Библиотечка электротехника

В. М. Пупин

УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК

Вниманию специалистов

Вышли в свет в 2010 – 2011 годах следующие выпуски

«Библиотечки электротехника»:

Алексеев Б. А. **Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии**

Хромченко Ф. А. **Особенности и причины повреждений сварных соединений трубопроводов ТЭС (справочные материалы)**

Хромченко Ф. А. **Диагностикв для продления ресурса трубопроводов ТЭС (справочные материалы)**

Захаров О. Г. **Поиск дефектов в релейно-контакторных схемах (части 1 и 2)**

Беляев А. В. **Защита, автоматика и управление на электростанциях малой энергетики (части 1–3)**

Стандарты организации ОАО ФСК ЕЭС:

СТО 56947007-29.240.043–2010. «Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов»;

СТО 56947007-29.240.044–2010. «Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства»

Беляков Ю. С. **Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи**

Хромченко Ф. А. **Структура и свойства сварных соединений трубопроводов (справочные материалы)**

Хромченко Ф. А. **Расчет на прочность сварных соединений эксплуатирующихся трубопроводов ТЭС (справочные материалы)**

Захаров О. Г. **Источники питания для схем с цифровыми устройствами релейной защиты**

Самородов Ю. Н. **Риски повреждения турбогенераторов (части 1–2)**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ». Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы**, а также в редакции.

Подписной индекс «Библиотечки электротехника» — *приложения к журналу «Энергетик»*

88983

Адрес редакции
журнала «Энергетик»:
115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.
Телефон (495) 675-19-06.
E-mail: energetick@mail.ru

Библиотечка электротехника

Приложение к журналу «Энергетик»

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 5 (149)

В. М. Пупин

УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Москва

НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик»

2011

УДК 658.26: 621.3.016
ББК 31.264.5:31.29.5
П18

Главный редактор журнала «Энергетик» А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

«Библиотечки электротехника»

И. И. Батюк (*зам. председателя*), Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев, В. А. Забегалов, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев, Н. В. Лисицын, В. И. Пуляев, А. И. Таджибаев

Пупин В. М.

П18 Устройства защиты от провалов напряжения. — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011. — 100 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Вып. 5 (149)].

Рассмотрены вопросы взаимоотношений энергосистемы и потребителей, обусловленные нарушениями в энергосистеме и системе электроснабжения, и последствия таких нарушений в новых экономических условиях. Собрана, обработана и классифицирована статистика по провалам напряжения на металлургических и нефтехимических предприятиях. Дана классификация и принцип работы устройств защиты от провалов напряжения. Приведены допустимые значения отклонений напряжения по стандарту ITIC. Подробно рассмотрены схемы работы, включения и технические характеристики динамических компенсаторов искажений напряжения (ДКИН). Приведены осциллограммы работы устройств ДКИН при возникновении провалов напряжения разной величины и длительности вследствие однофазных, междуфазных и трехфазных коротких замыканий. Приведена методика оценки экономического эффекта от внедрения ДКИН.

Предназначена для специалистов проектных организаций и служб эксплуатации с целью оказания практической помощи при выборе устройств защиты от провалов напряжения нагрузки напряжением от 0,38 до 35 кВ.

ISSN 0013-7278 © НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2011

Предисловие

Качество электрической энергии является ключевой основой для экономического роста и повышения уровней производительности. Работа микропроцессорных систем управления, устройств телекоммуникаций, дорогостоящего медицинского оборудования, преобразовательных устройств частоты и напряжения, погружных насосов часто прерывается очень короткими по продолжительности провалами питающего напряжения, которые ведут к большим и дорогостоящим экономическим ущербам, хотя они происходят за миллисекунды.

Существующий рынок решений по улучшению качества электрической энергии сосредоточен на старой системе взглядов по защите предприятий от двух – трех отключений электроэнергии в год, хотя в настоящее время их происходит до 40.

Проблема, связанная с воздействием кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) на работу потребителей электрической энергии, становится все более острой во всех странах по мере усложнения технологических процессов предприятий и использования средств автоматизации. Основными причинами нарушения надежности электроснабжения потребителей являются короткие замыкания (КЗ) в схемах внешнего (110, 220, 330, 500 кВ) и внутреннего электроснабжения (6, 10 кВ), пуск и самозапуск мощных электродвигателей, ошибочное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Длительность и степень возмущений зависят от конфигурации энергосистемы и времени, необходимого для работы РЗА. Причинами КНЭ являются:

1) *внешние (не находящиеся в цепи питания потребителей) КЗ.* После отключения таких КЗ восстанавливается нормальное электроснабжение, однако во время КЗ в системе электроснабжения (СЭС) возникают провалы напряжения, которые могут пагубно сказаться на функционировании потребителей после восстановления электроснабжения. На долю таких КЗ приходится около

90% общего числа КНЭ, поэтому в первую очередь необходимо обеспечить сохранение функциональных возможностей потребителей при таких нарушениях. Защита от последствий таких КЗ возлагается на самих потребителей электрической энергии;

2) *КЗ в цепи питания потребителей.* После отключения таких КЗ для восстановления нормального электроснабжения, как правило, требуется работа автоматики ввода резервного электропитания (АВР), поэтому длительность КНЭ при таких КЗ существенно больше, чем при внешних КЗ. Доля этих КНЭ составляет 7 – 8 % общего числа. Защита от последствий таких КЗ возлагается только на самих потребителей электрической энергии;

3) *несанкционированное отключение в цепи электропитания.* Причинами таких отключений являются: человеческий фактор, работа технологических защит (например, от понижения уровня масла) и ряд других. После такого нарушения электроснабжения требуется работа АВР, однако выявление таких КНЭ является сложной задачей для потребителей электроэнергии, поскольку напряжение на их вводах сохