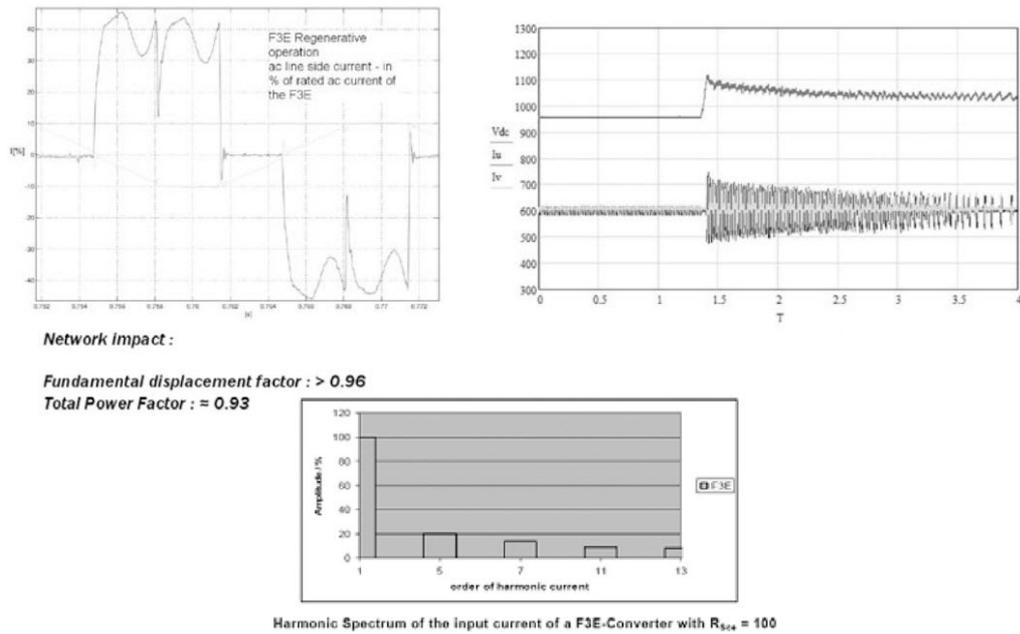


Fig. 8a, b, c F3E Rectifier line side & dc link voltage waveforms during regeneration (a,b), line currents harmonic spectrum, $R_{sc4}=100$ (c)

The F3E converters for the needed dc current range - up to 4500 A dc of continuous current capacity - are presently manufactured only by two major drives manufacturers, as well as by Danieli Automation, see [3] for more details, offering in the latter case the possibility to integrate third party dc/ac inverters from manufacturers that are not able to propose such line converters arrangements, and anyway satisfy specific final Customer requests in terms of inverters vendors.

The reduced total components numbers, the reliability, the easiness of maintenance due to power part construction, and the powerful "D.A. Large Drives" touch screen troubleshooting system tool are also relevant "side" benefits.



Fig. 9. a,b F3E DA cabinet construction details, F3E DA Control Unit OP



Fig.10. a,b "D.A. Large Drives" OP touch-screen troubleshooting system tool overview, screenshots

Conclusions

Beside the two presented case studies, that refer to new plants - where mechanical equipments were manufactured & supplied by Danieli & C. mother company - only marginally explained here due to presented document length constrains, Danieli Automation has also several "running" references also in modernization of existing large dc drives systems for Large various existing Reversible Rolling Mills, with the replacement of the existing old converters or MG sets with state of art digital thyristors bidirectional modular dc drives, designed for mild existing supply network impact together with new compensation & filtering systems, smooth old dc motors commutation, easiness of operation & maintenance, with the already mentioned powerful "D.A. Large Drives" touch screen troubleshooting system tools, and the possibilities to provide also existing dc motors "turnkey" reconditioning services. There is also the possibility of tailor made plant modernizations integrating brand new automation system for process control with existing plant sections, with mixed drives technologies, i.e. new MV & LV AC drives together with revamped DC drives, matching the final Customer budget limitations but without compromises in process control performances and operation flexibility, based on Danieli Automation forty years of experience in process automation, system integration and modernizations for the metal industry plants.

References

1. IEC/Technical Specification 62578 ed.1.0 : "Power electronics systems and equipment - Operation conditions and characteristics of active infeed converter applications" IEC Geneve, 2009-11-25
2. ABB "ACS6000 Technical Catalog", 2009.
3. Danieli Automation "DA LV F3E User Manual" - Technical Datasheet section, 2009.

УДК 622.08.05. 52

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

В.С. Косырихин, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

СРЕДСТВА ГЕНЕРАЦИИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИХ СИСТЕМАХ

Рассматриваются вопросы применения регулирующих устройств реактивной мощности в электропитающих системах

На промышленных предприятиях в настоящее время имеются потребители электроэнергии, большинство которых содержат такие элементы, работа которых основана на использовании магнитного поля. Такие элементы потребляют реактивную мощность (асинхронные электродвигатели, трансформаторы, дроссели, электромагниты переменного тока и т.п.). Потребителями реактивной мощности являются также линии передачи электроэнергии (воздушные и кабельные). Общее потребление реактивной мощности промышленными предприятиями является достаточно большим. Так, например, из всей реактивной мощности, потребляемой приёмниками электроэнергии на промышленных предприятиях и на других аналогичных объектах, около 45 % мощности приходится на силовые трансформаторы, 35 % - на асинхронные машины, 13 % - на электрические сети и всего 7 % - на прочие электроустановки. Потребление реактивной мощности промышленными объектами приблизительно только всего на 30 % может покрываться синхронными генераторами электростанций, работающими на коэффициенте мощности около 85 %, и приблизительно на 12 % - ёмкостью воздушных линий электропередачи энергосистемы. В связи с этим актуальной задачей при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения промышленных объектов является уменьшение потребляемой реактивной мощности. Кроме того, уменьшение потоков реактивной мощности приводит к существенному снижению потерь электроэнергии в системах электроснабжения.

Для решения указанной задачи в настоящее время на промышленных предприятиях имеются две возможности:

- уменьшение реактивной мощности приёмников электроэнергии;
- установка местных источников реактивной мощности.

Магнитный поток электромагнитных устройств и аппаратов переменного тока выражается следующей зависимостью

$$\Phi = \frac{kU}{4fw},$$

где U – приложенное напряжение;

f – частота переменного тока;

w – число витков обмотки;

k – коэффициент, зависящий от схемы и конструктивного исполнения обмотки, от насыщения магнитной цепи и от потерь напряжения в обмотке.

Реактивная мощность пропорциональна квадрату магнитного потока, или, как следует из вышеприведенной зависимости, квадрату приложенного напряжения U или виткового напряжения U/w . Следовательно, для снижения потребляемой реактивной мощности могут использоваться:

снижение приложенного напряжения (например, путём использования полупроводниковых или других регуляторов напряжения);

переключение трёхфазных обмоток, нормально включённых в треугольник, в звезду, что приводит к уменьшению фазного и виткового напряжений в $\sqrt{3}$ раз (применение этого способа возможно, например, в случае асинхронных машин напряжением 380/660 В, подключённых к сети напряжением 380 В);

переход от параллельного соединения секций обмоток на последовательное соединение, в результате чего, например, в случае двух секций секционное и витковое напряжения уменьшаются в два раза;

увеличение числа витков при замене обмоток (во время их ремонта).

Однако в этом случае необходимо учитывать то обстоятельство, что снижение магнитного потока приводит к уменьшению пропорционально квадрату потока развиваемых электромагнитных усилий электроустановки. Так, в случае асинхронных машин вращающий момент уменьшается практически пропорционально квадрату виткового напряжения. В связи с этим обстоятельством такие способы уменьшения реактивной мощности могут использоваться только во время недогрузки электродвигателей или других аналогичных силовых электромагнитных устройств. Например, способ переключения обмоток асинхронной машины с треугольника на звезду можно применять во время нагрузки порядка $1/3$ номинальной. В случае же чередования такой нагрузки с большими нагрузками может использоваться при доказанной технико-экономической целесообразности для этих целей автоматическое переключение. Иногда такое переключение может быть использовано на время холостого хода асинхронного электропривода. Оно может оказаться более рациональным, чем отключение электропривода на время холостого хода (пусковые потери).

Основными потребителями реактивной мощности на промышленных предприятиях в настоящее время являются асинхронные машины. Прежде всего, в первую очередь, необходимо уменьшить их потребляемую реактивную мощность. Первые попытки состояли в разработке соответствующих модификаций двигателей. Предлагались, например, синхронизированные асинхронные двигатели с фазным ротором (подключение ротора к источнику постоянного тока) и компенсированные асинхронные двигатели (с номинальным коэффициентом мощности $\cos \varphi \approx 1$). Оба эти способа приводили к ухудшению КПД и надёжности двигателей. В настоящее время они применяются практически крайне редко. Несколько лучшие результаты даёт питание асинхронной машины через

тиристорный регулятор напряжения, снабжённый микропроцессорным стабилизатором коэффициента мощности и обеспечивающий независимо от нагрузки машины $\cos \varphi \approx 1$. При этом уменьшаются потери электроэнергии в электродвигателе, улучшаются пусковые условия, а также отпадает необходимость во внешних источниках реактивной мощности. Однако в этом случае существенно повышается стоимость электропривода.

Сложность и дороговизна повышения коэффициента мощности асинхронных машин с помощью указанных выше способов предопределили наиболее эффективный путь уменьшения реактивной мощности, потребляемой электродвигателем, а именно: замена асинхронных электродвигателей там, где это возможно по технологическим условиям, на синхронные электродвигатели. Номинальный коэффициент мощности синхронных электродвигателей является опережающим (ёмкостным) и составляет обычно 0,9. Следовательно, синхронный двигатель является не потребителем, а источником реактивной мощности. Поэтому, во всех случаях, когда по электромеханическим условиям выбора электропривода синхронный двигатель равноценен асинхронному, предпочтение следует отдавать синхронному двигателю. Другим крупным потребителем реактивной мощности на промышленных предприятиях в настоящее время являются электросварочные трансформаторные устройства переменного тока, обладающие низким средним коэффициентом мощности (около 0,3). Основными средствами уменьшения реактивной мощности этих устройств считаются следующие:

автоматическое отключение электросварочных трансформаторов на время холостого хода;

применение многопостовых сварочных трансформаторов, что приводит к их более равномерной нагрузке во времени;

переход на сварку постоянным током от трёхфазных сварочных выпрямителей, чем достигается не только уменьшение реактивной мощности и повышение КПД сварочного устройства, но и повышение качества сварного шва.

В электрическом освещении заметного снижения реактивной мощности можно добиться путём перехода от дроссельных пускорегулирующих устройств разрядных ламп на электронные (в частности, на высокочастотные). Однако главными причинами такого перехода являются экономия электроэнергии в светильниках и повышение качества освещения.

В системах электроснабжения промышленных предприятий и установок потери реактивной мощности можно снизить путём уменьшения индуктивных сопротивлений элементов электроснабжения. К этому можно отнести, например:

- применение трансформаторов с малым относительным напряжением КЗ;

- применение кабельных линий для передачи электроэнергии вместо воздушных или шинных;

- уменьшение расстояния между проводами в воздушных линиях электропередачи и между фазами шинопроводов;
- чередование фаз в многополюсных шинопроводах;
- расположение нейтральных проводников в непосредственной близости к фазным (для уменьшения потребления реактивной мощности при несимметричных и однофазных нагрузках).

Эффект снижения реактивной мощности в результате проведения таких «сетевых» мероприятий относительно мал и остаётся обычно в пределах 1 % величины снижения, допускаемого технологическим и электротехническими способами у приёмников электроэнергии. Поэтому типы и способы прокладки линий выбирают не по их минимально возможному реактивному сопротивлению, а по условиям окружающей среды, надёжности, пожаро- и электробезопасности, особенностям эксплуатации, по стойкости к токам КЗ и т.п. Однако, по возможности необходимо учитывать и приведённые выше рекомендации.

Целенаправленное регулирование реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий позволяет воздействовать на уровень напряжения у приёмников электроэнергии и в других необходимых точках электрических сетей. Поэтому при эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий и установок имеют место случаи, когда первостепенный интерес представляет не только простое уменьшение потребления реактивной мощности для снижения потерь электроэнергии в электрических сетях, а её более сложное регулирование для стабилизации напряжения во время недогрузки электрических промышленных сетей. Эта проблема, в частности, учитывается при выборе устройств автоматического управления конденсаторными батареями и другими источниками реактивной мощности.

Литература

1. Проектирование систем внутрицехового электроснабжения промышленных предприятий: Учебн. пособие./В.М. Степанов, В.С. Косырихин, Н.М.Меркулов. Тульский гос. университет. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.- 90 с.
2. Проектирование цеховых трансформаторных подстанций: Учебн. пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин, Н.М.Меркулов. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.- 100 с.
3. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во «Шар», 2002.- 120 с.
4. Потери мощности и их снижение. Учебное пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во «Шар», 2002. - 130 с.

УДК 621.32

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

В.С. Косырихин, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИХ СИСТЕМАХ И ИХ СНИЖЕНИЕ

Рассматриваются вопросы моделирования потерь электроэнергии в системах электроснабжения. Даны мероприятия по их снижению.

Ключевые слова: электроснабжение, потери электроэнергии.

Для уменьшения потерь электроэнергии в промышленном производстве существенное значение имеет регулирование активных нагрузок в системах электроснабжения потребителей электроэнергии. Под регулированием электрических нагрузок понимают комплекс целенаправленных мероприятий по сокращению расхода электроэнергии (по экономии электроэнергии) и по выравниванию графиков нагрузки. В результате этих мероприятий существенно уменьшаются потери электроэнергии в системе электроснабжения промышленного предприятия, и появляется возможность при выборе элементов этой системы уменьшить её стоимость и материалоемкость.

Экономия электроэнергии в промышленном производстве, являющаяся одной из актуальнейших современных задач, можно получить за счёт проведения разнообразных мероприятий, которые условно разделяют на конструкционные, технологические и электротехнические.

Конструкционными называют мероприятия, принимаемые в стадии разработки изделий, выпускаемых промышленностью, а также при их обновлении и усовершенствовании. Они заключаются:

- в уменьшении материалоемкости изделий, что обеспечивает меньшие энергозатраты при их обработке, сборке, транспортировке и т.д.; сюда относятся, в частности, замена массивных деталей тонкостенными, ребристыми, трубчатыми, облегченными, уменьшение габаритных размеров и массы корпуса за счёт более плотного монтажа основных узлов изделия, применение новых, менее материалоемких принципов конструкции;

- в замене металла синтетическими материалами;

- в замене литых деталей штампованными или сварными;

- в применении точного литья или точной твёрдой (холодной или горячей) формовки вместо обработки резанием.

Такие мероприятия относятся к области машиностроительного, аппаратостроительного или другого производственного проектирования. Однако, как показывает опыт развития промышленности, именно в постоянном совершенствовании и обновлении промышленной продукции

кроются наибольшие резервы уменьшения материало- и энергоёмкости изделий.

Технологические мероприятия преследуют цель уменьшить расход электроэнергии путём рациональной организации производственного процесса. К ним относятся:

- использование вторичных энергоресурсов и отходов производства;
- уменьшение непроизводительных потерь энергии путём усиления теплоизоляции, уменьшения трения в механизмах и т.п.;
- уплотнение технологических циклов;
- применение интенсивных технологий (силового и скоростного резания металлов, высокотемпературной термообработки и т.п.);
- формирование механических и тепловых переходных процессов;
- автоматизация технологических процессов в целях обеспечения их оптимального протекания (в частности, применение станков с числовым программным управлением);
- сокращение межоперационных транспортных перемещений и др.

Эти мероприятия разрабатывают технологические службы предприятий. Однако общая возможная экономия электроэнергии от внедрения этих мероприятий может оказаться весьма существенной как для предприятия, так и для отрасли в целом. Поэтому их разработку и внедрение проводят с активным участием энергетических служб промышленных предприятий.

Электрические мероприятия в области электроприводов и электротехнологических установок используют не только в производственных установках, но и в системах электроснабжения (например, в установках собственных нужд электростанций и подстанций). Основными считаются следующие:

- обеспечение оптимальной загрузки электродвигателей, трансформаторов и преобразователей; выбор оптимальных типов преобразователей, обладающих максимальным КПД в требуемой области регулирования, а также замена ими ранее установленных преобразователей других типов; сюда, в частности относят применение тиристорного или транзисторного электропривода вместо системы «генератор-двигатель», замену электромашинных преобразователей частоты полупроводниковыми, замену сварочных трансформаторов и генераторов управляемыми полупроводниковыми выпрямителями;
- отключение электродвигателей и преобразователей на время холостого хода (ХХ);
- замену реостатных пуска и регулирования полупроводниковыми;
- замену малозагруженных двигателей и преобразователей менее мощными;
- применение устройств, основанных на использовании сверхпроводимости.

В электрическом освещении экономию электроэнергии получить можно за счёт:

- применения источников света с высокой световой отдачей (энергоэкономичных люминесцентных ламп, натриевых ламп высокого давления и др.);
- внедрения высокочастотных электронных пускорегулирующих устройств;
- автоматического включения, отключения и регулирования освещения;
- уменьшения потерь света путём регулярной очистки световых приборов и световых проёмов помещений, применения светлой окраски светоотражающих поверхностей помещений и т.п.;
- рационального размещения осветительных приборов.

В системах электроснабжения основным способом сокращения потерь электроэнергии является уменьшение реактивных нагрузок. Потери активной мощности в элементе системы электроснабжения от передачи через него реактивной мощности равны:

$$\Delta P_Q = \frac{Q_2^2}{U_2^2} R = \frac{P_2^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_2}{U_2^2} R, \quad (1)$$

где Q_2 - реактивная мощность элемента системы электроснабжения;

R – активное сопротивление;

U_2 - напряжение.

Относительное уменьшение потерь при снижении реактивной мощности, называемое коэффициентом снижения потерь или экономическим эквивалентом реактивной мощности, определяют как производную

$$k_Q = \frac{d}{dQ_2} \Delta P_Q = \frac{2Q_2}{U_2^2} R = \frac{2P_2 \operatorname{tg} \varphi_2}{U_2^2} R. \quad (2)$$

С учётом выражения для относительной потери напряжения ΔU этот коэффициент представляют в виде

$$k_Q = \frac{2 \Delta U \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \frac{Q_2 X}{P_2 R}} = \frac{2 \Delta U \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \frac{X}{R} \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (3)$$

где X – индуктивное сопротивление.

В реальных системах электроснабжения коэффициент снижения потерь каждой ступени напряжения с учётом потерь в линиях и трансформаторах (генераторах, преобразователях частоты) находят в зависимости от относительных потерь напряжения, отношения реактивных сопротивлений к активным X/R и отношения реактивной мощности к активной $\operatorname{tg} \varphi_2$. Он находится в пределах от 0,02 до 0,05; меньшие значения соответствуют более мощным элементам, у которых активные сопротивления по сравнению с

индуктивными относительно малы, большие значения – к менее мощным элементам (с относительно большими активными сопротивлениями).

В системах электроснабжения реактивная мощность может передаваться от источника до электроприёмника через несколько ступеней трансформации напряжения. В таком случае результирующий коэффициент снижения потерь

$$k_{Q\text{рез}} = \sum_{i=0}^n k_{Q_i}, \quad (4)$$

где k_{Q_i} - коэффициент снижения потерь на i – й ступени трансформации; n – число последовательных трансформаций напряжения.

На рис. 1 приведены примеры передачи реактивной мощности от генераторов электростанций до электроприёмников. Если электроприёмник питается от шин генераторного напряжения (рис. 1,а), то обычно $0,02 \leq k_Q \leq 0,04$; при питании от электростанций энергосистем возможны три или более последовательные трансформации (рис. 1, в) и значение k_Q доходит до 0,15 или даже 0,2. Следовательно, при питании от энергосистем снижение реактивных нагрузок даёт существенную экономию электроэнергии за счёт снижения потерь в системе электроснабжения в целом.

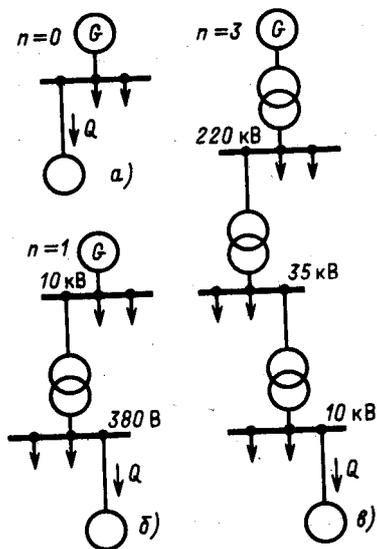


Рис. 1. Примеры передачи реактивной мощности от генераторов местных электростанций (а, б) или электростанций энергосистем (в) до электроприёмников:

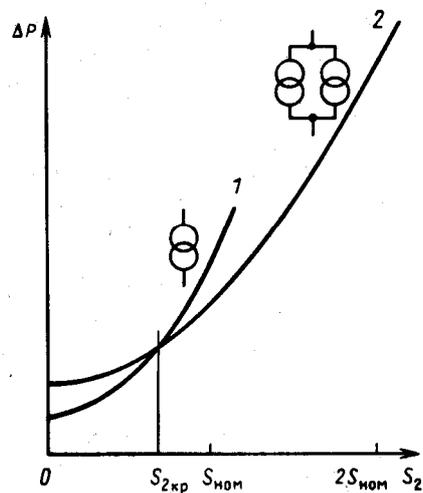


Рис. 2. Потери мощности в трансформаторе (1) и в двух одинаковых параллельно включённых трансформаторах (2), номинальной мощности $S_{ном}$ в зависимости от вторичной нагрузки S_2

Коэффициент снижения потерь, как следует из (2), пропорционален отношению реактивной мощности к активной ($tg\varphi$) и со снижением

реактивной мощности, следовательно, уменьшается. Так как мероприятия по снижению реактивной мощности связаны с определёнными капиталовложениями, не зависящими от $tg\varphi$, то потребление реактивной мощности экономически целесообразно снижать не до нуля, а до некоторого оптимального значения $tg\varphi_{opt}$, зависящего согласно (3) и (4) от суммарных потерь напряжения и соотношений R/X элементов, по которым передаётся реактивная мощность. Обычно это оптимальное значение находится в пределах от 0,15 до 0,25.

Экономия электроэнергии за счёт снижения потерь может достигаться также применением замкнутых электрических сетей и параллельным включением трансформаторов, генераторов и преобразователей; при этом необходимо учитывать также потери ХХ этих элементов, вследствие которых подключение дополнительных параллельных элементов становится целесообразным, начиная с некоторой критической нагрузки $S_{кр}$. На рис. 2 в качестве примера показана зависимость потерь активной мощности в одном и в двух параллельно включённых трансформаторах в зависимости от их нагрузки (соотношения на рис. 2 соответствуют трансформаторам с номинальной мощностью 1000 кВА). Так как потери в одном трансформаторе равны

$$\Delta P_1 = \Delta P_x + \left(\frac{S_2}{S_{ном}} \right)^2 \Delta P_k, \quad (5)$$

где ΔP_x - потери холостого хода;

ΔP_k - потери при короткого замыкания;

$S_{ном}$ - номинальная мощность.

В двух параллельно включённых трансформаторах

$$\Delta P_2 = 2\Delta P_x + \left(\frac{S_2}{S_{ном}} \right)^2 2\Delta P_k, \quad (6)$$

то равенство $\Delta P_1 = \Delta P_2$ имеет место при критической нагрузке

$$S_{кр} = \sqrt{\frac{2\Delta P_x}{\Delta P_k}} S_{ном}. \quad (7)$$

Так, для трансформаторов типа ТМ-1000/35 ($S_{ном} = 1000$ кВА), у которых $\Delta P_x = 2,75$ и $\Delta P_k = 12,2$ кВт, расчёт по (6) даёт $S_{кр} = 670$ кВА.

Формула (6) действительна и для других элементов системы электроснабжения (генераторов, преобразователей, линий и др.).

Для более точного определения критической нагрузки $S_{кр}$ учитывают также потери реактивной мощности. Другими словами, в приведенных

формулах и на рис. 2 вместо потерь активной мощности ΔP учитывают приведённые потери

$$\Delta P + k_Q \Delta Q, \quad (8)$$

где ΔQ - потери реактивной мощности.

Кроме того, необходимо учитывать расходы, связанные с периодическим подключением и отключением части трансформаторов или других агрегатов. Задача, следовательно, сводится к технико-экономическому сравнению режимов работы многотрансформаторных подстанций или других многоагрегатных энергоустановок.

Кроме снижения потребления электроэнергии важным средством уменьшения расчётных электрических нагрузок является также их выравнивание в течение смены, суток или других периодов времени. Сюда можно отнести:

- обеспечение ритмичной и согласованной работы технологического оборудования в течение смены во избежание тем самым больших колебаний суммарной электрической нагрузки;
- более равномерное и полное использование оборудования в течение суток (переход на многосменную работу);
- при одно- и двухсменной работе смещение начала и конца работы, а также обеденных перерывов цехов и участков между собой;
- перевод части электроприёмников на работу во время суточного или сменного минимума нагрузки;
- покрытие суточных пиковых нагрузок местными источниками электроэнергии (за счёт пиковых электростанций или генераторных агрегатов).

Первые три способа осуществляются в рамках организации производственного процесса цеха или предприятия. При их выборе учитывают возможность лучшего использования производственных мощностей, взаимодействующих между цехами и участками, а также социальные факторы.

Электроприёмники, которые переводят на работу во время суточного минимума нагрузки, например, на ночное время, называют электроприёмниками-регуляторами. В качестве таковых обычно выбирают мощные электротехнические производственные или вспомогательные устройства, несущие относительно равномерную нагрузку в течение нескольких (до 10) часов при относительно малой численности или отсутствии обслуживающего персонала, например:

- сталеплавильные или другие электрические печи машиностроительных предприятий;
- теплоаккумулирующие устройства электрического отопления;
- водогрейные устройства с большим запасом воды;

- зарядные агрегаты аккумуляторных электровозов, электрокаров и электромобилей.

Следует отметить, что некоторые из названных электроприёмников находят применение не столько для снижения пиковых нагрузок, сколько для использования дешёвой ночной электроэнергии и обеспечения экономичной нагрузки энергосистем в ночное время (рис.3).

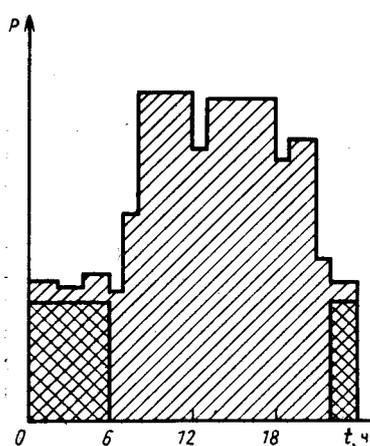


Рис. 3. Заполнение ночного минимума суточного графика активной мощности путём использования электроприёмников-регуляторов

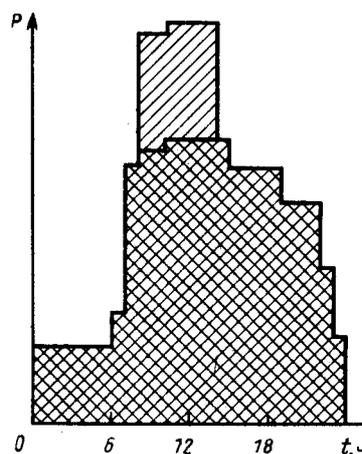


Рис. 4. Снижение максимума суточного график активной мощности при помощи пиковых электростанций или генераторных агрегатов

Снижение суточной максимальной мощности (особенно когда она во времени совпадает с максимумом нагрузки энергосистемы) с помощью местных пиковых электростанций или генераторных агрегатов предприятий (рис.4) оказывается эффективным при остром дефиците мощности в энергосистеме, когда другие меры по снижению нагрузок не используют или же они не дают нужного эффекта.

Литература

1. Потери мощности и их снижение. Учебное пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во «Шар», 2002. - 130 с.
2. Проектирование систем внутрицехового электроснабжения промышленных предприятий: Учебн. пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин, Н.М.Меркулов. Тульский гос. университет. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.- 90 с.
3. Проектирование цеховых трансформаторных подстанций: Учебн. пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин, Н.М.Меркулов. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.- 100 с.
4. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во «Шар», 2002.- 120 с.

УДК 622.08.05.52

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

В.С. Косырихин, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Предложены способы экономии электрической энергии при эксплуатации общепромышленных электроприводов

Ключевые слова: электронасос, переходный процесс электропривод.

Рассмотрим энергетическую эффективность отключения электропривода на время холостого хода. На рис. 1,а представлен график активной нагрузки, создаваемой электроприводом, у которого временные участки загрузки t_z чередуются с участками холостого хода t_x . В общем случае график имеет нерегулярный характер, т.е. значения t_z и t_x от цикла к циклу изменяются. Непроизводительный расход электроэнергии в течение периода $t_z + t_x$ равен:

$$W_x = P_x \cdot t_x, \quad (1)$$

где P_x - средняя мощность холостого хода (ХХ).

При отключении электропривода на время ХХ имеет место график нагрузки, изображённый на рис. 1,б. Потери ХХ значительно сокращены, так как его остаточная длительность t'_x определяется временем отключения коммутационных аппаратов и выдержкой времени для отстройки от кратковременных спадов нагрузки. В то же время при каждом включении требуется дополнительная энергия W_n для пуска электропривода. Экономия электроэнергии достигается в случае

$$W_n + W'_x < W_x, \quad (2)$$

откуда с учётом (1) вытекает, что отключение электропривода на время холостого хода целесообразно при

$$t_x > \frac{W_n}{P_x} + t'_x. \quad (3)$$

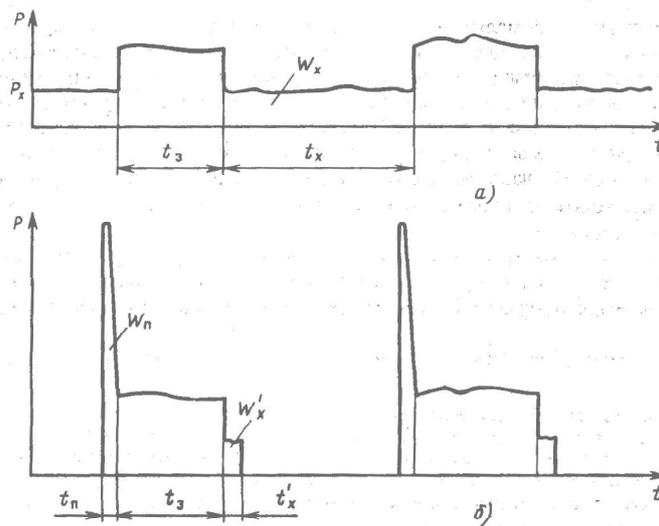


Рис. 1. Экономия электроэнергии при отключении электропривода на время холостого хода (ХХ):

- а – график нагрузки при чередовании загрузки с холостым ходом;
- б – то же при отключении электропривода на время холостого хода

Для повышения точности расчёта учитывают потери электроэнергии в питающей сети как во время ХХ, так и при пуске. Тогда (3) приобретает вид

$$t_x > \frac{W_n + \Delta W_n}{P_x + \Delta P_x} + t'_x, \quad (4)$$

где ΔW_n - потери электроэнергии в питающей сети во время пуска; ΔP_x - средние потери активной мощности в питающей сети во время ХХ электропривода.

В (4) остаются неучтёнными ущерб от колебаний напряжения, вызванных частыми пусками, повышенный износ электрических аппаратов, стоимость дополнительных аппаратов для автоматического отключения при ХХ, а также усложнение обслуживания электропривода. Поэтому в конечном итоге целесообразность отключения электропривода на время холостого хода определяют соответствующим технико-экономическим расчётом.

Литература

1. Потери мощности и их снижение. Учебное пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во «Шар», 2002. - 130 с.
2. Степанов В.М., Косырихин В.С. Системы электроснабжения промышленных предприятий: учеб.-методич. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 368 с.: ил.

УДК 622.08.05.52

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

В.С. Косырихин, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ НА ИХ РАБОТУ

*Предложены способы экономии электрической энергии в электрических системах.
Ключевые слова: Энергосбережение, электроснабжение.*

Качество напряжения в электроэнергетических системах характеризуется его отклонениями, колебаниями, несимметрией и несинусоидальностью формы кривой напряжения. В нормальных режимах работы энергосистемы колебания напряжения обычно проявляются только в местных сетях. Они зависят от режима работы и параметров электроприемников и местных сетей. Остальные параметры напряжения существенно зависят также от режима и параметров районных сетей напряжением 110-750 кВ.

Отклонения напряжения возникают в результате падения напряжения в элементах электрической сети при передаче по ним активной и реактивной мощностей. В зависимости от отклонения напряжения существенно изменяются технико-экономические показатели электроприемников.

Одним из наиболее распространенных типов электроприемников являются асинхронные двигатели. Частота вращения этих двигателей меняется в зависимости от подведенного напряжения. Расчеты показывают, что изменение частоты вращения при изменении напряжения в пределах 0,95... 1,1 номинального может достигать 2,5 %. Такое изменение частоты вращения вызывает изменение производительности механизмов, которые приводятся в движение этими двигателями. Повышение частоты вращения механизма при правильном выборе уровня напряжения может приводить к увеличению количества выпускаемой продукции. Следовательно, в ряде случаев лишь за счет выбора правильного уровня напряжения или незначительных капитальных затрат на установку дополнительных средств регулирования напряжения может быть повышена производительность труда промышленного предприятия.

Уровень напряжения оказывает также влияние на экономичность работы самого асинхронного двигателя. Изменение частоты вращения при работе с различными напряжениями вызывает изменение полезной мощности на валу двигателя и потерь мощности в самом двигателе. Следовательно, в зависимости от режима напряжения возникает перерасход или получается экономия электрической энергии.

От режима напряжения зависит величина потребляемой реактивной мощности, что, в конечном счете, сказывается на коэффициенте мощности

промышленного предприятия. Повышение напряжения в ряде случаев может приводить к снижению коэффициента мощности.

Значительный ущерб промышленным предприятиям наносит сокращение срока службы асинхронных двигателей, работающих с большой нагрузкой и пониженными напряжениями. Расчеты показывают, что наиболее выгодным, с точки зрения увеличения срока службы двигателей, является номинальное напряжение или напряжение выше номинального.

Чувствительны к отклонениям напряжения и другие типы электроприемников. Так, снижение напряжения на 5 % приводит к уменьшению производительности электропечей на 2,4...5,4 %, а при снижении напряжения на 10 % производительность их уменьшается на 9...17,5 %. На сварочных установках при снижении напряжения ухудшается качество сварки. Снижение напряжения на электрооборудовании, участвующем в процессе электролиза алюминия, приводит к повышению удельных расходов на 1 т алюминия и уменьшает производительность электролизных ванн. Так, при снижении напряжения на 5 % производительность электролизных ванн уменьшается на 6,1 %.

Исследования показывают, что повышение напряжения на 1 % вблизи номинального напряжения может приводить к повышению производительности автоматизированной поточной линии на 0,05 %.

В городских и сельских сетях с коммунально-бытовой нагрузкой отклонения напряжения также вызывают изменения технико-экономических показателей электроприемников (сокращение срока службы, перерасход электроэнергии, снижение освещенности и др.).

Отклонения напряжения оказывают влияние не только на показатели электроприемников, но и на показатели работы элементов самой электрической системы. Как известно, полная мощность синхронного генератора определяется током статора и напряжением на его зажимах. При работе генератора с большой активной нагрузкой полная, а, следовательно, и реактивная мощность ограничивается током статора. В этих условиях снижение напряжения будет приводить к уменьшению выдаваемой реактивной мощности генератора.

Другие источники реактивной мощности - батареи конденсаторов - изменяют свою мощность пропорционально квадрату подведенного напряжения U_K

$$Q_K = U_K^2 \omega C,$$

где ω - угловая частота;

C - емкость конденсаторной батареи.

При работе трансформатора в схеме сети нагрузочные потери в нем обратно пропорциональны квадрату напряжения:

$$\Delta P_T = \Delta P_H \left(\frac{U_{ном}}{U} \right)^2 \text{ и } \Delta Q_T = \Delta Q_H \left(\frac{U_{ном}}{U} \right)^2,$$

где ΔP_T и ΔQ_T - соответственно нагрузочные потери активной и реактивной мощностей при передаче определенной мощности при номинальном напряжении $U_{ном}$;

U - напряжение, отличное от номинального, при котором передается та же мощность.

Существенное влияние величина напряжения оказывает на режим линий электропередачи. При повышении напряжения нагрузочные активные потери мощности снижаются, а потери холостого хода, связанные с явлением короны, увеличиваются. Общие потери активной мощности в линии

$$\Delta P_{л} = \Delta P_H \left(\frac{U_{ном}}{U} \right)^2 + \Delta P_K \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^n,$$

где ΔP_K - потери на корону при данном состоянии погоды; n -показатель, характеризующий состояние погоды,

$$0 \leq n \leq 10.$$

Потери на корону могут быть соизмеримы с нагрузочными потерями в линиях напряжением 330 кВ и выше. В линиях напряжением 220-110 кВ преобладающее значение имеют нагрузочные потери.

Режим реактивной мощности линии определяется потерями реактивной мощности и зарядной мощности, обусловленной емкостью линии:

$$\Delta Q_{л} = \Delta Q_{НОМ} \left(\frac{U_{ном}}{U} \right)^2 + Q_b \left(\frac{U}{U_{НОМ}} \right)^n,$$

где $\Delta Q_{л}$ - результирующее значение потерь и генерации реактивной мощности в линии;

$\Delta Q_{НОМ}$ - потери реактивной мощности в линии при номинальном напряжении;

Q_b - зарядная мощность линии при номинальном напряжении.

В замкнутых сетях, содержащих несколько номинальных напряжений, от величины напряжения также зависят потоки мощности. Так, в схеме сети, показанной на рис. 1, изменение ответвления одного из трансформаторов (например, Т2) будет приводить к изменению напряжения в сети 220-110 кВ и перераспределению потоков мощности по линиям 220 и 110 кВ при

неизменных нагрузках подстанций. Это, в свою очередь, вызовет изменение потерь активной и реактивной мощностей.

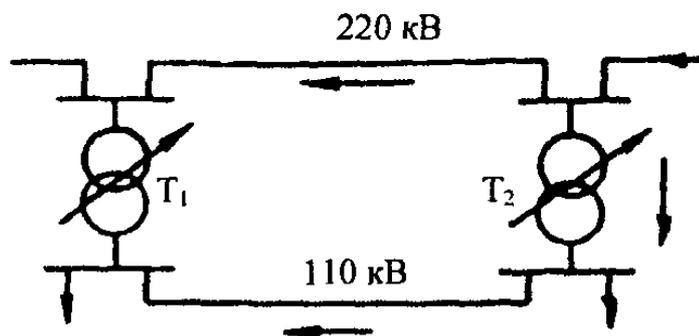


Рис. 1. Схема замкнутой сети двух напряжений

В условиях проектирования и эксплуатации энергосистем невозможно осуществлять контроль качества напряжения у каждого электроприемника. Поэтому при рассмотрении режимов электрических сетей напряжением 750-110 кВ качество напряжения должно обеспечиваться на вторичных шинах подстанций напряжением 750-110/35-6 кВ (в центрах питания распределительных сетей).

Обеспечение рациональных режимов регулирования напряжения на шинах вторичного напряжения подстанций должно осуществляться исходя из условия, что напряжения на элементах электрической сети 35-750 кВ не превышают допустимые по техническим соображениям. Так, для нормальной работы электрической изоляции линий и электрических аппаратов (выключателей, разъединителей и т. д.) допускаются следующие повышения напряжения: при напряжении 35-220 кВ - на 15 % номинального; при 330 кВ - на 10; при 500-750 кВ - на 5 %.

Литература

1. Потери мощности и их снижение. Учебное пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во «Шар», 2002. - 130 с.
2. Степанов В.М., Косырихин В.С. Системы электроснабжения промышленных предприятий: учеб.-методич. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 368 с.: ил.
3. Проектирование систем внутрицехового электроснабжения промышленных предприятий: Учебн. пособие/ В.М. Степанов, В.С. Косырихин, Н.М. Меркулов. Тульский гос. университет. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.- 90 с.
4. Проектирование цеховых трансформаторных подстанций: Учебн. пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин, Н.М. Меркулов. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.- 100 с.

УДК 622.08.05.52

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

В.С. Косырихин, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

ВЫБОР ЦЕХОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С УЧЕТОМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Приведена методика определения оптимальных числа и мощности цеховых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения

Ключевые слова: Энергосбережение, электроснабжение.

Правильное определение числа и мощности цеховых трансформаторов (ЦТ) возможно путем технико-экономических расчетов с учетом следующих факторов:

- 1) категории надежности электроснабжения потребителей;
- 2) компенсации реактивных нагрузок на напряжении до 1 кВ;
- 3) перегрузочной способности трансформаторов в нормальном и аварийном режимах;
- 4) шага стандартных мощностей;
- 5) экономичных режимов трансформаторов в зависимости от графика нагрузки.

В соответствии с ГОСТ 14209—85 и 11677—75 цеховые трансформаторы имеют следующие номинальные мощности: 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500 кВА. В настоящее время цеховые ТП выполняются комплектными (КТП) и во всех случаях, когда этому не препятствуют условия окружающей среды и обслуживания, устанавливаются открыто.

Ориентировочный выбор числа и мощности цеховых трансформаторов производится по удельной плотности σ_n нагрузки

$$\sigma_n = S_p / F, \quad (1.1)$$

где S_p — расчетная нагрузка цеха (корпуса, отделения), кВА; F — площадь цеха (корпуса, отделения), м².

При плотности нагрузки напряжением 380 В до 0,2 кВА/м² целесообразно применять трансформаторы мощностью до 1000 кВА включительно, при плотности 0,2 — 0,3 кВА/м² — мощностью 1600 кВА. При плотности более 0,3 кВА/м² целесообразность применения трансформаторов мощностью 1600 кВА или 2500 кВА должна определяться технико-экономическим расчетом.

В зависимости от исходных данных различают два метода выбора номинальной мощности трансформаторов:

1) по заданному суточному графику нагрузки цеха (корпуса, отделения) за характерные сутки года для нормальных и аварийных режимов;

2) по расчетной мощности для тех же режимов.

Выбор цеховых трансформаторов в первом случае выполняется аналогично выбору трансформаторов ГПП или ПГВ.

Во втором случае выбор мощности трансформаторов производится исходя из рациональной их загрузки в нормальном режиме и с учетом минимально необходимого резервирования в послеаварийном режиме. При этом минимальная мощность трансформаторов $S_{НОМ,Т}$ определяется по средней нагрузке $S_{ср,м}$ за максимально загруженную смену

$$S_{НОМ,т} = S_{ср,м} / (NK_3), \quad (1.2)$$

где N — число трансформаторов; K_3 — коэффициент загрузки трансформатора.

Рациональная загрузка цеховых трансформаторов зависит от категории надежности потребителей электроэнергии, от числа трансформаторов и способа резервирования. Рекомендуется принимать следующие коэффициенты загрузки трансформаторов:

при преобладании нагрузок I категории для двухтрансформаторных ТП $K_3 = 0,65—0,7$;

при преобладании нагрузок II категории для однострансформаторных подстанции в случае взаимного резервирования трансформаторов на низшем напряжении $K_3 = 0,7—0,8$;

при преобладании нагрузок II категории и наличии централизованного (складского) резерва трансформаторов, а также при нагрузках III категории $K_3 = 0,9—0,95$.

В первых двух случаях значения коэффициентов загрузки трансформатором определены из условия взаимного резервирования трансформаторов в аварийном режиме с учетом допустимой перегрузки оставшегося в работе трансформатора.

Принятые к установке силовые трансформаторы должны быть проверены на допустимые систематические перегрузки по условию

$$S_{НОМ,т} \leq S_{ср,м} K_{н.доп,Σ}. \quad (1.3)$$

На двухтрансформаторных подстанциях дополнительно проверяется перегрузка трансформаторов в аварийном режиме с учетом возможного отключения потребителей III категории

$$1,4 S_{НОМ,т} \geq S_{рΣ}. \quad (1.4)$$

При выборе числа и мощности цеховых трансформаторов одновременно должен решаться вопрос об экономически целесообразной величине реактивной мощности, передаваемой через трансформаторы в сеть напряжением до 1 кВ.

Суммарную расчетную мощность конденсаторных батарей низшего напряжения (НБК), устанавливаемых в цеховой сети, определяют расчетами по минимуму приведенных затрат в два этапа:

1) выбирают экономически оптимальное число цеховых трансформаторов;

2) определяют дополнительную мощность НБК в целях оптимального снижения потерь в трансформаторах и в сети напряжением 6 — 10 кВ предприятия.

Суммарная расчетная мощность $Q_{НК}$ НБК составит

$$Q_{НК} = Q_{НК1} + Q_{НК2}, \quad (1.5)$$

где $Q_{НК1}$ и $Q_{НК2}$ — суммарные мощности НБК, определенные на двух указанных этапах расчета.

Реактивная мощность, найденная по (1.5), распределяется между трансформаторами цеха пропорционально их реактивным нагрузкам.

Минимальное число цеховых трансформаторов N_{min} одинаковой мощности $S_{ном,т}$ предназначенных для питания технологически связанных нагрузок, определяется по формуле

$$N_{min} = P_{ср.м} / (K_3 S_{ном,т}) + \Delta N, \quad (1.6)$$

где $P_{ср.м}$ — средняя активная мощность технологически связанных нагрузок за наиболее загруженную смену;

K_3 — рекомендуемый коэффициент загрузки трансформатора;

ΔN — добавка до ближайшего целого числа.

Экономически оптимальное число трансформаторов $N_{онм}$ определяется удельными затратами z^* на передачу реактивной мощности и отличается от N_{min} на величину m

$$N_{онм} = N_{min} + m, \quad (1.7)$$

где m — дополнительно установленные трансформаторы;

$z^* = K_3(z_{НК} - z_{БК}) / z_{mn} = K_3 z_{mn}^*$; $z_{НК}$, $z_{БК}$, z_{mn} — соответственно усредненные приведенные затраты на НБК, батареи конденсаторов напряжением выше 1 кВ (ВБК) и цеховые ТП; $z_{mn}^* = (z_{НК} - z_{БК}) / z_{mn}$.

При трех трансформаторах и менее их мощность выбирают по средней активной мощности за наиболее загруженную смену $P_{ср.м}$

$$S_{ном,т} \geq P_{ср.м} / (K_3 N_{онм}). \quad (1.8)$$

Наибольшую реактивную мощность, которую целесообразно передать через трансформаторы в сеть напряжением до 1 кВ, определяют по формуле

$$Q_{\max, T} = \sqrt{(N_{\text{опт}} K_3 S_{\text{ном}, T})^2 - P_{\text{ср}, м}^2}, \quad (1.9)$$

Суммарная мощность конденсаторных батарей на напряжение до 1 кВ составит

$$Q_{\text{НК1}} = Q_{\text{ср}, м} - Q_{\text{max}, T}, \quad (1.10)$$

где $Q_{\text{ср}, м}$ — суммарная средняя реактивная мощность за наиболее загруженную смену на напряжение до 1 кВ.

Дополнительная суммарная мощность низковольтных батарей конденсаторов (НБК) для данной группы трансформаторов $Q_{\text{н.к2}}$ в целях оптимального снижения потерь [2]:

$$Q_{\text{н.к2}} = Q_{\text{ср}, м} - Q_{\text{н.к1}} - \gamma N_{\text{опт}} S_{\text{ном}, T}, \quad (1.11)$$

где γ — расчетный коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициентов K_1 и K_2 и схемы питания цеховой п/ст: для радиальной схемы по рис. 1.1; для магистральной схемы с двумя трансформаторами — по рис. 1.2; для магистральной схемы с тремя и более трансформаторами $\gamma = K_1/30$; для двухступенчатой схемы питания трансформаторов от РП 10(6) кВ, на которых отсутствуют источники реактивной мощности (ИРМ), $\gamma = K_1(60)$.

Значение K_1 зависит от удельных приведенных затрат на БК напряжением до 1 кВ и выше и стоимости потерь:

$$K_1 = (Z_{\text{н.к.}} - Z_{\text{н.в.}}) / (C_0 10^3), \quad (1.12)$$

где C_0 — расчетная стоимость потерь, руб/кВт, по таблице (только для расчета КРМ); $Z_{\text{н.к.}}, Z_{\text{н.в.}}$ — соответственно усредненные приведенные затраты на НБК, батареи конденсаторов напряжением выше 1 кВ.

При отсутствии достоверных стоимостных показателей для практических расчетов K_1 рекомендуется принимать по табл. 1 [2].

Значение K_2 определяется по формуле:

$$K_2 = l S_T / F, \quad (1.13)$$

где l — длина линии (при магистральной схеме с двумя трансформаторами — длина участка до первого трансформатора), км; F — общее сечение линии, мм².

При отсутствии соответствующих данных допускается значение K_2 принимать по таблице 1.2

Если окажется, что $Q_{\text{н.к.2}} < 0$, то для данной группы трансформаторов реактивная мощность $Q_{\text{н.к.2}}$ — принимается равной нулю.

Таблица 1.1. Значения удельного коэффициента потерь K_1

Объединенная энергосистема	Число рабочих мест	Расчетная стоимость потерь C_0 , руб/кВт	Удельный коэффициент потерь K_1
Центра, Северо-Запада, Юга	1	52	24
	2	106	12
	3	112	11
Средней Волги	1	64	19
	2	93	13
	3	106	12
Урала	1	56	22
	2	91	14
	3	117	11
Северного Кавказа, Закавказья	1	89	14
	2	95	13
Казахстана	1	76	17
	2	80	16
	3	87	14
Сибири	1	85	15
	2	85	15
	3	85	15
Средней Азии	1	64	19
	2	64	19
	3	80	16
Востока	1	136	9
	2	136	9
	3	136	9

Таблица 1.2. Значения коэффициента K_2

Мощность трансформатора $S_T, \text{кВА}$	Коэффициент K_2 при длине питающей линии l , км				
	до 0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	выше 2
2	4	4	7	10	17
2	7	7	10	15	27
2	7	7	10	15	27
3	10	10	17	24	40
5	16	16	26	36	50

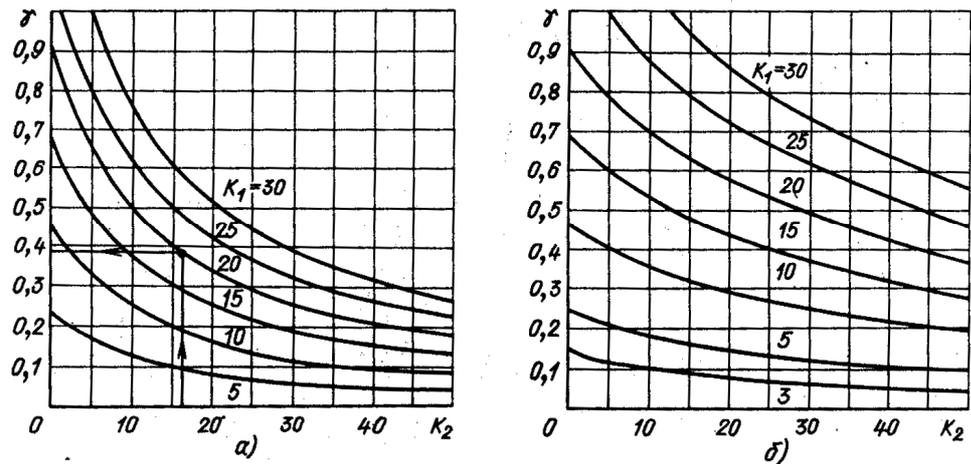


Рис. 1.1. Кривые определения коэффициента γ для радиальной схемы питания трансформаторов: а - $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ; б - $U_{\text{НОМ}} = 10$ кВ.

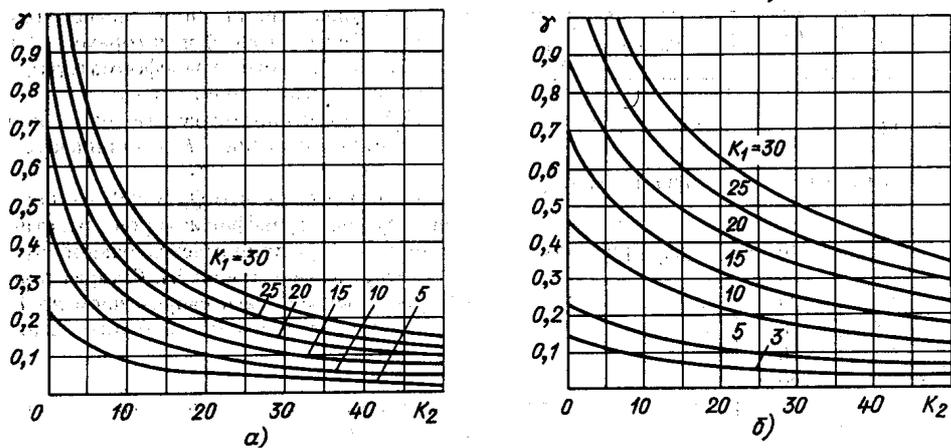


Рис. 1.2. Кривые определения коэффициента γ для магистральной схемы питания трансформаторов: а - $u_{\text{НОМ}} = 6$ кВ; б - $u_{\text{НОМ}} = 10$ кВ.

Литература

1. Степанов В.М., Косырихин В.С. Системы электроснабжения промышленных предприятий: учеб.-методич. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 368 с.: ил.
2. Проектирование систем внутрицехового электроснабжения промышленных предприятий: Учебн. пособие. / В.М. Степанов, В.С. Косырихин, Н.М.Меркулов. Тульский гос. университет. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.- 90 с.
3. Проектирование цеховых трансформаторных подстанций: Учебн. пособие. В.М. Степанов, В.С. Косырихин, Н.М.Меркулов. Тул. гос. университет. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.- 100 с.

УДК 621.232

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

В.Ю. Карницкий, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

КАТОДНЫЕ СТАНЦИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПОЧВЕННОЙ КОРРОЗИИ

В статье проведен анализ существующих катодных станций для защиты от почвенной коррозии и разработана общая концепция СКЗ, оптимальная с точки зрения эксплуатации.

Ключевые слова: Коррозия, катодная станция.

Какие катодные станции нам нужны?

В настоящее время для защиты подземных магистральных газопроводов от почвенной коррозии выпускается большое количество катодных станций. Производятся они различными заводами. Причем, эти заводы сами себе пишут технические задания на проектирование катодных станций и сами же их и выполняют. Опыт эксплуатирующих организаций при проектировании катодных станций остается невостребованным.

Попытаемся, опираясь на опыт эксплуатирующей организации, все-таки написать что-то подобное техническому заданию на проектирование оптимальной катодной станции. Попытаемся расставить приоритеты: что имеет важное значение, что второстепенно, а что просто не нужно.

На сегодняшний день в России прижились две основные схемы автоматической катодной станции. Первая - тиристорный управляемый выпрямитель, работающий на промышленной частоте 50 Гц. Вторая - инверторный выпрямитель. (Неавтоматические катодные станции типа КСС и им подобные с регулировкой выходных параметров путем переключения отводов на многоотводном трансформаторе мы в этой статье рассматривать не будем).

Каждая из этих схем имеют свои достоинства и недостатки. Рассмотрим их более подробно.

Тиристорные управляемые выпрямители

Схема построения тиристорного выпрямителя весьма проста. Рассмотрим данную схему изображенную на рисунке 1.

Входное напряжение 220 В промышленной частоты 50 Гц поступает через входные цепи на силовой трансформатор. После понижения на нем до 48/96 В оно выпрямляется тиристорным или тиристорно-диодным выпрямителем, управляемым по углу отсечки тиристоров блоком управления, и пройдя выходной L- или LC-фильтр, подается на защищаемое сооружение.

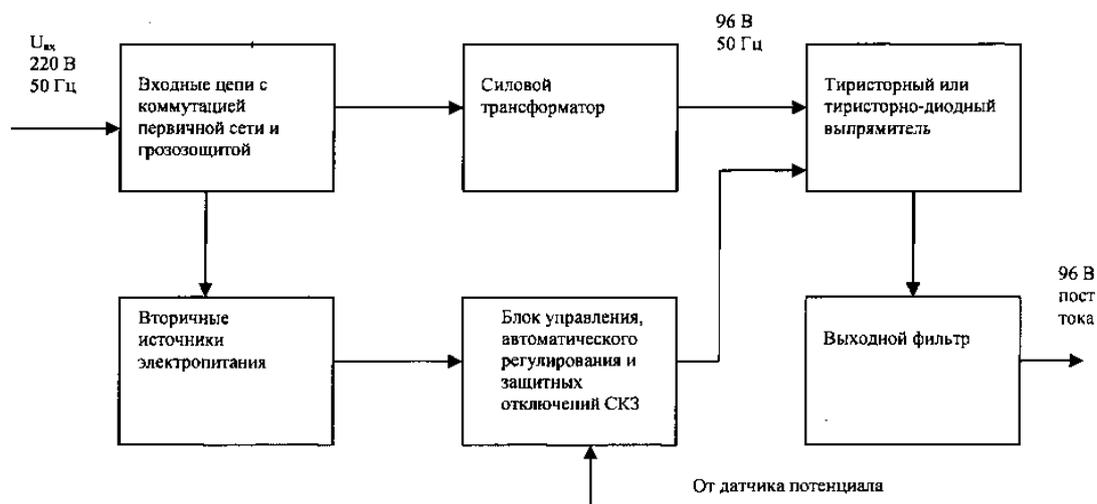


Рис. 1. Схема тиристорного выпрямителя

Достоинствами данной группы выпрямителей является схемотехническая простота, отсутствие опасных для жизни напряжений в блоке управления и силовом выпрямителе.

С ремонтом данных катодных станций способен справиться персонал со средним образованием (то есть практически любой монтер по защите подземных трубопроводов от коррозии).

Самым главным недостатком таких катодных станций является их огромный вес. Вес отдельных моделей превышает 230 кг. При условии, что на одного монтера при переноске оборудования не должен приходиться вес более 35 кг, то для монтажа данных СКЗ необходима бригада не менее чем из 5-7 человек.

Другой серьезный недостаток данных СКЗ - применение аналоговых схем в блоке управления. Данные схемы требуют настройки при замене деталей. Кроме того, с течением времени их параметры уходят от первоначально заданных.

Хотя в целом данный тип СКЗ показал себя достаточно надежным.

Инверторные выпрямители

Другой разновидностью катодных станций являются инверторные выпрямители схема которых изображена на рисунке 2.

Принцип действия инверторных выпрямителей основан на преобразовании выпрямленного напряжения промышленной сети в переменное напряжение высокой частоты (30-120 кГц) с последующим его понижением на высокочастотном трансформаторе и повторном выпрямлении.

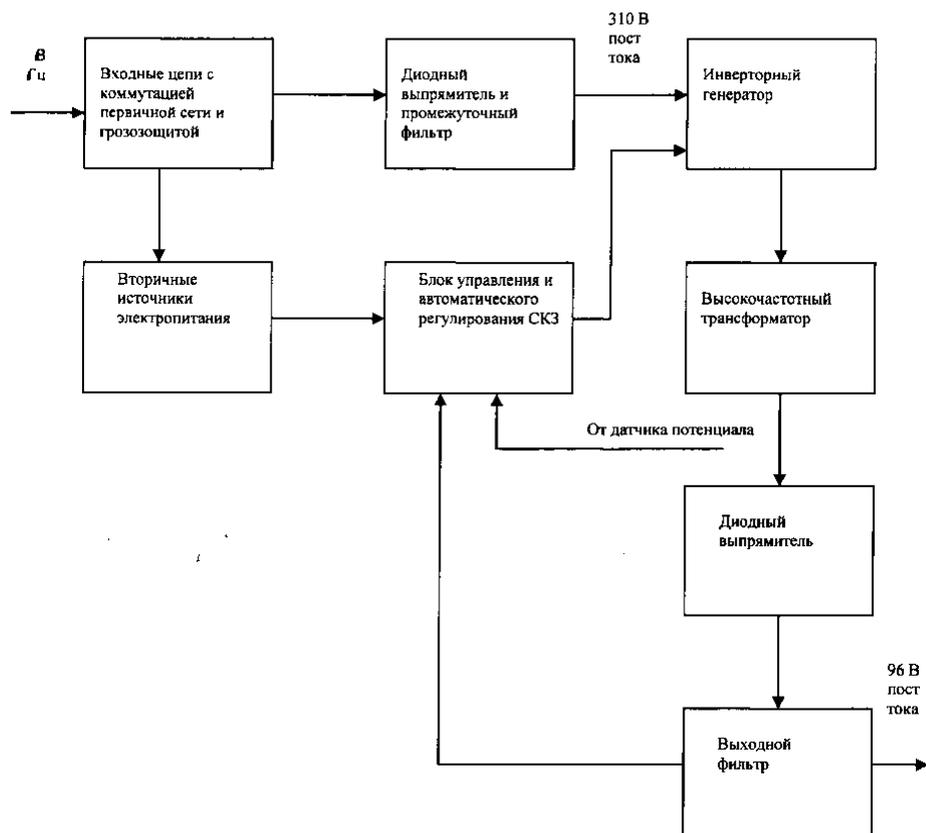


Рис. 2. Схема инверторного выпрямителя

Стабилизация и изменение выходных параметров СКЗ осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Достоинствами данных выпрямителей является их малый вес, обусловленный резким снижением размеров трансформаторов и фильтров (пропорционально третьей степени от рабочей частоты) и высокий КПД в режиме максимальных нагрузок.

Однако, и от недостатков данные выпрямители не свободны.

Прежде всего - это наличие практически во всей схеме напряжений, опасных для жизни человека. Кроме того, существуют трудности с созданием выпрямителей большой мощности и обеспечения приемлемого КПД в режиме частичных нагрузок.

Использование параллельно-последовательной работы группы выпрямителей также имеет серьезный недостаток. При выходе из строя одного из выпрямителей это влечет за собой выход из строя всех остальных.

Схемотехника данных выпрямителей весьма сложна и требует для своего обслуживания и ремонта высококвалифицированных специалистов, имеющих специальное образование. Помимо этого, схемотехника и принцип работы таких выпрямителей таковы, что при выходе из строя одного элемента выходит из строя большое количество элементов, которые с ним связаны.

Требования к выпрямителям

Как мы уже рассматривали выше, ни один из существующих автоматических выпрямителей полностью не удовлетворяет требованиям эксплуатирующих организаций. Попробуем их сформулировать.

1. СКЗ должна иметь массо-габаритные параметры, пригодные для её транспортировки и монтажа бригадой из 2-х монтеров. Максимально допустимый вес не должен превышать 100 кг.

2. В блоке управления СКЗ не должно быть напряжений, опасных для жизни человека. Схемотехника блока управления должна быть достаточно простой и позволяющей выполнять его ремонт персоналу со средним образованием.

3. Выпрямитель должен обеспечивать работу в широком диапазоне питающих напряжений (+50/-50% от номинального).

4. При ремонте блока управления с заменой его элементов и компонентов он должен начинать работать сразу без дополнительных настроек, регулировок и подборок элементов.

5. Выпрямитель должен допускать работу от альтернативных источников электрической энергии (ветрогенераторов, солнечных батарей, термогенераторов) для работы в труднодоступных и удаленных местах, где строительство подводящих ЛЭП экономически нецелесообразно.

6. В случае применения микропроцессоров в блоке управления схемотехника их должна быть построена таким образом, чтобы при его самопроизвольной остановке (так называемом «зависании») СКЗ продолжала работать в режиме, установленном монтерами при её ручной регулировке во время обслуживания.

7. В СКЗ должны применяться элементы, имеющие повышенную стойкость к действию атмосферных перенапряжений помимо специальной защиты входных и выходных цепей

Схемотехника выпрямителя

Как видно из вышеприведенных соображений, ни один из существующих выпрямителей не отвечает в полной мере требованиям эксплуатации. Ни диодно-тиристорная, ни инверторная схемы не могут реализовать эти требования в полной мере.

Однако, существует еще и третья схема построения выпрямителя - импульсная. По своей сути она находится посередине между тиристорно-диодной и инверторной схемами и позволяет реализовать все эксплуатационные требования. Отсутствие на рынке таких катодных выпрямителей до последнего времени объяснялось отсутствием мощных регулирующих элементов. Появление несколько лет назад мощных $ijbt$ -модулей позволяет создать такие катодные станции. Структура такой катодной станции изображена на рисунке 3. Конструктивно катодная станция должна состоять из трех модулей, которые компонуются между собой исходя из стоящей задачи.

Основным является модуль №2. Входным для этого модуля является нестабилизированное напряжение постоянного тока, которое может быть получено либо от внешних источников * (ветрогенератор, солнечная батарея, термогенератор и т.п.), либо от модуля №1.

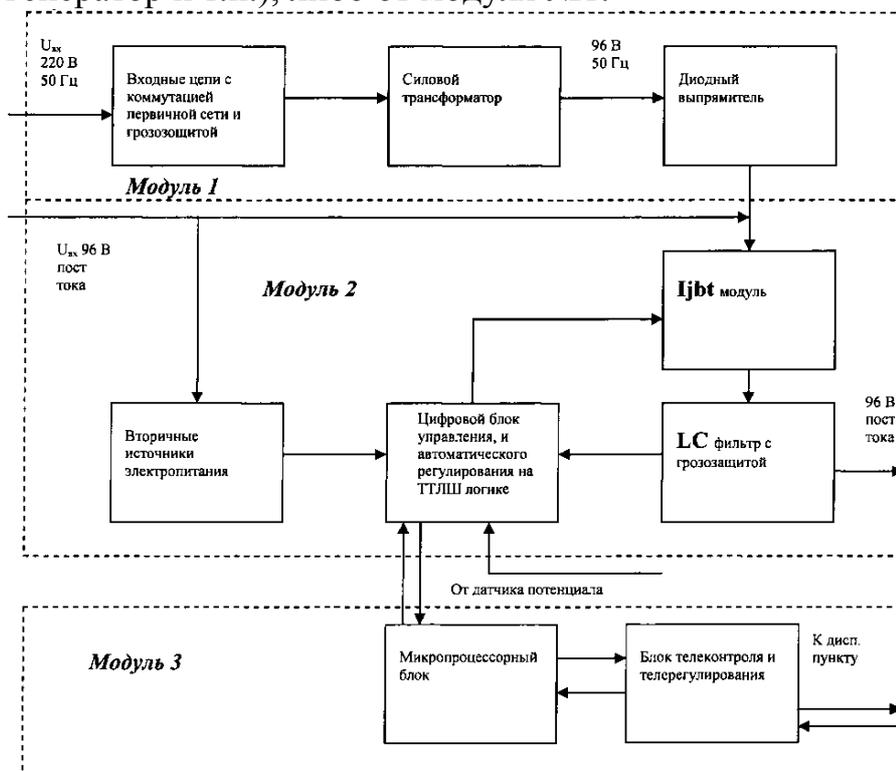


Рис. 3. Схема импульсного выпрямителя

Блок управления IGBT-модуля должен быть построен на цифровых ИС ТТЛШ серий 555 или 1533. Построение блока управления на цифровых ИС позволит упростить его наладку и ремонт по сравнению с аналоговыми схемами. Импульсный ток с выхода IGBT-модуля подается на LC-фильтр и затем на защищаемое сооружение.

Модуль №1 устанавливается в случае питания СКЗ от промышленной сети переменного тока с частотой 50 Гц и имеет конструкцию, аналогичную неавтоматической СКЗ.

Разделение СКЗ на несколько модуле позволяет упростить ее транспортировку и монтаж в сложных трассовых условиях.

Модуль № 3 устанавливается в случае необходимости работы СКЗ в автоматическом режиме, режимах телеконтроля и телеуправления. Помимо СКЗ он может быть подключен к диспетчерскому пункту либо через существующие системы линейной телемеханики, либо через GPRS-модем.

Заключение

В приведенной статье авторы привели общую концепцию СКЗ, оптимальной с точки зрения эксплуатации. Нами сознательно не рассматривался более подробно цифровой блок управления, микропроцессорный блок и блок телеконтроля-телерегулирования.

УДК 621.232

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

В.Ю. Карницкий, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

КОМПАКТНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье рассмотрены компактные воздушные линии и дано их описание.

Ключевые слова: электроснабжение, электропередача.

Компактными воздушными линиями электропередачи называют ВЛ, в которых провода фаз сближены до минимально допустимых расстояний с учетом технических ограничений. К таким ограничениям относятся: сближение проводов в пролете при возможных перемещениях, связанных с «пляской», сбрасыванием гололеда и несинхронными раскачиваниями; расстояния от проводов до заземленных частей опор; междуфазные расстояния с учетом возможных перенапряжений и условий ограничения коронного разряда. Более расширенное понятие компактных ВЛ предполагает, кроме сближения проводов фаз, специальное расположение относительно друг друга проводов расщепленных фаз, а также увеличение их числа в фазе по сравнению с традиционными ВЛ.

Компактную ВЛ можно создать за счет сближения проводов фаз в пролете с помощью стяжек из электроизоляционных материалов (например, стержневых полимерных изоляторов), устанавливаемых в пролетах. При этом расстояния между фазами на опорах не изменяются.

Другой путь создания компактных ВЛ - использование опор «охватывающего» типа, позволяющих располагать провода фаз по одну сторону от стойки опоры (рис. 1). При этом ВЛ могут выполняться с горизонтальным расположением фаз, с приподнятой (рис. 1, а) либо опущенной средней фазой (рис. 1, б). Для сравнения укажем, что на ВЛ традиционных конструкций расстояния между фазами обычно принимаются: при напряжении 330 кВ - 8,4 м; 500 кВ - 12 м; 750 кВ - 13,5... 19,5 м. На опорах «охватывающего» типа при напряжении 330 кВ - 5,5...6,0 м; 500 кВ - 7,5...7,8 м; 750 кВ - 9,0...10,0 м.

Следующая группа компактных ВЛ связана с применением расщепленных фаз нетрадиционной конфигурации (рис. 2). Они характеризуются тем, что расстояния между фазами уменьшены до предельно допустимых значений, а между проводами внутри фазы -

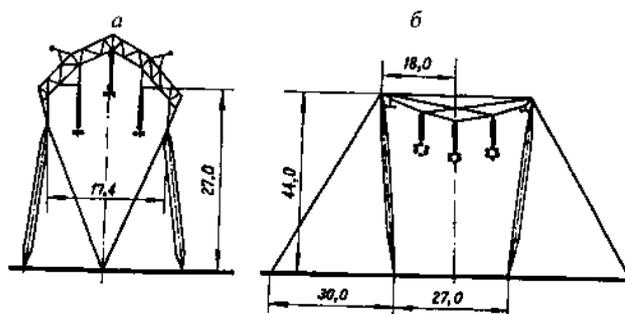


Рис. 1. Варианты опор «охватывающего» типа для компактных линий: а - с арочной траверсой для линии напряжением 500 кВ; б - с вантовой траверсой для линии напряжением 750 кВ

увеличены, причем провода одной и той же фазы расположены определенным образом. Некоторые конструкции предполагают расщепление части фаз на две полуфазы (рис. 2, ж, з).

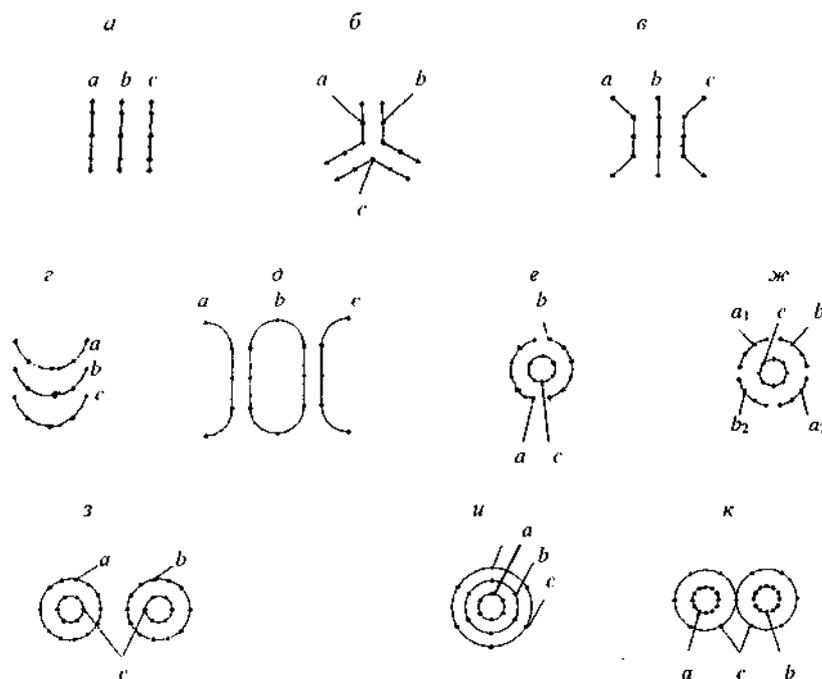


Рис. 2. Расположение проводов расщепленных фаз компактных линий: а, б, в - плоское (б - плоскотреугольное); г - параболическое; д - эллиптическое; е - коаксиальное двухсегментное; ж-коаксиальное четырехсегментное; з, и, к - коаксиальное

К компактным линиям относятся также двух- или многоцепные ВЛ с фазовым сдвигом между двумя системами трехфазных напряжений, приложенных к разным цепям. В них фазы попарно сближаются до минимально допустимых расстояний, по одной от каждой цепи. Варианты взаимного расположения проводов фаз разных цепей показаны на рис. 3, а примеры размещения проводов фаз на опорах - на рис. 4.

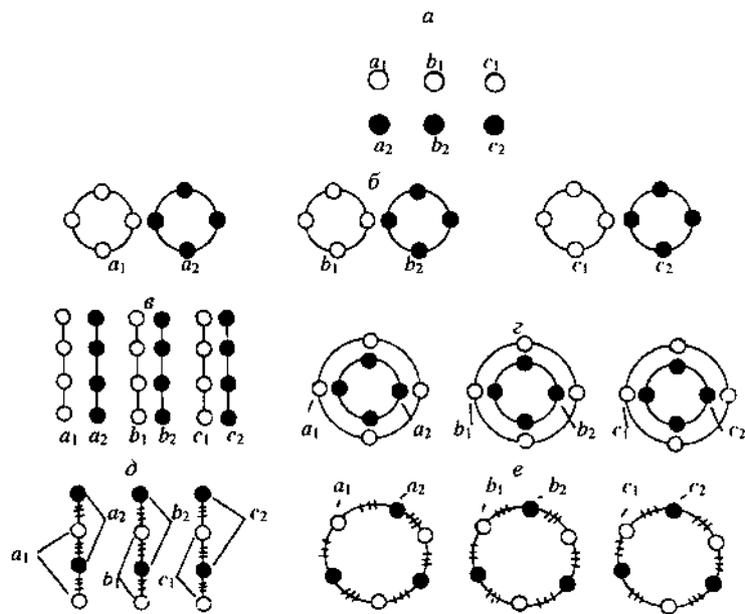


Рис. 3. Схемы расположения проводов фаз линий с фазовым сдвигом: а - с нерасщепленными фазами; б - с расщепленными фазами традиционным способом; в - с расщепленными плоскими фазами; г - с коаксиальными фазами; д - с однорядным расположением проводов в фазе; е - с контурным расположением проводов в фазе

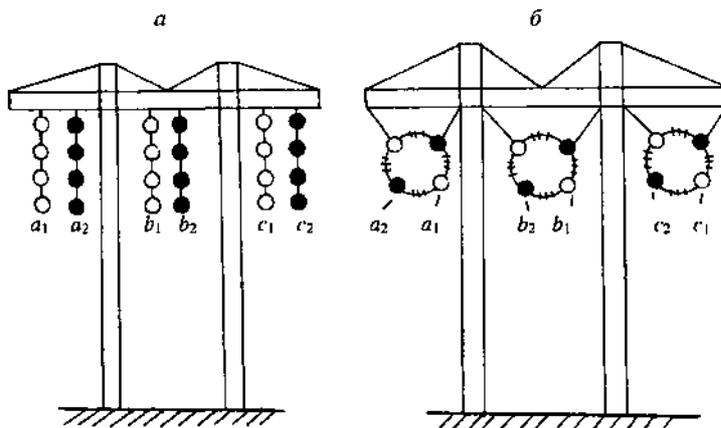


Рис.4. Схематичное расположение проводов на опорах компактных ВЛ:
а - по рис. 3, в;
б - по рис. 3, е

Компактная ВЛ характеризуется уменьшенной, по сравнению с традиционными конструкциями, индуктивностью, повышенной емкостью и, как следствие, сниженным волновым сопротивлением и повышенной натуральной мощностью.

Литература

1. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети. Учебник для вузов / под. редакцией В.Т. Фебина. – Минск: Технопринт, 2004. – 720 с.: ил.

САМОНЕСУЩИЕ ИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА СИП ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ ТИПА ВЛИ И ВЛЗ

В статье приведен обзор самонесущих проводов и рассмотрены их преимущества по сравнению с голыми проводами ВЛ.

Ключевые слова: электроснабжение, электропередача.

Самонесущие провода марок СИП-1 и СИП-2, выпуск которых начат отечественной промышленностью, применяются согласно требованиям ПУЭ для строительства воздушных линий напряжением до 1 кВ. Они рекомендуются к использованию во всех климатических районах при сильных ветрах и гололедах при температуре окружающей среды от -45 до $+50$ °С. Самонесущие изолированные провода могут быть использованы при сооружении воздушных линий с совместной подвеской проводов вещания и телефонных линий. Такими проводами выполняют вводы в жилые дома и производственные постройки, присоединяемые к воздушным электрическим линиям, выполняют выводы НН от трансформаторных подстанций, осуществляют совместную подвеску электрических линий на одних опорах с линиями радиотрансляционной сети и линиями связи, осуществляют вводы в объекты, требующие особой ответственности по созданию условий электробезопасности и пожаробезопасности.

В отличие от традиционных ВЛ здесь фазные провода не голые, а покрыты изоляцией. Толщина изоляции вполне обеспечивает необходимые изоляционные характеристики, позволяющие при напряжении 380 В представлять трехфазную систему проводников в виде единого пучка (рис. 1).

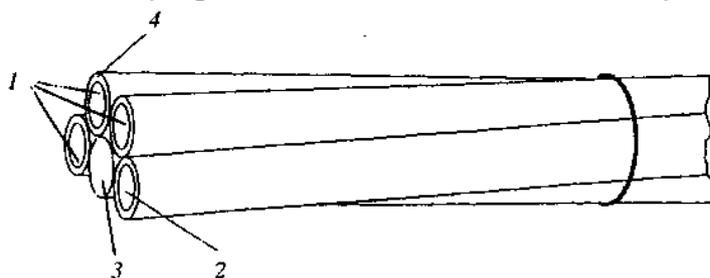


Рис. 1. Конструкция самонесущего изолированного провода на напряжение 380 В:

1 - фазные провода; 2 - провод уличного освещения; 3 - несущий нулевой провод; 4 - изоляция

Самонесущие изолированные провода на 380 В состоят из трех фазных изолированных проводов 1, изолированного провода уличного освещения 2, скрученных вокруг несущего нулевого неизолированного или изолированного провода 3. Проводники фазного и уличного освещения изготавливаются

из обжатых многопроволочных алюминиевых проводов, покрытых светостойким термостабилизированным полиэтиленом 4. В качестве несущего нулевого проводника используется изолированный таким же полимерным покрытием или неизолированный обжатый многопроволочный проводник из упрочненного алюминиевого сплава или сталеалюминиевого провода. Несущий проводник закрепляется на опорах или фасадах зданий без изоляторов с помощью поддерживающих зажимов (рис. 2, а) на промежуточных опорах и посредством натяжных зажимов (рис. 2, б) на концевых и угловых анкерных опорах. При устройстве ответвлений к вводам в здания применяются натяжные зажимы (рис. 2, в). Ответвления от магистрали токоведущих и нулевой жил выполняются плашечным зажимом (рис. 2, г).

Основные преимущества СИП перед традиционными воздушными линиями следующие:

- более высокая надежность линии за счет отсутствия стеклянных или фарфоровых изоляторов, уменьшения обрывов благодаря применению несущего сталеалюминиевого провода;

- практически исключаются короткие замыкания между проводами фаз под действием ветра или качания веток деревьев, а также на землю.

- отсутствие отключений при набросах различных предметов на провода;

- возможность сооружения воздушных линий без вырубки просек;

- возможность применения опор действующих проектов, а на новых линиях электропередачи — опор меньшей высоты;

- уменьшенные по сравнению с обычными линиями габаритные размеры до земли и инженерных сооружений;

- сокращение эксплуатационных расходов путем исключения систематической расчистки трасс, замены поврежденных изоляторов;

- сокращение объемов аварийно-восстановительных работ;

- более высокая надежность электроснабжения в зонах интенсивного гололедообразования;

- безопасность работ вблизи воздушных линий с СИП;

- линии с СИП более экономичны в процессе эксплуатации, так как затрудняют не учитываемый отбор мощности с линии за счет невозможности несанкционированного присоединения нагрузки к ним.

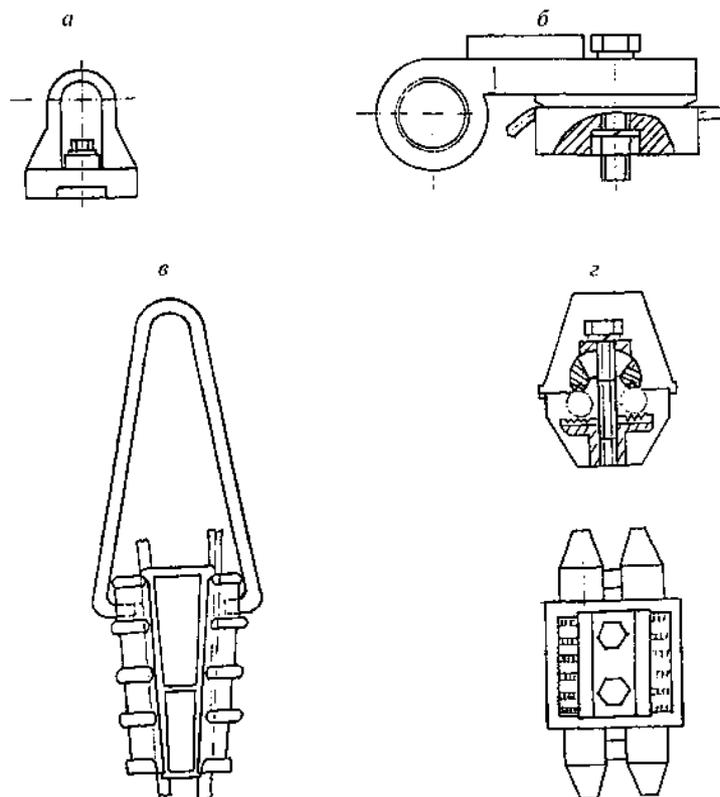


Рис. 2. Арматура воздушных линий с изолированными проводами напряжением 380 В:

а - поддерживающий зажим; б- натяжной зажим; в - натяжной зажим для ввода в здание; г - зажим для ответвления от проводов

Недостатком ВЛ с проводами СИП является их более высокая стоимость относительно линий с голыми проводами.

Для ВЛ 0,38 кВ разработаны следующие типы опор: промежуточная, перекрестная промежуточная, угловая промежуточная, угловая промежуточная с оттяжкой, ответвительная, концевая, анкерная, ответвительная анкерная.

Воздушные линии, выполненные проводами СИП-1 и СИП-2, ПУЭ называют ВЛИ (т.е. воздушные линии с изолированными проводами). Самонесущие провода марки СИП-3 имеют электрическую изоляцию с повышенной пробивной устойчивостью (до 24 кВ), в результате чего эти провода можно использовать на линиях 6-10 кВ. Линии или участки линий напряжением 6-10 кВ, выполненные изолированным проводом типа СИП-3, Правилами устройства электроустановок называются ВЛЗ.

Провода СИП для ВЛИ до 1 кВ разделяют на магистральные и распределительные.

Магистральные СИП состоят из 4 скрученных при изготовлении изолированных проводов: 3 провода — на фазы и 1 провод — нулевой несущий. При необходимости добавляется один или два изолированных алюминиевых провода для освещения общественных мест (сечением 16 или 25 мм²).

Конструкция нулевого провода:

- жила - круглая, скрученная, уплотненная из алюминиевого сплава АВЕ, сечением 54,6 или 70 мм²;
- изоляция - светостабилизированный силаносшиваемый полиэтилен, экструдированный в черный цвет;
- маркировка - цифровая.

Конструкция фазных проводов и проводов уличного освещения:

- жила - алюминиевая, круглая, многопроволочная уплотненная;
- изоляция - сшитый полиэтилен, экструдированный в черный цвет;
- маркировка - цифровая или цветные полосы по всей длине провода.

Распределительные СИП представляют собой 2 или 4 скрученных при изготовлении изолированных алюминиевых провода сечением 16 или 25 мм². Распределительные СИП не содержат несущего провода и могут обслуживать как одного, так и нескольких отдельных потребителей. Также они могут использоваться на коротких участках в качестве магистрали для освещения общественных мест.

Конструкция фазного провода:

- жила - алюминиевая круглая, многопроволочная, уплотненная;
- изоляция - светостабилизированный силаносшиваемый полиэтилен, экструдированный в черный цвет;
- маркировка - цифровая или цветные полосы по всей длине провода.

В ВЛИ напряжением 10 кВ полимерная изоляция провода не рассчитана на длительное приложение напряжения. Поэтому в пролетах линий основной изоляцией между фазами служит воздух, а на опорах провода крепятся через изоляторы, применяемые на традиционных ВЛ. Вместе с тем, полимерная изоляция, выдерживающая кратковременные приложенные напряжения, например при схлестывании проводов, позволяет уменьшить расстояния между фазами ВЛИ.

Для ВЛИ 10 кВ рекомендуется применять уплотненные сталеалюминиевые провода или провода из упрочненного алюминиевого сплава, покрытые слоем модифицированного полиэтилена.

Крепление изолированных проводов на опорах анкерного типа к натяжным гирляндам изоляторов осуществляется с помощью натяжных роликовых зажимов. При этом гирлянды изоляторов рекомендуется собирать из двух подвесных стеклянных изоляторов. На промежуточных опорах провода крепятся на шейках штыревых изоляторов типовой вязкой.

Для ВЛИ 10 кВ предлагаются такие же опоры, как и для традиционных ВЛ, включая и деревянные с улучшенной пропиткой.

Список используемой литературы

1. Бодин А.П., Пятаков Ф.Ю. Электроустановки потребителей: справочник. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2006. – 616 с.: ил.
2. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: справочник. Учеб. пособие. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 480 с.
3. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети. Учебник для вузов / под. редакцией В.Т. Федина. – Минск: Технопринт, 2004. – 720 с.: ил.

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В статье проведен анализ потерь активной мощности и рассмотрены мероприятия позволяющие экономить электроэнергию в кабельных линиях.

Ключевые слова: электроснабжение, электропередача.

В результате проведения анализа потерь активной мощности выясняется, что большая часть потерь приходится на распределительные сети 0,22—10 кВ по сравнению с потерями в сети 35—110 кВ, несмотря на то что в эти сети вкладывается значительно больше цветного металла, чем в сети 35—110 кВ. Результаты анализа приводятся в таблице 1.

После рассмотрения таблицы 1 можно сделать вывод, что наиболее действенными мероприятиями по снижению потерь мощности и электроэнергии являются те, которые снижают эти потери в сетях 0,22—10 кВ.

Таблица 1. Потери активной мощности и расход цветного металла в сетях разных напряжений

Напряжение сетей, кВ	Потери активной мощности, % потребляемой	Расход цветного металла, %
110	25	14
35	10	6
0,22-10	65	80
Всего	100	100

Как известно, потери активной мощности $\Delta P_{л}$ в кабельных линиях равны:

$$\Delta P_{л} = 3I_{л}^2 R_{л}, \quad (1)$$

где $I_{л}$ – ток в линии; $R_{л}$ – сопротивление одной фазы линии.

Ток в линии и ее сопротивление можно выразить

$$\left. \begin{aligned} I_{л} &= \frac{P_{л}}{\sqrt{3}U_{л\text{ном}}\cos\varphi}; \\ R_{л} &= \frac{\rho l_{л}}{S_{л}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $P_{л}$ — мощность нагрузки, кВт; $U_{л\text{ ном}}$ — номинальное напряжение сети, кВ; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности; ρ — удельное сопротивление материала жилы кабеля, Ом*м/мм² (для алюминиевых проводов $\rho_1 = 0,026-0,029$; для медных $\rho_2 = 0,0175-0,018$; для стальных $\rho_3 = 0,01-0,14$); $L_{л}$ — длина линии, км; $S_{л}$ — сечение линии, мм².

На основании (1) и (2) можно записать:

$$\Delta P_{л} = \frac{\rho l P_{л}^2}{S_{л} U_{л\text{ ном}}^2 \cos^2 \varphi}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что экономить электроэнергию в кабельных линиях можно за счет [3]:

- сокращения длины линий, например, от цехового трансформатора до приемника электроэнергии;
- увеличения сечений линий до экономически целесообразных значений, определяемых технико-экономическими расчетами;
- повышения $\cos \varphi$ электроустановок;
- увеличения напряжения сети.

Сокращение длины кабельных линий осуществляется за счет:

- рационального распределения приемников электроэнергии между подстанциями с учетом технологических особенностей производства;
- более глубокого подвода ВН к цехам, где устанавливают понижающие подстанции;
- рационального выбора мест размещения подстанций.

Особенно резко уменьшаются потери активной мощности и энергии при увеличении напряжения, так как эти потери обратно пропорциональны квадрату напряжения (3).

Так, если к цехам подвести напряжение 6(10) кВ вместо 0,38 кВ, то потери снизятся в:

$$\left. \begin{aligned} n_{6/0,38} &= \frac{\Delta P_6}{\Delta P_{0,38}} \equiv \frac{6^2}{0,38^2} = 250 \text{ раз}; \\ n_{10/0,38} &= \frac{\Delta P_{10}}{\Delta P_{0,38}} \equiv \frac{10^2}{0,38^2} = 700 \text{ раз}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Ниже рассмотрены методы расчета ожидаемой экономии энергии.

В соответствии с [2] потери активной мощности в линиях и сетях определяются их технологическими параметрами и током нагрузки, кВт,

$$\Delta P_n = 1,1 \rho l_n^2 \frac{I_n^2}{S_n} 10^{-3}, \quad (5)$$

где 1,1 — коэффициент, учитывающий сопротивление переходных контактов, скрутку жил и способ прокладки линий; n — число фаз линий; l_n — длина линий, м; S_n — сечение провода, мм²; ρ — удельное сопротивление материала провода при 20°C; I_n — среднее значение тока нагрузки, А.

Экономия электроэнергии в сети при переводе ее на более высокое напряжение, кВт·ч,

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 \rho l_c t_p \left(\frac{I_1^2}{s_1} - \frac{I_2^2}{s_2} \right), \quad (6)$$

где l_c — длина участка сети, на котором производится повышение номинального напряжения, м; I_1 и I_2 — средние значения токов в каждом проводе сети соответственно при НН и ВН, А; s_1 и s_2 — сечения проводов сети при НН и ВН, мм² (при проведении мероприятий без замены проводов $s_1 = s_2$); t_p — расчетный период времени, ч.

При проведении реконструкции сетей (замене сечения проводов, их материала, сокращении длины без изменения напряжения) экономия электроэнергии, кВт·ч, составит:

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 I^2 \left(\frac{\rho_1 l_1}{s_1} - \frac{\rho_2 l_2}{s_2} \right) t_p, \quad (7)$$

где I — среднеквадратичное значение тока нагрузки одной фазы, А; l_1 , ρ_1 , s_1 и l_2 , ρ_2 , s_2 — длина, м, удельное сопротивление материала, Ом*мм²/м, сечение, мм², данного участка сети до и после реконструкции соответственно.

Литература

1. Киреева Э.А., Юнес Т., Айюби М. Автоматизация и экономия электроэнергии в системах промышленного электроснабжения: Справочные материалы и примеры расчетов. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 320 с.: ил.
2. Копылов Ю.В. Чуланов Б.А. Экономия электроэнергии в промышленности. — М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1995.

УДК 621.232

В.Ю.Карницкий, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье рассмотрены некоторые эксплуатационные свойства воздушных линий электропередач.

Ключевые слова: электроснабжение, электропередача.

В отличие от генераторов и трансформаторов применительно к линиям электропередачи понятия номинальной мощности нет. Вместо этого вводят понятие пропускной способности, которая характеризует важнейшее эксплуатационное свойство линии. Под пропускной способностью понимают активную мощность, которую можно передать по линии с учетом технических ограничений. Иногда под пропускной способностью подразумевают мощность, которую целесообразно передавать по условию экономичности.

Одним из технических ограничений является предел пропускной способности (предел линии), который для линии без потерь может быть представлен в виде

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_1 U_2}{X} \approx \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_B \sin \alpha l} = \frac{P_{\text{нат}}}{\sin \alpha l}.$$

Отсюда следует, что предел линии пропорционален натуральной мощности. Повышение номинального напряжения позволяет увеличить пропускную способность, ограничиваемую пределом линии, пропорционально квадрату напряжения. При заданном номинальном напряжении увеличения предела линии можно добиться снижением волнового сопротивления, что достигается соответствующим выбором конструктивного исполнения линии (расщепление фаз, применение компактных конструкций и др.).

К другому техническому ограничению относится допустимый ток линии по нагреву проводов, которым характеризуется допустимая мощность

$$P_{\text{дон}} = \sqrt{3UI_{\text{дон}}} \cos \varphi.$$

Отсюда видно, что при неизменном допустимом токе $I_{\text{дон}}$ пропускная способность по условию нагрева проводов может быть увеличена за счет повышения напряжения линии и снижения передаваемой реактивной мощности (повышения $\cos \varphi$). Допустимый ток зависит от материала, сечения

и конструкции проводов линии. Его значение определяется из условия теплового баланса провода в установившемся режиме [1]

$$I_{\text{дон}}^2 R_t + Q_p = (\omega_k + \omega_n) \Delta t,$$

где R_t - сопротивление провода при эксплуатационной температуре, Ом/м; Q_p - теплота, поглощенная проводом от действия солнечной радиации, Вт/м; ω_k , ω_n - коэффициенты теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием, Вт/(м • °С); Δt - перегрев провода относительно окружающего воздуха, °С. На длине 1 м

$$Q_p = 100 \alpha q_p d,$$

где α - коэффициент поглощения, для витых окисленных проводов равный 0,6; q_p - количество теплоты, обусловленное радиацией, составляющее для территории стран СНГ наибольшее значение 0,11 Вт/см²; d - диаметр провода, см.

Теплоотдача лучеиспусканием определяется по уравнению

$$\omega_n = 7,24 \varepsilon d \left(\frac{T_{\text{ср}}}{100} \right)^3,$$

где ε - коэффициент лучеиспускания, равный для проводов 0,6; $T_{\text{ср}}$ - среднее значение между температурой воздуха и провода, К.

Для теплоотдачи конвекцией получены формулы [1]:

а) для поперечных ветров

$$\omega_k = 1,1(vd)^{0,5};$$

б) при ветре вдоль проводов

$$\omega_k = 0,55(vd)^{0,5};$$

в) для штиля

$$\omega_k = 0,16d^{0,75} \Delta t^{0,3},$$

где v - скорость ветра, м/с.

Для сталеалюминиевых проводов может быть допущена температура 120°С, а температура контактов во избежание окисления 70 °С. Если соединения проводов выполнены правильно, то это условие легко обеспечивается, так как переходное сопротивление в месте контакта на 30-40 % ниже сопротивления цельного провода той же длины.

К следующему техническому ограничению относится допустимая потеря напряжения

$$\Delta U_{\text{доп}} \% = \frac{P_{\text{доп}} (R + X \operatorname{tg} \varphi)}{U_{\text{доп}}^2} \cdot 100.$$

Отсюда допустимая к передаче активная мощность по условию потери напряжения

$$P_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{ном}}^2 \Delta U_{\text{доп}} \%}{(R + X \operatorname{tg} \varphi) \cdot 100}.$$

В электрических сетях 220 (110) кВ и выше техническое ограничение пропускной способности наступает обычно по пределу линии, а в сетях 110 кВ и ниже - по условию нагрева, либо по допустимой потере напряжения.

Наряду с пропускной способностью к эксплуатационным свойствам линий электропередачи относят их экологичность, управляемость, живучесть и безопасность обслуживания.

Под управляемостью понимают способность линии к участию в регулировании режимов электрической сети. Для придания свойства управляемости в необходимых случаях линии снабжают специальными сосредоточенными устройствами продольной и поперечной компенсаций, фазорегулирующими устройствами и др.

Живучесть линии характеризуется способностью передавать полную или частичную мощность при возникновении каких-либо повреждений. Так, в двухцепной линии мощность может передаваться при повреждении одной из цепей по оставшейся в работе цепи. В отдельных случаях могут быть реализованы неполнофазные режимы с работой на двух фазах одноцепной линии либо на пяти фазах двухцепной с использованием земли вместо поврежденной фазы.

В протяженных электропередачах живучесть может быть повышена за счет создания промежуточных подстанций (переключательных пунктов), а в распределительных сетях - распределительных пунктов и секционирующих устройств.

К живучести собственно конструктивной части ВЛ можно также отнести способность сохранения работоспособного состояния при грозовых перенапряжениях и чрезвычайных ситуациях (ураган, наводнение и т. п.).

Литература

1. Грудинский П.Г., Приклонский Е.Н. Нормы на экономическую плотность тока / Электричество. 1957. №3.
2. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети. Учебник для вузов / под. редакцией В.Т. Федина. – Минск: Технопринт, 2004. – 720 с.: ил.

УДК 621.322

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,

eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

С.В. Ершов, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,

eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ И ЕМКОСТИ КАБЕЛЕЙ

В статье рассматриваются вопросы определения параметров кабельных сетей.

Ключевые слова: Кабельная сеть, электроснабжение.

Практически любой кабель или провод можно рассматривать как конденсатор, одной обкладкой которого является токопроводящая жила, второй - металлическая оболочка.

Электрическое сопротивление изоляции R (Ом) и емкость C (Ф) такого кабеля равны:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{D}{d}; \quad C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{D}{d}}. \quad (1)$$

Переходя к десятичным логарифмам и выражая емкость в микрофарадах на 1 км длины, а сопротивление изоляции в мегомах на 1 км длины, формулы (1) перепишем в виде:

$$R = 0.366 \cdot 10^{-11} \rho \lg \frac{D}{d}, \text{ МОм} \cdot \text{км};$$

$$C = \frac{0,02413\epsilon}{\lg \frac{D}{d}}, \text{ мкФ} / \text{км}.$$

В конденсаторе с идеальным диэлектриком после заряда конденсатора от источника напряжения постоянного тока ток не проходит.

Таким диэлектриком при напряженностях электрического поля ниже ионизационных является сухой воздух, не содержащий пыли. Твердые и жидкие материалы идеальными диэлектриками не являются.

При приложении напряжения постоянного тока между токопроводящими жилами кабеля проходит ток. Величина этого тока и его изменение по времени в ряде случаев позволяют судить о свойствах и качестве изоляции. При заданном диаметре жилы емкость больше при тонкой изоляции и меньше при толстой, и измерением емкости можно до некоторой степени контролировать толщину изоляции.

При включении конденсатора (кабеля) на напряжение постоянного тока возникающий через защитное сопротивление ток может быть представлен состоящим из трех слагаемых: зарядного тока I_c , тока сквозной проводимости (тока утечки) $I_{ут}$ и тока абсорбции $I_{абс}$. В момент включения напряжения величина зарядного тока I максимальна и обусловлена только напряжением источника и величиной последовательно с кабелем

включенного защитного сопротивления. Величина зарядного тока (А) по времени уменьшается по закону:

$$I_c = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Величина и изменение зарядного тока по времени не характеризуют качество изоляции, а зависят только от постоянных (параметров) цепи. Обычно зарядный ток через несколько секунд после приложения напряжения становится исчезающе малым. Ток сквозной проводимости $I_{ут}$ обусловлен наличием в изоляции свободных ионов и не зависит от длительности воздействия напряжения; он подчиняется закону Ома только при низких напряженностях электрического поля и резко возрастает при повышении температуры. Ток сквозной проводимости характеризует состояние изоляции в особенности в отношении содержания в ней свободных ионов.

Ток абсорбции $I_{абс}$ (рисунок 1) обусловлен процессами поляризации, зависящими от природы диэлектрика и наличия в нем неоднородности.

Измерение сопротивления изоляции является весьма чувствительным методом контроля однородности продукции. При оценке состояния изоляции проложенного кабеля большое значение имеет различие в сопротивлении изоляции отдельных фаз.

Измерение сопротивления изоляции производят после испытания кабеля напряжением. При контрольных испытаниях кабельной продукции сопротивление изоляции определяют после 1 мин приложения напряжения.

Однако измеренное таким образом сопротивление изоляции вследствие явлений поляризации и абсорбции недостаточно характеризует состояние изоляции, поэтому для лабораторных исследований были предложены методы, позволяющие судить о состоянии изоляции не только по ее сопротивлению электрическому току, измеренному при заданной длительности воздействия напряжения, но и по изменению тока во времени, что характеризует абсорбцию.

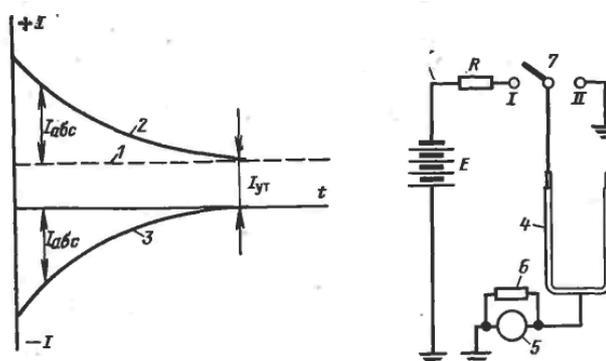


Рис1. Определение кривых заряда и разряда кабеля.

1 — ток утечки (ток сквозной проводимости); 2 — изменение тока заряда по времени, обусловленное абсорбцией и утечкой при включении на постоянное напряжение (переключатель в положении I); 3 — изменение тока разряда предварительно заряженного кабеля, обусловленное абсорбцией (переключатель в положении II); 4 — испытуемый кабель; 5 — гальванометр; 6 — шунт гальванометра; 7 — переключатель.

В зависимости от материала изоляций, температуры и цели испытания (контроль однородности или влажности) применяются следующие методы определения состояния изоляции.

Первый метод. Определяют сопротивление изоляции после 30 и 60 с приложения напряжения. Возрастание сопротивления при увеличении продолжительности воздействия напряжения характеризует состояние изоляции. Чем суше изоляция, тем при прочих равных условиях больше величина $-(R_{60}-R_{30})/R_{30}$.

Второй метод. Определяют сопротивление изоляции после 15 с приложения напряжения R_{15} и сопротивление изоляции, вычисленное по установившемуся току утечки $R_{ут}$. Величина отношения $(R_{ут}-R_{15})/R_{ут}$ характеризует состояние изоляции.

Третий метод. Результаты измерения тока утечки строят в полулогарифмических координатах: по оси ординат откладывают логарифм тока, а по оси абсцисс - время. Полученную кривую раскладывают на ряд прямых (экспонент). Медленно затухающая кривая характерна для увлажненной, слегка нагретой изоляции.

Увеличение срока службы изоляции представляет серьезный резерв для экономии средств, материалов, энергии и трудовых затрат. Большое значение имеет прогнозирование ресурса на стадии эксплуатации. При этом оценке подлежат остаточный ресурс или остаточный срок службы. Индивидуальное прогнозирование ресурса открывает дополнительные пути для получения экономического эффекта. Прогнозирование требует дополнительных расходов на средства технической диагностики, на встроенные и внешние приборы, регистрирующие уровень нагрузок и состояние объекта, на создание микропроцессоров для первичной переработки информации, на разработку математических методов и программного обеспечения, позволяющих получать обоснованные выводы на основе собранной информации.

Литература

1. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 336 с.
2. Фабрикант В.П. О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты. – Электричество, 1965, №9, с. 36-40.
3. Смирнов Э.П. Влияние профилактического контроля на результирующую надежность релейной защиты – Электричество, 1965, №4, с. 11-15.
4. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. - М.: Сов. радио, 1975.- 472 с.
5. Надежность систем электроснабжения / Зорин В.В., Тисленко В.В., Клеппель Ф., Адлер Г. – К.: Выща шк. Головное из-во, 1984. - 192 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ

В статье предложен метод расчета надежности распределительных сетей систем электроснабжения на основе их требуемого технического уровня. Введен показатель, характеризующий технический уровень распределительных сетей - коэффициент технического уровня, приведены зависимости, позволяющие рассчитать основные показатели надежности на основе требуемого технического уровня. Предложено определять параметры сети электроснабжения из условий реализуемости конструкционной и функциональной составляющих надежности, исходя из требуемого её значения, определенного на основе технического уровня системы.

Ключевые слова: Электроснабжение, кабельная сеть.

В современных системах электроснабжения населенных пунктов нашли применение кабельные сети на 6-10 кВ.

Определение требуемого уровня надежности основано на техническом уровне разрабатываемых систем электроснабжения. Новый технический уровень оборудования определяется коэффициентом технического уровня K_y . Коэффициент K_y рассчитывается по зависимостям, обеспечивающим равенство $K_y = a$ – показателю, характеризующему уровень прогрессивности технологии за счет повышения надежности применяемого оборудования и изменяющемуся от 0,5 и выше.

Требуемый уровень эксплуатационной надежности системы электроснабжения определяет в этом случае вероятность отказа соответствующую требуемому техническому уровню.

$$q_n = \frac{q_c}{K_y}, \quad (1)$$

где q_c и q_n – вероятность отказа соответственно системы электроснабжения существующего (с) и (н) технического уровня.

Расчет уровня показателей надежности системы электроснабжения ведется, исходя из экспоненциальной модели отказов и восстановлений, по следующим зависимостям.

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - q_n(t), \quad (2)$$

Требуемое время безотказной работы

$$t_n = \frac{q_n}{\lambda_n}, \quad (3)$$

где λ_n и λ_c – допустимая интенсивность отказов

Проектирование кабельной сети должно производиться исходя из минимальных общих затрат по следующей схеме:

1. Определяется стоимость сети C_c .

Себестоимость сети равна

$$C_c = k_c C_m.$$

где k_c - коэффициент, определяющий отношение себестоимости сети к стоимости материалов;

C_m - стоимость материалов.

Стоимость сети должна быть больше его себестоимости

$$C_d = C_m \left(1 + \frac{k\%}{100}\right)t,$$

где $k\%$ - возрастание первоначальных единовременных затрат за год;
 t - время в годах.

Определяется стоимость потерь электроэнергии

$$C_э = C_a + C_p,$$

где C_a - стоимость потерь активной энергии;

C_p - стоимость потерь реактивной энергии.

3. Определяется стоимость потерь на ремонты и простои C_n , связанные с надежностью электрической сети.

$$C_n = C_{рем} + C_{пр}, \quad (4)$$

где $C_{рем}$ - суммарные затраты на ремонт, связанные с отказами; $C_{пр}$ - суммарные затраты на простои, связанные с отказами.

4. Определяются общие затраты на систему электроснабжению

$$C = C_d + C_э + C_n. \quad (5)$$

При использовании описанной методики могут возникнуть некоторые трудности, связанные с отсутствием количественных показателей надежности электрической сети. Однако эти трудности могут быть преодолены, если при расчетах использовать такой показатель надежности как вероятность безотказной работы $P_{эд}$.

Как показали исследования, надежность электрической сети определяется надежностью таких, наиболее уязвимых узлов, как кабельные сети и трансформаторные подстанции. Исходя из этого вероятность безотказной работы сети будет определяться как

$$P_c = P_k P_{тр}, \quad (6)$$

где $P_{об}$ - вероятность безотказной работы обмотки статора; $P_{ну}$ - вероятность безотказной работы электрической сети.

Определив составляющие формулы (6), можно осуществить проектирование сети, воспользовавшись приведенной выше методикой.

Вероятность безотказной работы кабельной сети, можно определить с учетом величины пробивного напряжения между двумя соседними проводниками.

При определении вероятности безотказной работы будем исходить из того, что существует определенная вероятность существования в кабелях проводников с ослабленной изоляцией (дефектных проводников). Замыкание является результатом пробоя изоляции в "слабейшем звене". Поэтому, естественно в качестве характерного параметра модели принять величину минимального пробивного напряжения между соседними проводниками.

В качестве элемента модели принимается изолированный элементарный промежуток длиной $l_{эл}$ между соседними проводниками. Пробивное напряжение между ними

$$U_{б..эл} = U_э + U_u, \quad (7)$$

где $U_э$ - пробивное напряжение изолированных слоев соседних проводников; U_u - пробивное напряжение изоляционного промежутка из воздуха или пропитывающего состава между электропроводами.

Длина элементарного участка $l_{эл}$ выбирается такой, что в этих пределах пробивное напряжение можно считать неизменным. При абсолютно плотной укладке проводников (гипотетический случай) $U_u = 0$. Вероятность пробоя слоев для соседних проводников длиной $l_{эл}$, напряжением U в этом случае считается потенциальной вероятностью отказа элементарного участка $q_{н.эл}(U)$. Обозначив через $f_1(U_э)$ плотность распределения пробивного напряжения изолированных слоев элементарных участков соседних проводников, можно записать

$$q_{н.эл}(U) = \int_{-\infty}^U f_1(U_э) dU. \quad (8)$$

Нижний предел интегрирования ($-\infty$) имеет уловный смысл, позволяющий получить непрерывное распределение пробивного напряжения.

Расстояние между проводниками в кабелях распределено по показательному закону. Это ясно из теоретических соображений и доказано экспериментально. Тогда плотность распределения пробивного напряжения изоляционного промежутка $f_2(U_u)$ может быть определена по формуле

$$f_2(U_u) = \lambda e^{\lambda U}, \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{1}{E_u x_u}. \quad (10)$$

E_u - средняя электрическая прочность изоляционного промежутка;

x_u - среднее расстояние между изолированными проводами, которое определяется коэффициентом заполнения кабеля.

Нетрудно показать, что

$$x_u = d_{уз} \left(\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}k_к}} - 1 \right), \quad (11)$$

где $d_{уз}$ - диаметр изолированного проводника;

$k_к$ - коэффициент заполнения.

Обычно кабели испытывают на пробой в скрутках длиной $l_{скр} = 125$ мм. Потенциальная вероятность пробоя такой скрутки напряжением U равна:

$$q_{н.скр}(U) = 1 - [1 - p^2 q_{н.эл}(U)]^m = m p^2 q_{н.эл}(U), \quad (12)$$

где p - доля поврежденных элементарных участков на длине $l_{скр}$;

m - число элементарных участков на длине скрутки,

$$m = l_{скр} / l_{эл}. \quad (13)$$

Потенциальная вероятность однофазного замыкания в сети

$$q_n = 1 - (1 - q_{н..скр})^n, \quad (14)$$

n - число пар соседних проводников длиной $l_{скр}$,

$$n = 2,7 \frac{L}{l_{\text{скр}}}, \quad (15)$$

где L - общая длина линии.

Будем различать два типа поврежденных элементарных участков: во первых, участки имеющие $U_3 = 0$,

$$q_1(U_{\text{эл}}) = \int_0^{U_{\text{эл}}} f_2(U) dU = \int_0^{U_{\text{эл}}} \lambda e^{-\lambda U} dU = 1 - e^{-\lambda U_{\text{эл}}} \approx \lambda U_{\text{эл}} \quad (16)$$

Во вторых, участки у которых $0 < U_3 \leq U_{\text{эл}}$, плотность распределения пробивного напряжения таких участков является композицией распределений $f_1(U)$ и $f_2(U)$

$$f_3(U) = f_1(U) f_2(U). \quad (17)$$

Анализ технологического процесса изготовления изолированного кабеля показывает, что $f_1(U)$ должно быть распределено по нормальному закону. Тогда дефектность поврежденных элементарных участков второго вида может быть определено по формуле

$$q_2(U_{\text{эл}}) = \int_0^{U_{\text{эл}}} f_3(U) dU = \int_0^{U_{\text{эл}}} \lambda e^{-[\lambda(U-U_3-0.5\lambda\sigma_3^2)]} F\left(\frac{U-U_3-\lambda\sigma_3^2}{\sigma_3}\right) dU \quad (18)$$

Суммарная дефектность элементарного участка

$$q_{\text{эл}}(U_{\text{эл}}) = q_1(U_{\text{эл}}) q_{\text{эл}}(0) + q_2(U_{\text{эл}}) [1 - q_{\text{эл}}(0)] \quad (19)$$

Формула (19) написана в предположении, что ко всем элементарным участкам приложено одно и тоже напряжение ($U_{\text{эл}}$), равное напряжению сети. В действительности это напряжение является случайной величиной, распределение которой зависит от ряда факторов, в частности, от вероятности распределения проводников в кабеле.

В окончательном виде искомая математическая модель может быть написана в следующем виде:

$$q(U_{\text{кам}}) = 1 - [1 - mp^2 q_{\text{эл}}(U_{\text{кам}})]^n, \quad (20)$$

$q_{\text{эл}}(U_{\text{кам}})$ может быть определено по формуле (19), но с учетом распределения приложенного напряжения.

Вероятность безотказной работы кабеля определится как:

$$P_{\text{об}} = 1 - q(U_{\text{кам}}). \quad (21)$$

Оценив вероятности безотказной работы кабеля и трансформаторной подстанции, можно на стадии проектирования получить сеть с требуемым уровнем надежности.

Литература

1. Фокин Ю.А., Харченко А.М. Расчет надежности систем электроснабжения. – Электричество, 1982, №8, с. 5-10.
2. Константинов Б.А., Лосев Э.А. Логико-аналитический метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения. – Электричество, 1971, № 12, с. 21-25.

УДК 629.7.064

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

Н.М. Меркулов, канд. техн. наук, доц., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУСИЛИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Основные элементы механической части систем рулевого управления, гидроусилитель находятся в сложной взаимозависимости, переходные процессы определяются как конструктивными параметрами, так и режимами работы. Зависимости между входными параметрами и выходными, а также оценочными показателями качества устанавливаются обобщенной математической моделью оптимизируемой системы.

Переходные процессы в ГУА и системе ГУА – рулевое управление определяются ее структурой и параметрами.

Оценка качества функционирования гидросистемы определяется набором критериев (табл. 1).

Здесь Q_H – подача насоса; q – расход масла в магистрали к силовому цилиндру; η – объемный КПД; μ – коэффициент расхода; F_n – площадь поршня; P – давление масла; R – сопротивление повороту; x_0 – ширина проходной щели в нейтральном положении; k_Q, k_P, k_V – коэффициенты усиления гидроусилителя по расходу, нагрузке, скорости; $V_{жс}$ – объем жидкости; τ_r, τ_m – гидравлическая и механическая составляющая запаздывания; $E_{жс}$ – модуль объемной упругости жидкости; V – скорость движения поршня.

Реализация гидросистемы связана с определением оптимальной совокупности параметров с учетом высокой размерности векторного критерия и ограничений, а также нелинейных характеристик обобщенной математической модели ГУА и системы ГУА – рулевое управление.

В общем виде задача для ГУА и системы ГУА – рулевое управление. Требуется найти такое множество, для которого

$$\begin{aligned} & \Phi(A) \rightarrow \text{subord} \\ & \Phi(A) = \begin{cases} \Phi^{\min}(A) = \{f_w(A)\}, \forall W \in W_1; \\ \Phi^{\max}(A) = \{f_w(A)\}, \forall W \in W_2; \end{cases} & (1) \\ & W_1 \subseteq W, \quad W_2 \subseteq W, \quad W_1 \cap W_2 = \Phi, \quad \Phi = (1, 2, 3, \dots, k); \\ & \Phi^{\min}(A) \leq \Phi^{**}, \quad \Phi^{\max}(A) \geq \Phi^*, \quad G(A) \geq 0, \end{aligned}$$

где $\Phi^{\min}(A)$, $\Phi^{\max}(A)$ – векторы минимизируемых и максимизируемых критериев; Φ^* , Φ^{**} – диапазон ограничений критериальных ограничений; $G(A)$ – ограничения типа неравенства.

Структурная схема для решения задачи многокритериальной оптимизации ГУА и системы ГУА – рулевое управление использует исходные данные и условия для выполнения расчетов по обобщенной математической модели (табл. 1) и (рис. 1).

Получить наилучшие показатели гидравлической системы можно за счет выбора совокупности параметров, значениями которых можно варьировать в процессе математического исследования обобщенной математической модели. По заданным параметрам в модели воспроизводятся процессы формирования экстремальных нагрузок и переходные процессы в гидросистеме. При условии выполнения функциональных ограничений вычисляются критерии, по которым оценивается качество гидросистемы.

Таблица 1
Критерии оценки качества ГУА и системы ГУА – рулевое управление

№ п.п.	Наименование критерия	Функциональная зависимость	Экстремум
1.	Коэффициент перегрузки	$k_{II} = f(F_{\text{зад}}, m_{F\bar{\sigma}})$	макс
2.	Коэффициент надежности (запаса прочности):		
	нагрузка – прочность	$k_H = f(A_{H\text{нд}}, m_{A\text{н}})$	макс
	износ – прочность	$k_0 = f(k_H, k_m, k_{II})$	макс
3.	Уровень надежности	$\begin{cases} q_{HM} = f(q_c, k_y) \\ k_{rHM} = f(q_{HM}, \lambda_{HM}, t_{\text{вп}}) \\ k_{тrHM} = f(k_{rHM}, t_{\text{вп}}, t_{HM}) \end{cases}$	мин макс макс
4.	Коэффициент полезного действия	$\eta = f(Q_H, q, F_n, P, R, x_0, k_Q, k_P, k_V)$	макс
5.	Радиус сферической поверхности кромок корпуса распределителя и золотника	$R = f(\varphi, a, b)$	мин
6.	Интенсивность износа кромок корпуса распределителя и золотника	$J = f(R)$	мин
7.	Общее запаздывание	$\tau = f(Q_H, q, \eta, \mu, F_n, P, x_0, V_{ж}, k_Q, k_P, k_V)$	мин
8.	Давление в гидроцилиндре	$P = f(Q_H, q, \tau_r, \tau_M, V_{ж}, E_{ж}, \mu, \gamma, F_n, V)$	мин
9.	Структурная жесткость привода	$C = f(R, J)$	макс

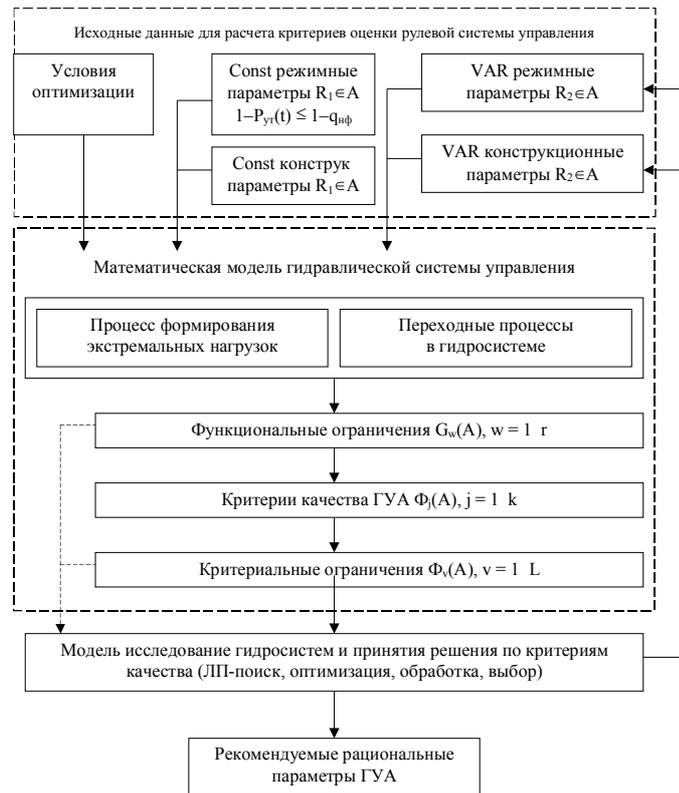


Рис.1. Оптимизация параметров ГУА и системы ГУА–рулевое управление

Многокритериальная задача оптимального проектирования делится на формирование Парето-оптимального множества и выбор решения из этого множества. Для зондирования области варьируемых параметров A , определяемой параметрическими и функциональными ограничениями:

$$a_j^* \leq a_j \leq a_j^{**}, \quad j = 1..n, \quad (2)$$

$$C_u^* \leq f_u(a) \leq C_u^{**}, \quad u = 1..v, \quad (3)$$

где n – число параметров (координат в многомерном пространстве),

v – число функциональных ограничений;

a_j^* - минимальное значение варьируемого параметра;

a_j^{**} - максимальное значение варьируемого параметра;

C_u^* - минимальное значение функционального ограничения;

C_u^{**} - максимальное значение функционального ограничения.

Для каждой точки q_j ЛП_г – последовательности, размещенной в единичном гиперкубе, осуществляется переход в пространство параметров по формуле

$$a_j = a_j + q_{ij} (a_j^{**} - a_j^*). \quad (4)$$

Далее вычисляется вектор критериев $\Phi = \{\Phi_1(a), \Phi_2(a), \dots, \Phi_k(a)\}$, где $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k$ критерии оценки в данной постановке задачи (табл. 3.1), k – число критериев. Перечень и значения критериев зависят от целей решаемой задачи.

Литература

1. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

УДК 621.322

Т.Ю. Чернова, аспирант., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),
Н.А. Фрозинов, аспирант., (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ)

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ РАСЧЕТЕ МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Рассматривается влияние реактивной мощности на напряжение при определении параметров компенсирующих устройств

Ключевые слова: электроснабжение, реактивная мощность.

Учет влияния реактивной мощности на напряжение при расчете мощности компенсирующего устройства включает в себя четыре аспекта, поэтому если утверждается, что расчет проведен с учетом влияния КУ на напряжение, следует уточнить, учет каких аспектов имеется в виду.

Первый аспект. Так как потери мощности и энергии в сети зависят от напряжений в узлах, то при их расчете до и после установки КУ при учете происходящего при этом повышении напряжения эффект от их установки будет выше, чем при расчете по номинальному напряжению.

Второй аспект. При выбранной мощности КУ напряжения в узлах должны находиться в технически допустимых пределах. Теоретически можно представить, что в некоторых узлах КУ экономически не окупаются, но их приходится ставить, чтобы поднять напряжение выше нижнего допустимого предела. Вместе с тем соотношение стоимостей КУ и электроэнергии таково, что даже при учете в расчете эффекта только от снижения потерь электроэнергии (без учета эффекта от увеличения пропускной способности сети) экономически целесообразная мощность КУ оказывается больше необходимой по техническим условиям. Поэтому обычно нет необходимости проверять соблюдение технических условий на каждом шаге итерационного процесса, достаточно проверить это в конце расчета.

Третий аспект. Так как установка КУ приводит к увеличению напряжений в узлах и, следовательно, к дополнительному снижению потерь мощности и энергии, то при расчете производных потерь следовало бы учесть влияние Q на U (производные станут больше, а следовательно, и оптимальная мощность КУ получится несколько больше, чем определенная без учета этого влияния).

Если производную потерь мощности по Q определить с учетом влияния Q на U , получим выражение:

$$\sigma = \frac{d\Delta P}{dQ} = \frac{2Q}{U^2} R + \frac{2(P^2 + Q^2)}{U^4} RX = \sigma_Q + \sigma_U,$$

где: X - реактивное сопротивление сети; σ_Q - составляющая, отражающая снижение потерь мощности в сети из-за снижения Q , σ_U - из-за повышения напряжения.

Повышение напряжения вызывает снижение потерь от передачи как реактивной, так и активной мощности, что и видно из выражения для составляющей σ_U . При учете влияния Q на U минимальные потери наблюдаются уже не при $Q = 0$, как было бы при учете только первого слагаемого, а при Q определяемом при приравнивании его нулю. Сокращая при этом общий множитель $2R/U^2$, получим:

$$Q_0 + \frac{P^2 + Q_0^2}{U^4} X = Q_0 + \Delta Q_0 = 0,$$

где: ΔQ_0 - потери реактивной мощности при $Q_0 = \Delta Q_0$.

Из уравнения следует, что $Q_0 = -\Delta Q_0$. Это означает, что минимальные потери в линии будут не при нулевой реактивной мощности, а при генерации в ее конце реактивной мощности, равной ее потерям в линии при нагрузке $P + jQ$, то есть в режиме, обеспечивающем нулевую реактивную мощность не в конце (в нагрузке), а в начале линии. Решая квадратное уравнение, получим:

$$Q_0 = \frac{-U^2 \pm \sqrt{U^4 - 4P^2 X^2}}{2X}.$$

Физическому решению соответствует знак «+» перед корнем.

Четвертый аспект. Он касается учета статических характеристик нагрузки (СХН). Под СХН понимается зависимость мощности, потребляемой нагрузкой неизменного состава, от напряжения в узле. При увеличении напряжения на вводах ЭП возрастает потребление ими и активной, и реактивной мощности. Что касается активной мощности, то увеличение ее потребления нельзя рассматривать как увеличение потерь. Электроприемник выполняет при этом большую работу, чем до повышения напряжения. Если это ЭП периодического действия (например, насос), то он будет включаться на меньшее время для выполнения той же работы, потребляя ту же электроэнергию. Некоторые ЭП имеют трудно контролируруемую полезность (например, вентиляторы), и часто специалисты считают нерациональным увеличение потребления ими электроэнергии. При таком подходе можно рекомендовать выключить вентиляторы совсем — будет существенная экономия электроэнергии. Возможно, некоторые ЭП работают зря

(например, двигатели на холостом ходу, которые надо бы на эти периоды отключать).

Учет СХН активной мощности при выборе КУ еще мог применяться во времена, когда частота в сетях постоянно была ниже 50 Гц из-за превышения суммарной мощностью потребителей располагаемой мощности электростанций. Он был продиктован желанием с помощью централизованного воздействия снизить бесхозяйственное (а заодно и полезное) потребление электроэнергии. При целевой установке потреблять как можно меньше, конечно, надо работать при минимально допустимом напряжении. Однако при этом надо оценить технологический ущерб (снижение производства продукции).

Что касается реактивной мощности, то увеличение ее потребления в соответствии с СХН надо учитывать только в диапазоне ступени РН трансформатора в ЦП. Если напряжение в ЦП при установке КУ выйдет за поддерживаемое значение, то будет изменена рабочая ответвление трансформатора и напряжение опять снизится до прежнего предела. При этом в сети, внешней по отношению к ЦП, напряжение при установке КУ поднимется и обеспечит дополнительное снижение потерь электроэнергии.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что учет СХН по активной мощности необоснован, а по реактивной мощности может быть применен, но с учетом РН трансформаторами. В частности, при установке КУ в сети 0,4 кВ необходимо учитывать СХН по реактивной мощности, так как КУ изменяют напряжение на вводах ЭП в этой сети и слабо влияют на напряжение в сетях более высоких напряжений. При выборе же КУ в сетях энергоснабжающих организаций учет СХН ошибочен. После установки КУ при существенном их влиянии на напряжения в узлах рабочие ответвления трансформаторов 220-35/6-10 кВ будут изменены и потребление энергии опять вернется на прежний уровень. Поэтому при проведении расчетов по выбору КУ с помощью программ расчета УР (а они имеют возможность учитывать СХН) такой учет не должен осуществляться.

Литература

1. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов/ Ю.С. Железко.-М.: ЭНАС, 2009.-456 с.: ил.
2. Повышение качества энергии в электрических сетях/ Шилдовский А.К., Кузнецов В.Г. – Киев: Наук. думка, 1985. – 268 с.

УДК 621.322

Т.Ю. Чернова, аспирант., (4872) 35-54-50,

eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

С.В. Гумилевский, аспирант., (4872) 35-54-50,

eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ).

ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ И МОНИТОРИНГ ПРОФИЛЕЙ МОЩНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рассматриваются вопросы, касающиеся применения аппаратуры дистанционного управления параметрами качества электроэнергии электрических сетей
Ключевые слова: электроснабжение, качество электроэнергии.

В электроэнергетике вопросы дистанционного управления и мониторинга как оборудования, так и электроэнергии остаются актуальными. Перед разработчиками встает вопрос, как соединить объект (например, выключатель или счетчик) и удаленный диспетчерский пункт (например, компьютер) при этом затратив как можно меньше сил и денег. Сегодня это возможно осуществить через подвижную радиотелефонную связь стандарта GSM-900/1800. Существуют отечественные технические решения компании «ОВЕН» – «GSM/GPRS модем ОВЕН ПМ01» и ФГУП «Нижегородского завода им. Фрунзе» – «Коммуникатор GSM С-1.01», а также существуют зарубежные аналоги, например, «Siemens» – «MC35i Terminal GSM/GPRS модем». Название «Коммуникатор GSM С-1.01», говорит о том, что помимо модема в него встроен контроллер, что не мало важно. Принципы платежных терминалов (например, которые стоят на улице для пополнения лицевого счета мобильного телефона), построены по следующему принципу. С клавиатуры контроллер понимает задачу, далее контроллер используя АТ-команды связывается и передает данные на сервер в интернете. Следует отметить, что у GSM приоритет передачи самый высокий как и стоимость, а у GPRS приоритет низкий, как и стоимость. Поэтому при выборе модема необходимо представлять ограничения, накладываемые на канал GPRS. Также следует понимать, что сами по себе модемы не могут связываться, им необходим контроллер со знанием АТ-команд. По этой причине «Коммуникатор GSM С-1.01» имеет преимущество, так как в нем есть контроллер, который осуществляет связь (рис.1). При разрывах соединений он пытается восстановить их. Рассмотрим принцип работы. МК (Микроконтроллер) питание подается через блок питания, используя интерфейс UART МК общается с GSM/GPRS модулем и драйвером RS-485. Посылая запрос по GPRS каналу МК просто передает его на порт RS-485. Но при разрывах МК пытается восстановить соединение выступая при этом инициатором.

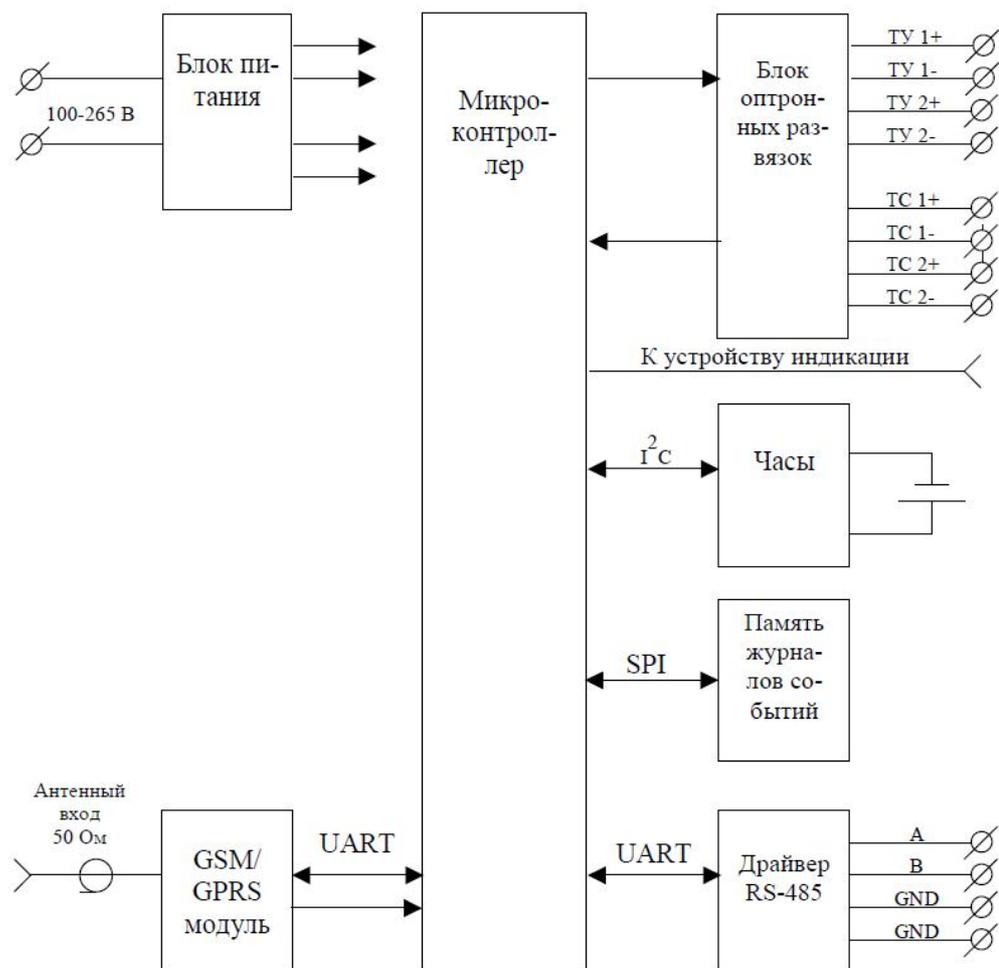


Рис. 1. Структурная схема устройства управления коммуникатора

Удаленный мониторинг и управление сегодня являются технически решаемыми задачами. В 2010г в г. Жукове было успешно внедрено АСКУЭ на базе программного обеспечения «КТС Энергия». В ней девять подстанций с общим количеством точек учета 128 передают показания, профили мощности и параметры качества электроэнергии в автоматическом режиме на диспетчерский компьютер, который имеет выход в интернет. В этом проекте было использовано девять коммуникатор GSM С-1.01, которые работают в режиме пакетной передачи данных (GPRS). Диспетчерский пункт имеет статический IP-адрес, а коммуникаторы динамический, и они являются инициаторами соединения. Ввиду положительных испытаний «Коммуникатор GSM С-1.01» возможно применение в АСУ ТП.

Литература

1. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений, РД 153-34.3-35.125-99 изд. 2, РАО «ЕЭС России», издательство ПЭИПК, Санкт-Петербург, 1999.
2. ПУЭ Минэнерго СССР, 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат.
3. ПУЭ Минэнерго России, 7-е изд., раздел 4, глава 4.1, 4.2 Москва, издат. НЦ ЭНАС, 2003.

УДК 62-9.064.5

В. М. Степанов, д-р техн. наук, проф. (4872) 35-54-50, eists@rambler.ru
(Россия, Тула, ТулГУ)

В. Е. Кулешов, асп., 8-953-427-71-06, (4872) 36-88-31, slavcon@yandex.ru
(Россия, Тула, ТулГУ)

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассматриваются вопросы влияния устройств поперечной компенсации на режим электрических сетей.

Ключевые слова: компенсирующее устройство, поперечная компенсация

Компенсирующие устройства (КУ) в электрической системе предназначены для компенсации реактивных параметров сетей (например, линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока) и реактивной мощности, потребляемой нагрузками и элементами электрической системы. В качестве КУ на ЛЭП используются продольно включаемые батареи электрических конденсаторов, а также поперечно включаемые электрические реакторы и синхронные компенсаторы, которые устанавливаются на конечных или промежуточных подстанциях ЛЭП. Эти КУ предназначены для увеличения пропускной способности электрической линии и улучшения технико-экономических показателей работы ЛЭП (снижения потерь активной мощности, обеспечения требуемых значений напряжения при различных нагрузках и др.)

Поперечная компенсация представляет собой параллельное включение компенсирующих устройств в электрическую систему в целях изменения реактивных параметров линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока и реактивной мощности, потребляемой в системе. В ЛЭП большой протяжённости для поперечной компенсации применяют преимущественно реакторы электрические; их устанавливают на электрических подстанциях и переключательных пунктах. Реакторы поглощают реактивную мощность, обусловленную распределённой ёмкостью ЛЭП. Благодаря включению реакторов улучшается распределение напряжения вдоль ЛЭП и создаются условия для повышения пропускной способности электропередачи, снижаются внутренние перенапряжения, обеспечиваются особые режимы ЛЭП (например, холостой ход, синхронизация, автоматическое повторное включение и т.д.). Поперечная компенсация в электрических сетях осуществляется при помощи батарей конденсаторов электрических, компенсаторов синхронных и синхронных электродвигателей. Посредством этих устройств обеспечивают требуемые значения напряжения и уменьшают потери электроэнергии в электрической сети. Синхронные компенсаторы чаще всего устанавливают на электрических подстанциях районных электрических сетей, батареи электрических конденсаторов — на

подстанциях потребителей электроэнергии и непосредственно у потребителей.

Перспективно применение регулируемых статических устройств поперечной компенсации, позволяющих непрерывно и практически безынерционно изменять генерацию или потребление реактивной мощности. Такие устройства выполняют в виде вентильных установок с искусственной коммутацией или в виде подмагничиваемых реакторов. Они улучшают режимы работы электрические системы при резких колебаниях нагрузки, повышают пропускную способность ЛЭП.

Компенсирующие устройства поперечной компенсации оказывают комплексное положительное влияние на режим электрических сетей. Кроме возможности регулирования напряжения, они позволяют снизить потери активной мощности и электроэнергии за счет разгрузки элементов сети от реактивной мощности и соответственно снижения рабочих токов. В ряде случаев, когда передаваемая активная мощность ограничивается допустимым током по нагреванию или допустимой потерей напряжения, за счет разгрузки сети от реактивной мощности можно увеличить пропускную активную мощность. Поэтому в общем случае вопросы выбора мощности и мест установки компенсирующих устройств должны решаться комплексно.

Литературы

1. Веников В. А., Дальние электропередачи, М. — Л., 1960; Глазунов А. А. и Глазунов А. А., Электрические сети и системы, 4 изд., М. — Л., 1960; Мельников Н. А., Электрические сети и системы, М., 1969.
2. Глазунов А. А. и Глазунов А. А., Электрические сети и системы, 4 изд., М. — Л., 1960; Электрические системы, под ред. В. А. Веникова, т. 2—3, М., 1971—1972; Мельников Н. А., Рокотян С. С., Шеренцис А. Н., Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330—500 кВ, М., 1974.

УДК 62-593

В. М. Степанов, д-р техн. наук, проф. (4872) 35-54-50, eists@rambler.ru
(Россия, Тула, ТулГУ)

С. В. Кузьмина, студент, 8-920-753-69-77, S.V.Kuzmina@yandex.ru
(Россия, Тула, ТулГУ),

УСТРОЙСТВО РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В работе описана схема устройства рекуперации электроэнергии.

Ключевые слова: рекуперация, рекуперативное торможение, устройство рекуперации.

Рекуперативное торможение – организация торможения, при которой кинетическая энергия транспортного средства не рассеивается в виде тепла, как обычно, при реостатном торможении, а снова используется для движения. Рекуперативное торможение широко применяется на электровозах и электропоездах, где при торможении электродвигатели начинают работать как электрогенераторы, а вырабатываемая электроэнергия передается через контактную сеть либо другим электровозам, либо в общую энергосистему через тяговые подстанции.

Что касается грузоподъемных механизмов и устройств, в том числе и подъемных установок, то применение рекуперативного торможения в их области не так широко распространено, как в электропоездах. Однако здесь также встречаются различные способы экономии электроэнергии. К некоторым из них относятся: аккумулирующие устройства, конструктивные особенности установки, ступенчатое торможение, размещение непосредственно самих блоков или устройств рекуперации, а также регулирование режима рекуперативного торможения.

На рис.1 изображена устройства рекуперации электроэнергии, данная схема универсальна и может применяться во многих сферах жизни, но в конкретном случае она применяется для подъемно-транспортного механизма.

Устройство включает в себя: группу коммутирующих ключей, группу предохранителей, устройство грозозащиты, высокочастотный фильтр, а также 4 привода. Все привода идентичны, кроме последнего, он включает в себя несколько двигателей. Каждый привод обладает своей функцией. В нашем случае используются привод подъема груза, привод передвижения тележки, привод поворота стрелы и привод передвижения крана. Как видно из схемы, два привода отмечены пунктиром, тем самым показывая, что схема может включать в себя любое количество приводов.

Вся верхняя часть в основном отвечает за безопасность работы системы. В нее входит группа коммутирующих ключей, группа предохранителей, устройство грозозащиты, чтобы надежно защитить объект от воздействия любого вида перенапряжения. В вводном щите находятся рубильник и предохранители FU1-FU3. Индуктивности L1-L3 служат в качестве линий задержки для согласования работы разрядников FV1-FV3 и

варисторов RU1-RU3. Предохранители FU4-FU6 и FU7-FU9 устанавливаются в случае. Если ток срабатывания предохранителей FU1-FU3 выше тока, рекомендованного производителем для FV1-FV3 и RU1-RU3 соответственно. Оставшаяся часть включает в себя 4 идентичных привода. Каждый, из которых содержит группу коммутирующих ключей, группу предохранителей, рекуператор, блок накопителя электроэнергии, еще одну группу коммутирующих ключей, инвертор, двигатель, редуктор и исполнительный механизм.

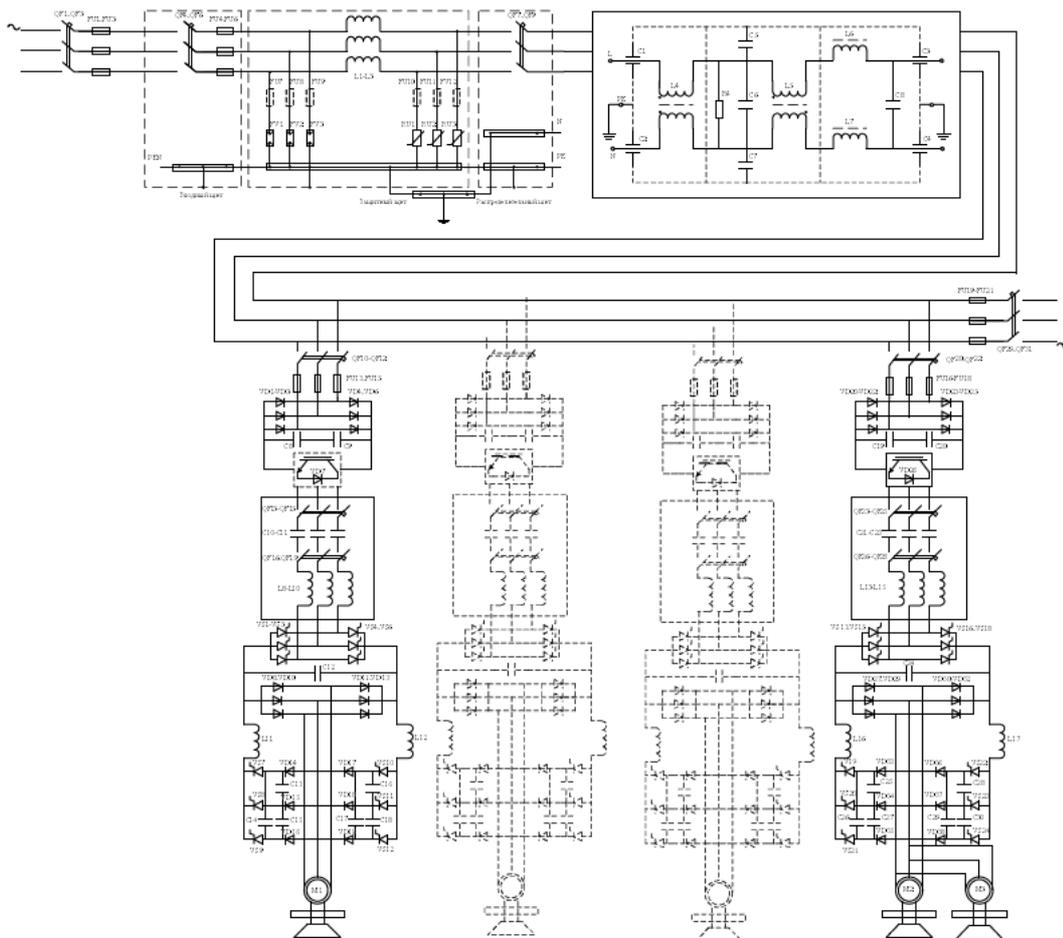


Рис. 1. Схема силового питания преобразователей частоты
Литературы

1. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. 1980 г. Издательство: Энергия.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с., ил
3. Фираго Б.И., Палявчик Л.Б. Теория Электропривода Издательство: Техноперспектива 2007 г.

УДК 621.322

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,

eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

Р.В.Рябчиков, магистр., (4872) 35-54-50,

eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ В КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОМ СЕКТОРЕ.

Предлагаются методы энергосбережения, которые могут быть реализованы в жилищно-коммунальном секторе.

Ключевые слова: электронасос, переходный процесс электропривод.

Возрастающая с каждым годом выработка и потребление электроэнергии в России создают необходимые условия для ускорения научно-технического процесса, который позволяет улучшать благосостояние россиян. Но вместе с тем возрастающие объёмы потребления энергии требуют всё больших и больших объёмов углеводородного сырья, запасы которого не безграничны. Запасов нефти и газа в России достаточно, однако увеличение объёмов добычи углеводородов и развитие транспортной инфраструктуры требуют значительных инвестиций.

Нехватка энергии может стать существенным фактором сдерживания экономического роста страны. По оценке экспертов, до 2015 года темпы снижения энергоёмкости при отсутствии скоординированной государственной политики по энергоэффективности могут резко замедлиться. Это может привести к еще более динамичному росту спроса на энергоресурсы внутри страны. Данная проблема касается всех слоев нашего общества. В связи с этим Указом Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 года № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» и поручения Правительства Российской Федерации от 18 июня 2008 года № ИШ-П9-3772, Минэнерго России разработало комплексный план мер по реализации политики энергосбережения и повышению энергоэффективности российской экономики.

План включает пять основных направлений:

- разработка современной нормативно-правовой базы;
- формирование организационных структур;
- государственная поддержка и создание благоприятного инвестиционного климата;
- взаимодействие с бизнес-сообществом и финансовыми институтами на основе частно-государственного партнерства;
- информационная и образовательная поддержка мероприятий на международном, федеральном, региональном и муниципальном уровнях.

Государство всеми возможными ему средствами старается снизить потребление электроэнергии. Но нельзя забывать и про обычных людей, ведь

энергопотребление в коммунально-бытовом секторе в последнее время растет опережающими темпами. Обусловлено это и ростом благосостояния (приобретаются все новые и новые товары) и ростом количества и разнообразия бытовых приборов. В связи с этим растет и потенциал энергосбережения в этом секторе.

Основными способами экономии электроэнергии в данном секторе являются:

1. Установка двухставочных (двухзонных) поквартирных счетчиков электроэнергии - позволяет потребителям часть своих энергоемких бытовых процессов перенести на время когда действует пониженный тариф. Например, стирку автоматическими стиральными машинами (автоматические посудомоечные машины) возможно проводить в ночное время, когда тариф на электроэнергию существенно ниже дневного. Как показывает анализ, таким образом, потребители получают возможность снижать свои счета на электроэнергию до 30 %. Введение пиковых тарифов (повышенные тарифы в часы максимума потребления) еще более повысит привлекательность и выгоду потребителей от установки таких счетчиков.

2. Приобретение более экономичных энергопотребляющих приборов и устройств - практически все энергопотребляющие приборы маркируются на соответствие принятому классу энергоэффективности. Эта информация является неотъемлемой и публичной характеристикой прибора и потребитель при приобретении товара, может принимать решение не только с учетом покупной стоимости, но и стоимости дальнейшей эксплуатации, которая в свою очередь будет определяться в основном стоимостью потребляемых энергоресурсов.

3. Использование энергосберегающих ламп – достойная альтернатива лампам накаливания. Световая отдача энергосберегающих ламп в несколько раз выше, при том, что потребление электроэнергии значительно ниже, чем у обычных ламп накаливания. Срок службы энергосберегающих ламп достигает 12000 часов, а у ламп накаливания всего 2000 часов.

4. Консультации специалистов - существует достаточно большой набор простейших решений, реализация которых под силу непосредственно жильцам, и которые могут повышать эффективность конечного энергопотребления. Например, не загораживание батарей, установка теплоотражающих экранов между стеной и батареей, применение термопленки на окна, отладка вентиляции, установка терморегуляторов на батареи. Эти простейшие и очевидные решения могут быть реализованы как непосредственно самими жителями, так представителями управляющей компании. Затраты на такие мероприятия минимальны и позволяют получить пусть и незначительный в общем балансе, но очевидный видимый эффект.

Соблюдение людьми этих простых правил позволит сократить потребление электроэнергии, вследствие чего, сохранить часть природных ресурсов для будущих поколений.

УДК 621.333

Ю.Н. Тимонин, зам. ген. директора, (4872) 32-77-69,
tul_energo@tula_elektra.ru (Россия, Тула, фил. «Тулэнерго»

ОАО «МРСК Центра и Приволжья»),

В.М. Степанов, проф. (4872)35-54-50, eists@rambler.ru

(Россия, Тула, ТулГУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО ТЕМПЕРАТУРЕ НАИБОЛЕЕ НАГРЕТОЙ ТОЧКИ ЕГО ОБМОТКИ

Предложена методика определения параметров нагрева электрогидравлической системы силового трансформатора для расчета его надежности.

Ключевые слова: силовой трансформатор, тепловая модель.

Изоляция обмоток силового трансформатора подвергается термохимическому износу. Этот процесс является кумулятивным и приводит к недопустимому ее состоянию по некоторым критериям. Согласно закону Аррениуса, период времени до достижения этого состояния в зависимости от скорости химической реакции выражается формулой

$$t_{cl} = e^{\left(\alpha + \frac{\beta}{T+273}\right)}, \quad (1)$$

где t_{cl} - срок службы трансформатора; α и β - постоянные; T – температура изоляции, °С.

Для ограничения диапазона температуры можно пользоваться более простым экспоненциальным отношением Монтсингера

$$t_{cl} = e^{-\rho T}, \quad (2)$$

где ρ - постоянная; T – температура изоляции, °С.

Пока не существует единственного и простого критерия окончания срока службы, который мог бы быть использован для количественной оценки полезного срока службы изоляции трансформатора, однако можно сделать сравнения, основанные на скорости износа изоляции $v_{из}$. Это величина, обратная сроку службы, выражаемая отношением Монтсингера

$$v_{из} = C e^{\rho T}, \quad (3)$$

где C некоторая постоянная.

Значение постоянной в этом уравнении зависит от многих факторов: первоначального состава целлюлозных продуктов (смесь исходных

материалов, химические добавки) и параметров окружающей среды (содержание влаги, свободного кислорода в системе).

Однако независимо от этих изменений в интервале температуры от 80 до 140 °С, соответствующей реальным условиям, коэффициентом изменения температуры допускается принимать постоянное значение ρ . При определении его значения учитывают тот факт, что скорость износа удваивается при каждом изменении температуры приблизительно на 6 °С.

Скорость износа определяется температурой наиболее нагретой точки. Для трансформаторов, соответствующих требованиям ГОСТ 11677, эталонное значение этой величины при номинальной нагрузке к нормальной температуре охлаждающей среды принимается равным 98 °С. В настоящем стандарте относительная скорость износа при этой температуре принимается равной единице.

Во многих трансформаторах применяется термически высококачественная изоляция. Поскольку в ГОСТ 3484.2 этот вид изоляции для масляных трансформаторов не рассматривается, то допустимые пределы превышения температуры, обусловленные улучшением термической стойкости изоляции, устанавливаются по согласованию между изготовителем и потребителем. В большинстве случаев трансформаторы с такой изоляцией имеют нормальный предполагаемый срок службы, при базовой температуре наиболее нагретой точки 110 °С.

Для трансформаторов, отвечающих требованиям ГОСТ 11677, относительная скорость термического износа изоляции принята равной единице для температуры наиболее нагретой точки 98 °С, что соответствует работе трансформатора при температуре охлаждающей среды 20 °С и превышению температуры наиболее нагретой точки 78 °С. Относительная скорость износа определяется по формуле

$$v_{из} = \frac{\text{скорость износа при } T_{об}}{\text{скорость износа при } 98^{\circ}\text{C}} = 2^{\frac{(T_{об}-98)}{6}}. \quad (4)$$

Из данных, приведенных ниже, следует, что эта формула содержит значительную зависимость относительной скорости износа изоляции от температуры наиболее нагретой точки:

Таблица 1.

Т _{об}	Относительная скорость износа изоляции
80	0,125
92	0,5
98	1,0
110	4,0
116	8,0
122	16,0
128	32,0
134	64,0
140	128,0

Сокращение срока службы силового трансформатора, вызванное месячной, суточной или часовой нагрузкой при температуре наиболее нагретой точки 98 °С, выражается «нормальными» месяцем, сутками или часами.

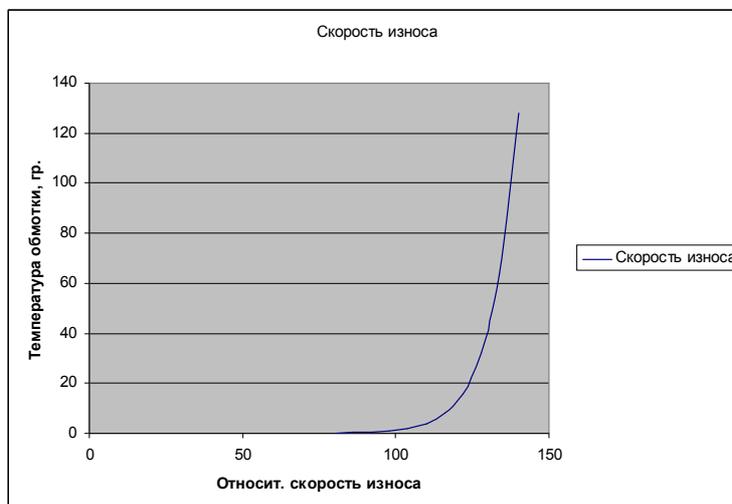


Рис. 1 График зависимости скорости износа изоляции от температуры

Если нагрузка и температура охлаждающей среды постоянны в течение определенного периода времени, то относительное сокращение срока службы равно $v_{из} t$, где t - рассматриваемый период времени. То же самое относится к постоянному режиму нагрузки при изменяющейся температуре охлаждающей среды, если при этом используется базовое значение температуры охлаждающей среды.

$$L = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} v_{из} dt = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} 2^{\frac{(T_{об}(t)-98)}{6}} dt \quad (5)$$

Обычно, когда изменяется режим нагрузки и температура охлаждающей среды, относительная скорость сокращения срока службы изменяется во времени. Относительный износ изоляции может быть определен по формуле (5).

УДК 621.31

Ю.Н. Тимонин, зам. ген. директора, (4872) 32-77-69,
tul_energo@tula_elektra.ru (Россия, Тула, фил. «Тулэнерго»

ОАО «МРСК Центра и Приволжья»),

Ю.И. Горелов, доцент. (4872)35-54-50, eists@rambler.ru
(Россия, Тула, ТулГУ)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Предложена методика моделирования тепловых процессов в силовом трансформаторе в его нижней части.

Ключевые слова: силовой трансформатор, тепловая модель.

Так как предположение о расположении наиболее нагретой точки в верхней части любой из обмоток силового трансформатора не может быть подтверждено теоретически на современном уровне знаний, то в настоящей статье предлагаются модели динамики температуры наиболее нагретой точки нижней части обмотки и динамики температуры нижней части масла.

Тепловая модель наиболее нагретой точки нижней части обмотки может быть представлена следующей термо-электрической схемой

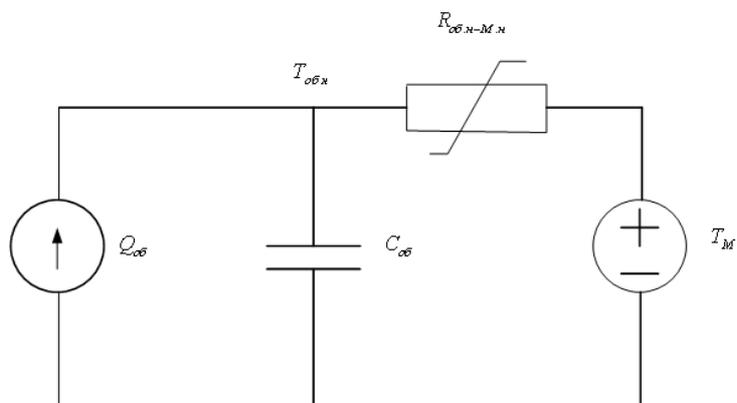


Рис. 1. Термо-электрическая схема наиболее нагретой точки нижней части обмотки

Этой схеме после достаточно трудоемких преобразований соответствует следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{dT_{об.н}}{dt} = \frac{1}{\mu^n \tau_{об}} \left(P_{\Sigma об.н} \cdot K^2 \mu^n \Delta T_{об.н} - \frac{(T_{об.н} - T_{М.н})^{1+n}}{\Delta T_{об.н}^n} \right);$$
$$P_{\Sigma об.н} = P_k \left(\frac{T_{об.н} + T_k}{T_{об.н.ном} + T_k} \right) + P_{вихр} \left(\frac{T_{об.н} + T_k}{T_{об.н.ном} + T_k} \right) \quad (1)$$

где K - коэффициент загрузки трансформатора; μ - вязкость масла, зависящая от температуры; $\tau_{об}$ - постоянная времени наиболее нагретой точки обмотки; $T_{М.н}$ - температура нижней части масла; $T_{об.н}$ - температура наиболее нагретой точки нижней части обмотки; n - эмпирическая постоянная, зависящая от типа охлаждения трансформатора; $\Delta T_{об.н}$ - номинальное превышение температуры наиболее нагретой точки нижней части обмотки над температурой нижней части масла.

Тепловая модель нижней части трансформаторного масла может быть представлена следующей термо-электрической схемой

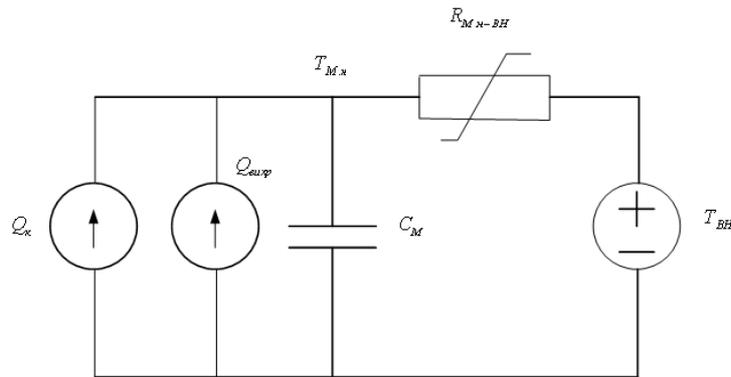


Рис. 2. Термо-электрическая схема нижней части трансформаторного масла

Переходный тепловой процесс, соответствующий рис. 2 описывается следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{dT_{М.н}}{dt} = \frac{1}{\mu^n \tau_{М.н}} \left(\frac{I + R \cdot P_{\Sigma.н} \cdot K^2}{I + R} \mu^n \Delta T_{М.н} - \frac{(T_{М.н} - T_{Вн})^{1+n}}{\Delta T_{М.н}^n} \right) \quad (2)$$

где I - ток нагрузки; R - отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода; K - коэффициент загрузки трансформатора; μ - вязкость масла, зависящая от температуры; $\tau_{М.н}$ - постоянная времени нижней части масла; $T_{М.н}$ - температура нижней части масла; $T_{Вн}$ - температура воздуха; n - эмпирическая постоянная, зависящая от типа охлаждения трансформатора; $P_{\Sigma.н}$ - суммарные потери, определяемые по формуле:

$$P_{\Sigma.н} = P_k \left(\frac{T_{e.н} + T_k}{T_{e.н,ном} + T_k} \right) + P_{\Sigma_1} \left(\frac{T_{e.н} + T_k}{T_{e.н,ном} + T_k} \right)$$

$$T_e = \frac{T_{об1.н} + T_{об2.н}}{2} \quad , \quad (3)$$

здесь P_k - потери короткого замыкания; P_{Σ_1} - потери на гистерезис и вихревые токи; T_k - корректирующий коэффициент.

Для проведения дальнейших расчетов, в качестве температуры наиболее нагретой точки обмотки выбиралась наибольшая среди $T_{об.м}$ и $T_{об.н}$.

Для проверки адекватности построенных теоретических моделей расчета распределения температуры в конструктивных элементах силового трансформатора при линейной и нелинейной нагрузке были проведены вычислительные эксперименты.

Результаты этих экспериментов для типового силового трансформатора мощностью 400 кВА приведены на рисунках 3 и 4.

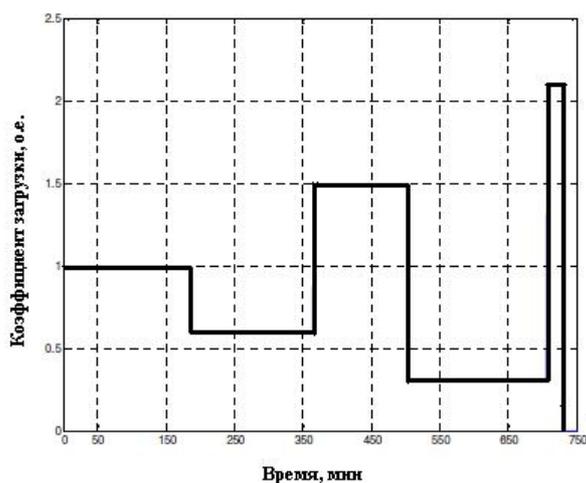


Рис. 3. Динамика коэффициента загрузки трансформатора.

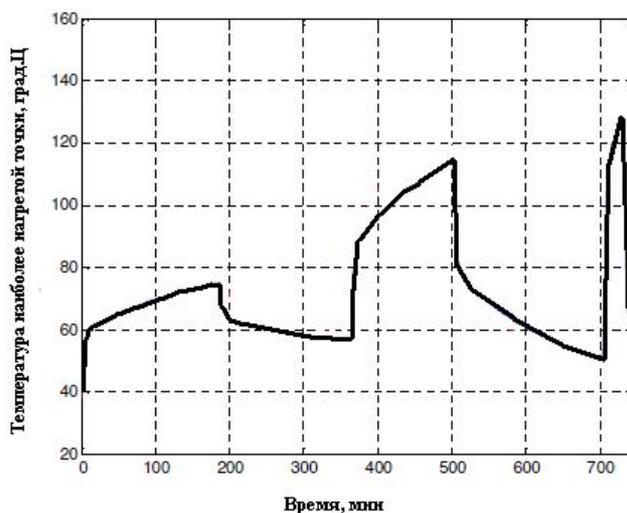


Рис. 4. Динамика температуры наиболее нагретой точки обмотки в зависимости от коэффициента загрузки трансформатора.

Сравнение результатов численных экспериментов с данными, опубликованными в литературных источниках, показало, что аналитические зависимости дают погрешность в вычислении потерь в пределах 7 – 11% в зависимости от конструктивных особенностей трансформатора и способа его охлаждения.

УДК 621.321

Ю.Н. Тимонин, зам. ген. директора, (4872) 32-77-69,
tul_energo@tula_elektra.ru (Россия, Тула, фил. «Тулэнерго»

ОАО «МРСК Центра и Приволжья»),

С.В. Ершов, доцент. (4872)35-54-50, eists@rambler.ru
(Россия, Тула, ТулГУ)

ПОТЕРИ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗКАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Приводится методика определения потерь в силовых трансформаторах и методика нахождения их оптимальных режимных параметров.

Ключевые слова: силовой трансформатор, оптимальные параметры.

Потери в трансформаторе в общем случае могут быть представлены как

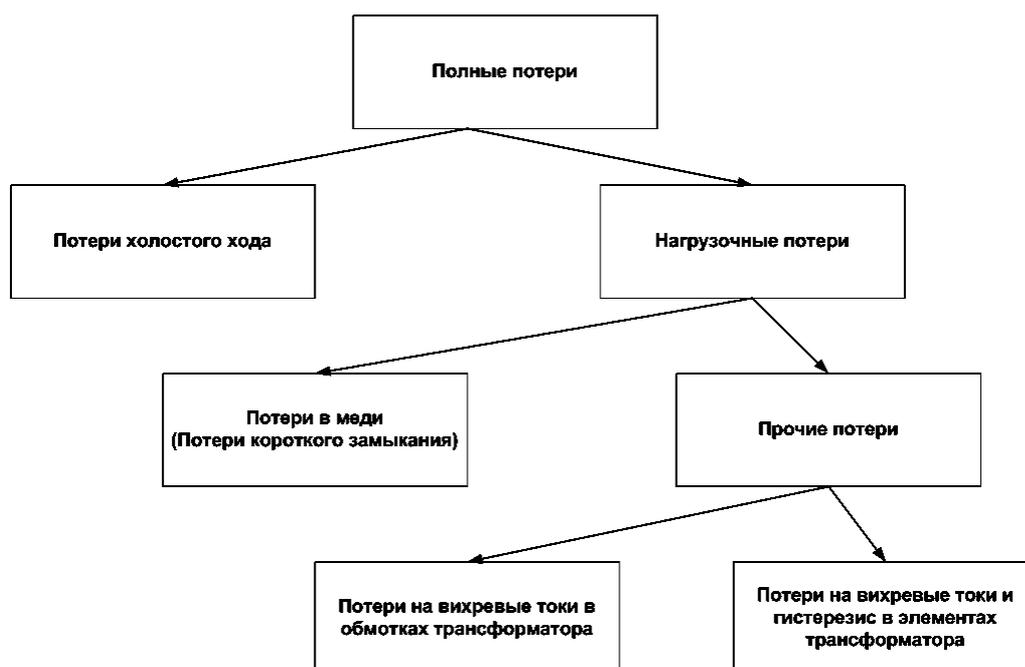


Рис.1. Структура потерь мощности в силовом трансформаторе

Запишем полные потери мощности в силовом трансформаторе в аналитическом виде в соответствии с диаграммой:

$$P_{\Pi} = P_{X} + P_{H}, \quad (1)$$

где P_{Π}, P_{X}, P_{H} - полные потери, потери холостого хода, нагрузочные потери, соответственно.

Потери холостого хода P_X представляют собой потери в стали магнитопровода трансформатора и представляют собой паспортные данные. Нагрузочные потери P_H делятся на:

- потери в обмотках трансформатора P_K (потери в меди или потери короткого замыкания), которые зависят от сопротивления обмоток R и тока I , протекающего в обмотках и равны в соответствии с законом Джоуля-Ленца I^2R ;
- прочие потери, включающие в себя потери на вихревые токи в обмотках $P_{вихр.об}$ и потери на гистерезис и вихревые токи в конструктивных элементах трансформатора $P_{др}$.

Надо отметить, что в $P_{вихр.об}$ иногда кроме потерь на вихревые токи в обмотках включают потери от уравнивающих токов, однако для распределительных силовых трансформаторов в условиях их нормальной загрузки эти потери пренебрежительно малы.

Таким образом

$$P_H = P_K + P_{вихр.об} + P_{др}. \quad (2)$$

При нелинейной нагрузке ток, циркулирующий в обмотках трансформатора, является «насыщенным» гармониками высокого по отношению к основной гармонике (50 Гц.) порядка. В результате этого возрастают потери $P_{вихр.об}$ и $P_{др}$, обусловленные проявлением поверхностного эффекта, эффекта близости и гистерезисного эффекта. Поэтому необходимо получить аналитические выражения, учитывающие влияние этих эффектов на потери в силовом трансформаторе при наличии гармоник высших порядков в сети электроснабжения.

Основными электрическими параметрами силового трансформатора, характеризующими экономичность его работы являются потери электроэнергии.

В работе [60] рассматриваются вопросы по определению и оптимизации ущерба, приносимого несинусоидальностью тока нагрузки, в силовых трансформаторах. Дополнительный нагрев изоляции силового трансформатора за счет несинусоидальности нагрузки подсчитывается на основании эмпирической зависимости

$$\Delta \tau_T = 0.6 \tau_T \sum_{v=2}^n k_{i_v}^2 k_{R_v}, \quad (3)$$

где k_{i_v} - относительное (в долях тока 1-й гармоники) значение v -й гармоники тока, проходящего через трансформатор; k_{R_v} - коэффициент, учитывающий возрастание сопротивления обмоток вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, приближенно равный

$$k_{R_v} = \sqrt{v}, \quad (4)$$

τ_T - температура перегрева изоляции при синусоидальном режиме.

При сопротивлении трансформатора и нагрузки в относительных единицах $X_* = 0.35 + e_k$, здесь, e_k - напряжение короткого замыкания трансформатора в относительных единицах, из (1) и (2), получаем

$$\Delta\tau_T = \frac{0.6\tau_T}{X_*^2} \sum_{v=2}^n \frac{U_{v*}^2}{v\sqrt{v}}, \quad (5)$$

Увеличение отчислений на реновацию

$$\frac{\Delta u_{p*}^{(T)}}{u_{p*}^T} = \frac{0.052\tau_T}{X_*^2} \sum_{v=2}^n \frac{U_{v*}^2}{v\sqrt{v}}. \quad (6)$$

Расчетное выражение для оценки ущерба, обусловленного дополнительными потерями мощности и сокращением службы изоляции обмоток силовых трансформаторов при стоимости электроэнергии β , руб/(Квт.ч) и работе в течении времени T имеет вид

$$Y = (100\beta AT\Delta P_{ном} + BK) \sum_{v=2}^n \frac{U_{v*}^2}{v\sqrt{v}}; \quad (7)$$

где $\Delta P_{ном}$ - номинальные потери трансформатора по паспортным данным; K - капитальные затраты на силовой трансформатор; A, B - эмпирические коэффициенты, равные 640 и 1,3 для трансформаторов мощностью до 630 кВА и 610 и 1,2 для трансформаторов мощностью свыше 630 кВА, соответственно.

Следует отметить, что формулы (6) и (7) носят полуэмпирический и оценочный характер. Более точно задача выбора рациональных режимных параметров силовых трансформаторов может быть решена ее формулировкой в виде задачи многокритериальной оптимизации с нелинейными ограничениями.

Пусть имеется совокупность критериев, характеризующих качество и надежность функционирования подсистемы «силовой трансформатор - понизительная подстанция»:

$$F_1(\bar{x}), F_2(\bar{x}), \dots, F_n(\bar{x}),$$

которые необходимо максимизировать, а \bar{x} принадлежит допустимой области X .

Если все критерии измеряются в одной шкале, то компромиссный критерий можно записать в виде взвешенной суммы критериев:

$$F_0(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n w_i F_i(\bar{x}), \quad (8)$$

где w_i – вес соответствующего критерия. В этом случае необходимо найти

$$\max_{x \in X} F_0(\bar{x}) = \max_{x \in X} \sum_{i=1}^n w_i F_i(\bar{x}).$$

Если же критерии измеряются в различных шкалах, то необходимо привести их к единой шкале. Для этого критерий может быть сформирован в следующем виде:

$$\min_{x \in X} F_0(\bar{x}) = \min_{x \in X} \sum_{i=1}^n w_i \frac{F_i^{\max} - F_i(\bar{x})}{|F_i^{\max}|}, \quad (9)$$

где $F_i^{\max} = \max_{x \in X} F_i(\bar{x})$ и $F_i^{\max} \neq 0$. В этом случае требуется минимизировать величину отклонения каждого критерия от его оптимального значения. При таком формировании обобщенного критерия можно добиться высоких показателей по одним критериям за счет ухудшения показателей по другим.

На некоторые частные критерии могут быть наложены ограничения

$$F_i(\bar{x}) \geq F_{i \text{ доп}}. \quad (10)$$

Тогда исходная многокритериальная задача может быть преобразована к виду (6) или (7) с дополнением системы ограничением вида (8).

Решение многокритериальных задач зависит от выбора весовых коэффициентов. Для лица, принимающего решения, важно уметь не только решать многокритериальные задачи, но и сравнивать полученные решения между собой с целью выделения наиболее оптимальных. Одним из критериев сравнения может быть критерий Парето.

Решение называется оптимальным по *Парето*, если не существует никакого другого решения, улучшающего значение одного из критериев и неухудшающего значения остальных критериев. Так как Парето-оптимальное решение может быть не единственным, то возникает понятие Парето-оптимального множества решений.

При определении Парето-оптимального множества полезно изобразить на графике изменения допустимых значений критериев. Так, в одномерном случае, когда критерии зависят от одной переменной (см. рис.2), Парето-оптимальное множество состоит из одной точки, соответствующей максимальным значениям критериев, а на рис. 3. Парето-оптимальным является все множество решений.

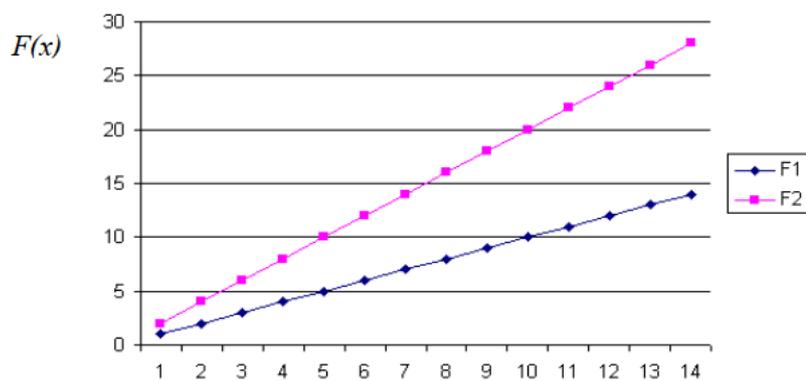


Рис.2. Значения критериев F1 и F2
(Парето-оптимальное множество – одна точка x)

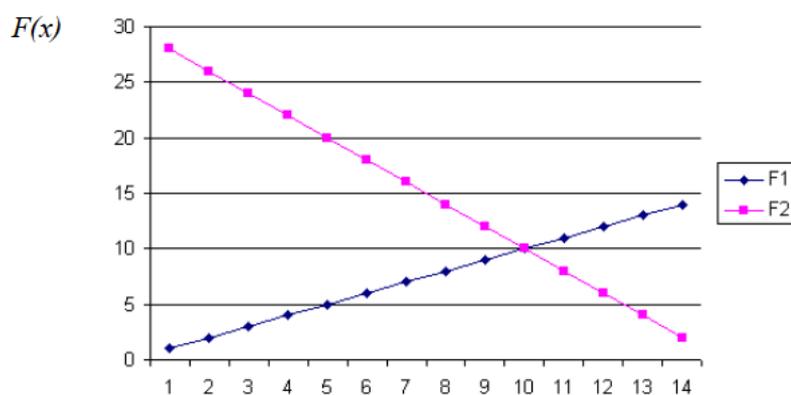


Рис. 3. Значения критериев F1 и F2
(Парето-оптимальное множество – все возможные решения)

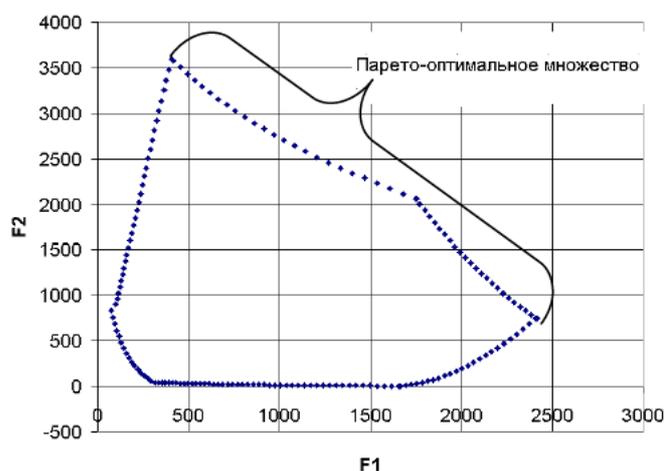


Рис. 4. Нахождение Парето-оптимального множества в координатах критериев F1 и F2

В случае, когда критерии зависят более, чем от одной переменной удобно изобразить множество значений критериев в координатах F1 и F2 (рис. 4). Если критерии F1 и F2 необходимо максимизировать, то Парето-оптимальным множеством является граница области допустимых значений, отмеченная на рис.4 фигурной скобкой.

УДК 621.322

В.М. Степанов, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-54-50,

eists@rambler.ru (Россия, Тула, ТулГУ),

П.А. Борисов, магистр, (4872) 35-54-50,

eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ ПОВРЕЖДЁННЫХ УЧАСТКОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35-500 КВ

Выполнен анализ методов диагностирования технического состояния и определения мест повреждения высоковольтных кабельных линий.

Ключевые слова: кабель, повреждение, надежность.

Силовой кабель - кабель, применяемый для передачи электроэнергии, трехфазного тока от трансформаторных подстанций к коммунальным и транспортным объектам, к промышленным предприятиям и другим. Применяется в сухих или влажных помещениях в кабельных каналах под штукатуркой или поверх нее, в земле, шахтах и прочих.

Современные силовые кабели, в зависимости от условий использования, имеют широкое разнообразие типов, размеров и используемых материалов.

Кабельные линии высокого напряжения получили широкое распространение в России наряду с высоковольтными воздушными линиями электропередач. В сравнении с воздушными кабельные линии электропередач имеют ряд преимуществ, например неподверженность кабельных сетей атмосферным явлениям, а также возможность прокладки кабельных линий в условиях, где строительство воздушных линий затруднено либо невозможно. Но вместе с этим кабельные линии имеют и ряд недостатков: более дорогое строительство, невозможность визуальной оценки состояния линии и др.

Одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации кабельных линий электропередач является диагностика технического состояния силовых кабелей и как частный случай определение местоположения повреждения кабеля в случае аварийных режимов.

Основные виды повреждений кабелей — это механические повреждения, возникающие при производстве земляных работ, и дефекты прокладки кабеля и монтажа муфт, эксплуатации кабельной линии. Своевременное выявление дефектов изоляции кабеля и муфт является задачей периодических профилактических испытаний кабельных линий.

Повреждения кабельных линий носят различный характер и могут быть разделены на следующие виды:

- повреждение изоляции, вызывающее замыкание одной жилы на землю;
- повреждение изоляции, вызывающее замыкание двух или трех жил на землю, двух или трех жил между собой в одном или разных местах;

- обрыв одной или трех жил без заземления или с заземлением, как оборванных, так и необорванных.

Согласно теории переходных процессов при коротком замыкании возникает переходный процесс, во время протекания которого возникает внезапное увеличение значений токов в фазах, называемое ударными токами. Во время переходного процесса автоматика, установленная на подстанции отключает эти линии с ударными токами, но в результате остаётся проблема точного определения местонахождения повреждённого участка.

На сегодняшний день существует достаточно много способов определения местонахождения повреждённых участков кабельных сетей, но наиболее эффективным является метод определения местоположения повреждённого участка с помощью метода блуждающих волн.

При коротком замыкании в месте повреждения кабеля возникает точка, из которой в обе стороны распространяются высокочастотные волны, называемые блуждающими волнами. Скорость их распространения, учитывая факт, что эти волны не искажаются при распространении, определяется посредством формул линии без искажений:

Для того, чтобы линия была неискажающей, коэффициент затухания α и скорость волны v не должны зависеть от частоты, это возможно лишь при следующем условии:

$$\frac{R_0}{L_0} = \frac{G_0}{C_0}, \quad (1)$$

для сокращения записи обозначим:

$$\frac{R_0}{L_0} = \frac{G_0}{C_0} = k. \quad (2)$$

По определению:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z_0 \cdot Y_0}. \quad (3)$$

Но

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 = L_0 \cdot (k + j\omega), \quad (4)$$

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0 = C_0 \cdot (k + j\omega) \quad (5)$$

и

$$\gamma = (k + j\omega) \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0}. \quad (6)$$

Следовательно:

$$\alpha = k \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0}, \quad (7)$$

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0}. \quad (8)$$

Отсюда следует:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}}. \quad (9)$$

Учитывая этот факт необходимо выделить из спектра блуждающих волн одну наименее искажённую волну для наиболее точного определения местоположения повреждённого участка, которая определяется экспериментальным путём.

Высокочастотные сигналы блуждающих волн могут быть напрямую определены с помощью трансформаторов тока без излишней индуктивной составляющей сопротивления вторичной обмотки, так как ёмкость вторичной обмотки трансформатора тока оказывает большой эффект на восприятие трансформатором тока высокочастотных токовых сигналов.

Далее экспериментальным путём с помощью приборов записи высокочастотных сигналов, подключённых к линии через трансформаторы тока, устанавливаемые на шинах, к которым подключены оба конца кабельной линии снимаются диаграммы высокочастотных сигналов, т.е. получив записи сигналов блуждающих волн, становится известно время, которое необходимо для преодоления сигналом расстояния от точки места повреждения до конца линии, а зная время и скорость волны, можно вычислить расстояние.

Вычисление местоположения точки повреждения кабеля вычисляется методом разности времени появления сигналов на приборах, установленных на концах кабельной линии:

$$M_1 = \frac{L + (t_1 - t_2) \cdot v}{2}, \quad (9)$$

где M_1 - местоположение повреждённого участка от подстанции 1, L - длина кабельной линии, v - скорость распространения блуждающей волны, t_1 - время преодоления расстояния от повреждённого участка до подстанции 1,

t_2 - время преодоления расстояния от повреждённого участка до подстанции 2 соответственно.

П.А.Борисов, магистр, (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

УСТРОЙСТВА ТРАССИРОВКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35-500 КВ

Выполнен анализ методов устройств трассировки высоковольтных кабельных линий напряжением 35-500 кВ.

Ключевые слова: кабель, повреждение, надежность.

Одним из основных проблем эксплуатации кабельных линий, особенно кабельных сетей, ранее построенных, является факт, что их местонахождение, возможно определить только по картам-схемам. К сожалению, существуют факты порчи, утери, хищения документации, вследствие чего определение местоположения проложенного кабеля становится крайне затруднительным.

Ответом на эту проблему является создание электронных карт-схем, вследствие чего возникает вопрос о трассировке кабельных линий. Для трассировки кабельных сетей возникает вопрос мобильных устройств трассировки с помощью роботизированных мобильных платформ.

На сегодняшний день наиболее распространённым методом трассировки является индукционный метод, основанный на улавливании магнитного поля над кабелем, по которому пропускается ток частотой 800—1200 Гц. Метод применяют во всех случаях, когда в месте повреждения кабеля удастся получить электрическое соединение двух жил через малое переходное сопротивление в одном месте. Метод обеспечивает достаточно высокую точность и широко распространён в практике измерений. Индукционным методом можно определить место повреждения кабеля, трассу кабеля, нужный кабель в пучке других кабелей, место расположения муфт на трассе, глубину заложения кабеля.

При определении трассы кабеля один вывод генератора звуковой частоты присоединяют к неповрежденной жиле кабеля, другой — к заземленной оболочке измеряемого кабеля. Противоположный конец используемой жилы также заземляется. Ток генератора устанавливается от 50 мА до нескольких ампер. При наличии сильных помех или большой глубине залегания кабеля ток генератора приходится увеличивать до 15—20 А. Силовые линии магнитного поля системы токов «жила—земля» имеют форму концентрических окружностей. Если ось приемной рамки кабелеискателя расположена *горизонтально* в плоскости концентрического поля, максимальная э. д. с. в приемной рамке будет наводиться над кабелем, так как витки рамки пересекаются максимальным магнитным потоком. При перемещении рамки в стороны от кабеля э. д. с. убывает. Это свойство

используется для ориентировочного нахождения трассы. Если ось рамки расположена *вертикально*, то точно над кабелем э.д. с. равна нулю, так как витки рамки не пересекаются магнитным потоком. При перемещении рамки в стороны от кабеля э. д. с. будет резко возрастать и затем медленно убывать. Это свойство используется для точного определения трассы кабеля. При расположении оси рамки кабелеискателя параллельно оси кабеля э. д. с. равна нулю.

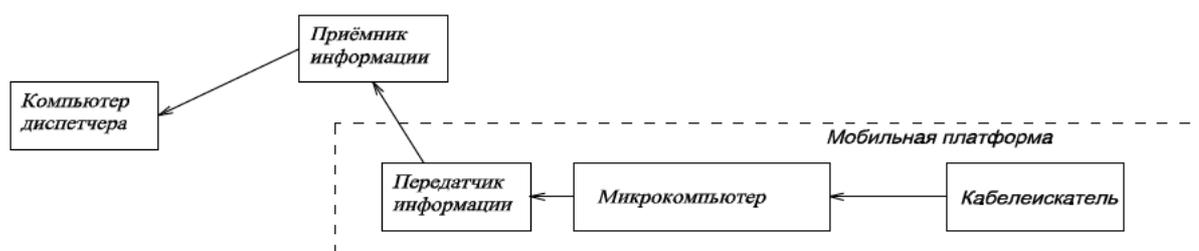


Рис.1 Состав объектов трассировки

При создании необходимо ориентироваться на индукционный метод трассировки кабеля. Также при создании платформы следует оснастить платформу системой навигации типа GPS, благодаря которой можно будет отслеживать точное местоположение платформы. Платформа, оснащенная микрокомпьютером, обрабатывает сигнал с кабелеискателя, движется строго по маршруту прокладки исследуемого кабеля, система навигации работает в режиме записи маршрута платформы, на компьютер диспетчера поступает онлайн запись маршрута платформы, соответственно с маршрутом проложенного кабеля. После окончания трассировки исследуемого кабеля маршрут проложенного кабеля сохраняется.

УДК 621.321

В.Г.Галяткина, студент, (4872) 35-54-50,
eists@rambler.ru (Россия. Тула, ТулГУ),

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Выполнен анализ методов расчета токов короткого замыкания в высоковольтных кабельных сетях.

Ключевые слова: кабель, повреждение, ток короткого замыкания.

При возникновении к. з. в кабельной сети нарушается установившийся режим работы системы ПЧ-КС-АД. В месте возникновения к. з. появляется несимметрия напряжений и возникает переходный процесс. Уравнения, описывающие режим к. з. системы ПЧ-КС-АД получены на основе схемы замещения этой системы для режима к. з., которая включает преобразователь частоты (ПЧ), участок КС с параметрами $R_{кл}$ $L_{кл}$ и известную схему

замещения АД (1). Особенностью модели является рассмотрение двух двигательного привода. Положение точки к. з. в КС между ПЧ и АД характеризуется отношением длины кабеля от АД до точки несимметрии к полной длине кабеля - k . Уравнения для переходных процессов при к. з. в системе ПЧ-КС-АД имеют вид:

до точки несимметрии:

$$\begin{aligned} DI_B &= \Theta(I_B) \cdot (E_B - U_d - R_\phi \cdot I_B) / L_\phi; \\ DU_d &= (I_B - I_d) / C_\phi; \\ U_{п=\alpha} &= (1-k) \cdot R_{кп} \cdot I'_{л\alpha} + (1-k) \cdot L_{кп} \cdot DI'_{л\alpha} + U'_{л\alpha}; \\ U_{п=\beta} &= (1-k) \cdot R_{кп} \cdot I'_{л\beta} + (1-k) \cdot L_{кп} \cdot DI'_{л\beta} + U'_{л\beta}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_{кп}$, $L_{кп}$ - активное сопротивление и индуктивность кабеля от ПЧ до зажимов двигателя; I'_n - ток в кабеле от ПЧ до точки не симметрии; U'_n - напряжение в точке несимметрии;

после точки не симметрии:

$$\begin{aligned} U''_{л\alpha} &= k \cdot R_{кп} \cdot I''_{л\alpha} + k \cdot L_{кп} \cdot DI''_{л\alpha} + U_{ад\alpha}; \\ U''_{л\beta} &= k \cdot R_{кп} \cdot I''_{л\beta} + k \cdot L_{кп} \cdot DI''_{л\beta} + U_{ад\beta}, \end{aligned} \quad (2)$$

где U''_n - напряжение после точки не симметрии; I''_n - ток в кабеле, протекающий от точки не симметрии до зажимов АД; $U_{АД}$ - напряжение на зажимах двигателя.

Уравнения для переходного процесса в обмотках статора АД(1):

для первого АД:

$$\begin{aligned} U_{ад\alpha 1} &= D\Psi_{s\alpha 1} + I_{s\alpha 1} \cdot R_{s1}; \\ U_{ад\beta 1} &= D\Psi_{s\beta 1} + I_{s\beta 1} \cdot R_{s1}; \end{aligned} \quad (3)$$

для второго АД:

$$\begin{aligned} U_{ад\alpha 2} &= D\Psi_{s\alpha 2} + I_{s\alpha 2} \cdot R_{s2}; \\ U_{ад\beta 2} &= D\Psi_{s\beta 2} + I_{s\beta 2} \cdot R_{s2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Потокосцепления ротора, токи статора, ротора и частота вращения электродвигателя находятся из уравнений:

для первого АД:

$$\begin{aligned} D\Psi_{s\alpha 1} &= U_{s\alpha 1} - I_{s\alpha 1} \cdot R_{s1}; \\ D\Psi_{s\beta 1} &= U_{s\beta 1} - I_{s\beta 1} \cdot R_{s1}; \\ D\Psi_{p\alpha 1} &= -I_{p\alpha 1} \cdot R_{p1} - p_n \cdot \omega_p \cdot \Psi_{p\beta 1}; \\ D\Psi_{p\beta 1} &= -I_{p\beta 1} \cdot R_{p1} + p_n \cdot \omega_p \cdot \Psi_{p\alpha 1}, \end{aligned} \quad (5)$$

и соответственно для второго АД:

$$\begin{aligned} D\Psi_{s\alpha 2} &= U_{s\alpha 2} - I_{s\alpha 2} \cdot R_{s2}; \\ D\Psi_{s\beta 2} &= U_{s\beta 2} - I_{s\beta 2} \cdot R_{s2}; \\ D\Psi_{p\alpha 2} &= -I_{p\alpha 2} \cdot R_{p2} - p_n \cdot \omega_p \cdot \Psi_{p\beta 2}; \\ D\Psi_{p\beta 2} &= -I_{p\beta 2} \cdot R_{p2} + p_n \cdot \omega_p \cdot \Psi_{p\alpha 2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Моменты АД записываются в виде:

$$M_1 = 3p_n \cdot (\Psi_{s\alpha 1} \cdot I_{s\beta 1} - \Psi_{s\beta 1} \cdot I_{s\alpha 1}) / 2, \quad (7)$$

$$M_2 = 3p_n \cdot (\Psi_{s\alpha 2} \cdot I_{s\beta 2} - \Psi_{s\beta 2} \cdot I_{s\alpha 2}) / 2, \quad (8)$$

где p_n - число пар полюсов АД.

Индексы α и β соответствуют проекциям соответствующих величин на этой оси.

Так как на валу АД имеется рабочий механизм, то необходимо к уравнениям (1)-(8) добавить уравнение механического движения:

$$D\omega_p = [M_1 + M_2 - M_c(\omega_p)] / J, \quad (9)$$

где J - суммарный момент инерции ротора двигателя и механизма, приведённый к ротору.

Проекции токов АД на оси α и β в переходном режиме находятся по составляющим, определяемым через потокосцепления:

для первого АД:

$$\begin{aligned} I_{s\alpha 1} &= L_{p1} \cdot (\Psi_{s\alpha 1} - L_m \cdot \Psi_{p\alpha 1}) / L_{\sigma 1}; \\ I_{s\beta 1} &= L_{p1} \cdot (\Psi_{s\beta 1} - L_m \cdot \Psi_{p\beta 1}) / L_{\sigma 1}; \\ I_{p\alpha 1} &= L_{s1} \cdot (\Psi_{p\alpha 1} - L_m \cdot \Psi_{s\alpha 1}) / L_{\sigma 1}; \\ I_{p\beta 1} &= L_{s1} \cdot (\Psi_{p\beta 1} - L_m \cdot \Psi_{s\beta 1}) / L_{\sigma 1}, \end{aligned} \quad (10)$$

и соответственно для второго АД:

$$\begin{aligned} I_{s\alpha 2} &= L_{p2} \cdot (\Psi_{s\alpha 2} - L_m \cdot \Psi_{p\alpha 2}) / L_{\sigma 2}; \\ I_{s\beta 2} &= L_{p2} \cdot (\Psi_{s\beta 2} - L_m \cdot \Psi_{p\beta 2}) / L_{\sigma 2}; \\ I_{p\alpha 2} &= L_{s2} \cdot (\Psi_{p\alpha 2} - L_m \cdot \Psi_{s\alpha 2}) / L_{\sigma 2}; \\ I_{p\beta 2} &= L_{s2} \cdot (\Psi_{p\beta 2} - L_m \cdot \Psi_{s\beta 2}) / L_{\sigma 2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $L_{\sigma} = L_s \cdot L_p - L_m^2$.

Мгновенные значения фазных токов находились по уравнениям:

$$\begin{aligned} i_a &= I_{\alpha} \\ i_b &= (-I_{\alpha}/2) + (\sqrt{3}I_{\beta})/2 \\ i_c &= (-I_{\alpha}/2) - (\sqrt{3}I_{\beta})/2 \end{aligned} \quad (12)$$

Решение системы уравнений (1)-(12) осуществлялось на ЭВМ при изменении параметров: частоты ПЧ; длины кабеля от ПЧ до места к. з.; уровня нагрузки АД.

В результате исследования к. з. в КС установлено, что при возникновении к. з. АД переходят в генераторный режим и начинают отдавать энергию в место повреждения. Для оценки режима работы АД (двигательный или генераторный) подходит мгновенное значение фазного тока.

Кроме того из анализа полученных результатов установлены следующие закономерности переходных процессов.

Трёхфазное короткое замыкание:

в момент короткого замыкания происходит резкий скачок тока во всех фазах, связанный с тем, что происходит разряд ёмкости фильтра. Величина скачка зависит от длины кабеля, места к.з. и частоты выходного напряжения ПЧ. При длине кабеля 100м и частоте 50Гц наблюдается самый большой скачок тока к. з. равный 5000А, минимальное значение тока к. з. наблюдается на частоте 2Гц и равно 101А. Минимальное значение тока к. з. при длине кабеля 500м: на частоте 2Гц - 45А, а на частоте 70Гц - 490А. При длине

кабеля равной 300м наблюдаются значения тока равные промежуточным значениям между значениями при длине 100 и 500м. Характер изменения тока при трёхфазном коротком замыкании следующий: в момент замыкания происходит резкое возрастание тока затем он со стороны ПЧ принимает периодический характер т.к. ПЧ работает по прежнему, а со стороны АД затухает, т.к. АД останавливается. Величина скачка также зависит сильно от места к.з. Так чем ближе к ПЧ произошло к.з. тем больше ток, чем дальше от него тем меньше.

Двухфазное короткое замыкание:

в момент короткого замыкания в повреждённых фазах происходит скачок тока к. з., связанный с тем, что происходит разряд ёмкости фильтра. Величина скачка зависит от длины кабеля, места к.з. и частоты выходного напряжения ПЧ. При длине кабеля 100м и частоте 50Гц наблюдается самый большой скачок тока к. з. равный 3000А, минимальное значение тока наблюдается на частоте 2Гц и равно 90А. Минимальное значение тока к. з. при длине кабеля 500м: на частоте 2Гц - 40А, а на частоте 70Гц - 250А. При длине кабеля равной 300м наблюдаются значения тока к. з. равные промежуточным значениям между значениями при длине 100 и 500м. Характер изменения тока к. з. при двухфазном коротком замыкании следующий: в момент замыкания происходит резкое возрастание тока затем он со стороны ПЧ принимает периодический характер т.к. ПЧ работает по прежнему, а со стороны АД затухает, т.к. АД останавливается. На основании вышеизложенного мы можем сделать следующие выводы: в момент к.з. фазный ток растёт; после к.з. фазный ток со стороны ПЧ становится периодическим, а со стороны АД затухает; по сравнению с однодвигательным ЧРЭП значения и характер фазных токов не существенно меняются, только момент двигателя увеличивается в два раза.

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующий вывод: в качестве параметров дифференциальной защиты от аварийных режимов в ЧРЭП необходимо использовать мгновенные значения фазных токов в трёх точках линии ПЧ - кабельная сеть - АД: на выходе ПЧ и входах АД1 и АД2.

Литература

1. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода : учебник сред. спец. учеб. заведений / В.В. Москаленко .— М. : Инфра-М, 2007 .— 208с. : ил
2. Алиев, И.И. Электротехнический справочник / И.И. Алиев .— 4-е изд., испр. — М. : РадиоСофт, 2002 .— 383с. : ил.
3. Горячев, О.В. Экспериментальное исследование динамических характеристик системы "Автономный инвертор напряжения - асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором" / О.В. Горячев [и др.] // Вестник Тульского государственного университета. Сер. Системы управления/ТулГУ .— 2007 .— Вып.1 .— С.80-86 .

УДК 61.313

О.А. Кузнецова, канд. техн. наук, (4872) 35-54-50, o.a.kuznetsova@mail.ru,
(Россия, Тула, ТулГУ),

С.Н. Абашин, магистр, sabashin3113@gmail.com, (4872) 35-54-50, (Россия,
Тула, ТулГУ)

М.А. Лосев, магистр, malosa@mail.ru, (4872) 35-54-50, (Россия, Тула, ТулГУ)

МОДЕЛЬ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЗВЕНОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Представлена модель для симуляции управления звеном второго порядка.

Ключевые слова: оптимальное управление, моделирование

Электрический привод в общем виде можно представить уравнением (1), где T_1 - электромагнитная постоянная времени, T_2 - электромеханическая постоянная времени, u - вектор управления, x - состояние привода (объекта управления), k - коэффициент усиления.

Дифференциальное уравнение:

$$T_1 \cdot T_2 \cdot \ddot{x}(t) + (T_1 + T_2) \cdot \dot{x}(t) + x(t) = k \cdot u(t) \quad (1)$$

Требуется найти вектор управления $u(t)$ и соответствующую фазовую траекторию $x(t)$ перевода объекта из начального состояния

$$x(t_0) = 0$$

в конечное

$$x(t_k) = x_k$$

с минимальным значением функционала

$$I = \int_{t_0}^{t_n} 1 \cdot dt = \min \quad (2)$$

По теореме об n интервалах для оптимального управления необходимо иметь два интервала управления и одну смену знака. Обозначим конец второго интервала t_2 , момент переключения - t_2 .

Корни характеристического уравнения: $\alpha_1 = -\frac{1}{T_1}$; $\alpha_2 = -\frac{1}{T_2}$. Примем, что первый интервал положительный, а второй – отрицательный.

Стыкуя решения уравнения на моменты переключений t_1 и t_2 , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \left(1 + \frac{x_k}{kU_{\max}}\right) e^{\alpha_1 t_2} - 2e^{\alpha_1 t_1} + 1 = 0 \\ \left(1 + \frac{x_k}{kU_{\max}}\right) e^{\alpha_2 t_2} - 2e^{\alpha_2 t_1} + 1 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Получаем систему из двух уравнений с двумя неизвестными.

Приведем решение по данному методу с помощью программы MATLAB для функции с коэффициентами:

$$T_1 = 0,4; T_2 = 0,9; k = 2; U_{\max} = 2$$

Корни характеристического уравнения:

$$\alpha_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,4} = 2,5; \alpha_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,9} = 1,11.$$

Подставляем данные в систему для определения моментов переключения (1.3) и получаем:

$$t_1 = 0,855$$

$$t_2 = 0,21$$

Полученный результат проверим с помощью пакета Simulink.

Для задания управляющего сигнала с двумя интервалами управления с моментами переключения t_1 и t_2 воспользуемся блоком **Signal Builder**.

Окно настройки блока **Signal Builder** выглядит следующим образом:

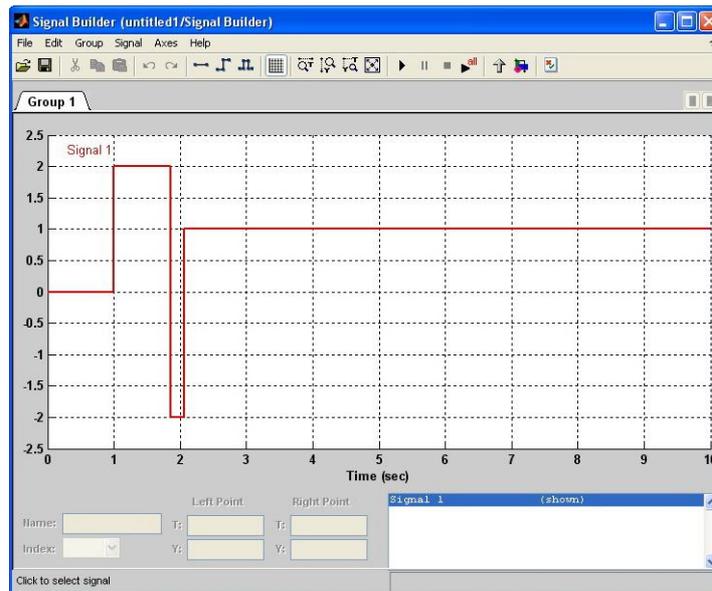


Рис. 1. Построение сигнала управления в блоке **Signal Builder**

В модели исследуемое звено представлено блоком **Transfer Fcn** (**Передаточная функция**). Для отображения траектории изменения выходного сигнала системы используется блок **Scope**. Схема симуляционной модели представлена на рис. 2.

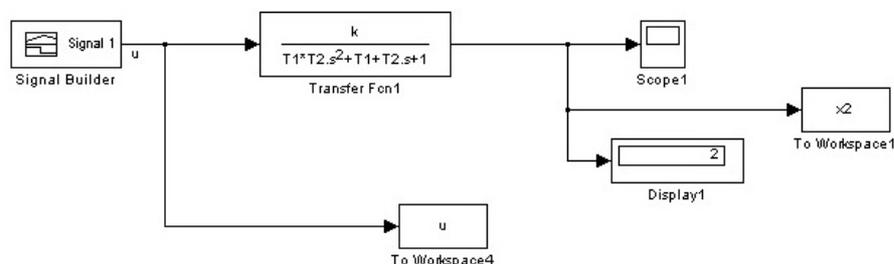


Рис.2.

Схема модели для симуляции управления звеном второго порядка

Траектории выходного сигнала при подаче на вход скачкообразного сигнала ($x1$), при подаче на вход определенного нами управления ($x1$) и сигнала управления (u) показаны на рис. 3.

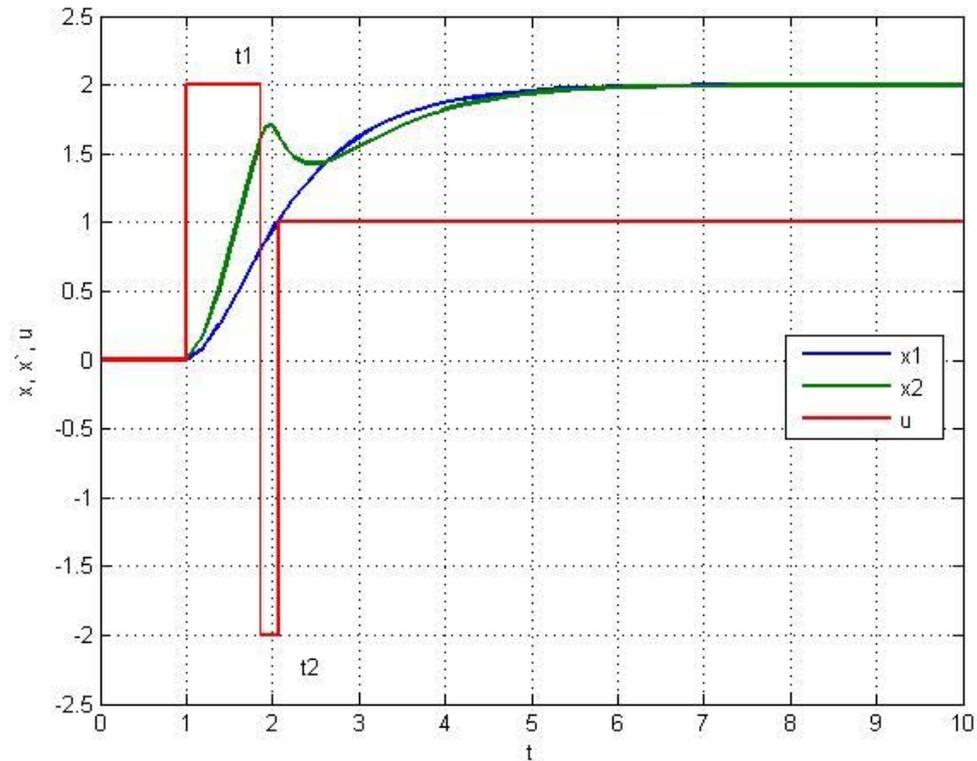


Рис.3. Траектории оптимального управления, выходного сигнала при скачкообразном управляющем воздействии и оптимальном управляющем сигнале

Список литературы

1. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин [и др.] - М.: Наука, 1969. - 384 с.
2. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 712 с.
3. Кузнецова О.А. Многокритериальная оптимизация асинхронного электропривода: Монография / Под ред. В.А. Сушкина. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 104 с.
4. Кузнецова О.А. Формирование оптимального управления асинхронным электроприводом средствами АМИПП / О.А. Кузнецова, В.А. Сушкин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч.1. С.160-167.

УДК 61.313

О.А. Кузнецова, канд. техн. наук, (4872) 35-54-50, o.a.kuznetsova@mail.ru, (Россия, Тула, ТулГУ),

С.Н. Абашин, магистр, sabashin3113@gmail.com, (4872) 35-54-50, (Россия, Тула, ТулГУ)

М.А. Лосев, магистр, malosa@mail.ru, (4872) 35-54-50, (Россия, Тула, ТулГУ)

ФАЗОВАЯ ТРАЕКТОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Рассмотрено построение фазовой траектории электропривода.

Ключевые слова: оптимальное управление, электропривод

Состояние электрического привода в пространстве состояний может быть определено координатами x, \dot{x}, \ddot{x} .

Электрический привод в общем виде можно представить уравнением второго порядка, где T_1 - электромагнитная постоянная времени, T_2 - электромеханическая постоянная времени, u - вектор управления, x - состояние привода (объекта управления), k - коэффициент усиления.

Дифференциальное уравнение звена выглядит следующим образом:

$$T_1 \cdot T_2 \cdot \ddot{x} + (T_1 + T_2) \cdot \dot{x} + x = u$$

Решением данного уравнения является выражение:

$$x = C_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + C_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}$$

Определим производные от выходной функции объекта:

$$\dot{x} = -\frac{C_1}{T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{C_2}{T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}; \quad \ddot{x} = \frac{C_1}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{C_2}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}$$

Преобразуем выражение для x :

$$C_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} = x - C_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}$$

Подставляем полученный результат в два других уравнения:

$$\dot{x} = -\frac{C_1}{T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{x - C_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}}{T_2}; \quad \ddot{x} = \frac{C_1}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{x - C_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}}{T_2^2}$$

Преобразуем выражение для \dot{x} :

$$\dot{x} = -\frac{C_1}{T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{x}{T_2} + \frac{-C_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}}{T_2}$$

$$\dot{x} = -C_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} \left(\frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_1} \right) - \frac{x}{T_2}$$

$$C_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} = \frac{-\frac{x}{T_2} - \dot{x}}{\frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_1}}$$

Полученный результат подставляем в выражение для \ddot{x} и после преобразований получим:

$$\ddot{x} = \frac{(x + T_2 \dot{x}) \cdot (T_1 - T_2)}{T_1^2 T_2 (T_2 - T_1)} + \frac{x}{T_2^2} - \frac{(x + T_2 \dot{x}) \cdot (T_1 - T_2)}{T_2^3 (T_2 - T_1)}$$

$$\ddot{x} = \frac{T_2^2 (x + T_2 \dot{x}) \cdot (T_1 - T_2) + x T_1^2 T_2 (T_2 - T_1) - T_1^2 (x + T_2 \dot{x}) \cdot (T_1 - T_2)}{T_1^2 T_2^3 (T_2 - T_1)}$$

Подставляя значения постоянных времени $T_1 = 0,4$ и $T_2 = 0,9$ и коэффициента усиления $k = 2$ для нашего случая, получим выражение:

$$\ddot{x} = \frac{970}{81} - \frac{97}{18}x - \frac{485}{81}\dot{x}.$$

Фазовая характеристика строится с помощью пакета Matlab и приведена на рис. 1.

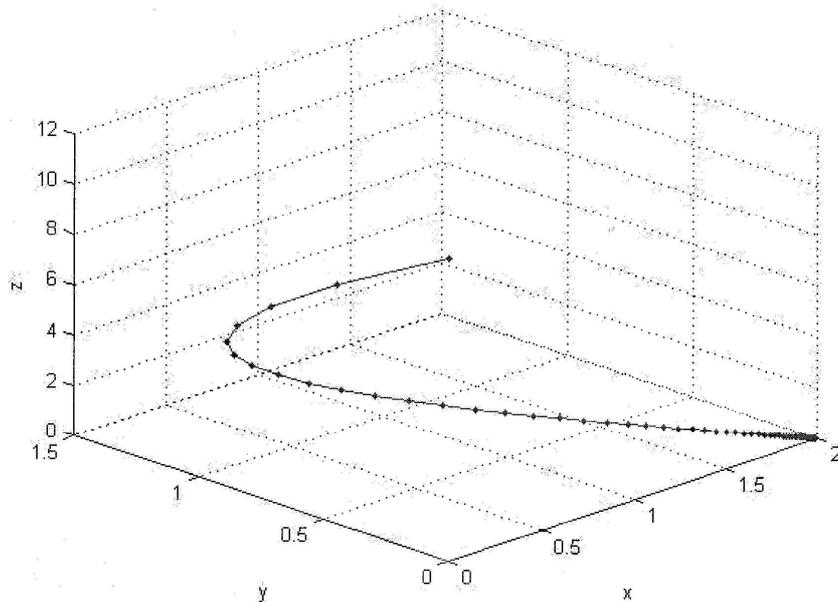


Рис. 1. Фазовая траектория электрического привода

Список литературы

1. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин [и др.] - М.: Наука, 1969. 384 с.
2. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 712 с.
3. Кузнецова О.А. Многокритериальная оптимизация асинхронного электропривода: Монография / Под ред. В.А. Сушкина. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 104 с.
4. Кузнецова О.А. Многокритериальная оптимизация электромеханических систем с асинхронным двигателем // Приводная техника, №6, 2010. С. 20-25.

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 3

Часть 5

Редактор С.Г. Лихачева

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 14.12.10
Формат бумаги 70 × 100 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 14,6. Уч.-изд. л. 12,6.
Тираж 100 экз. Заказ 364.

Тульский государственный университет
300600, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300600, г. Тула, просп. Ленина, 95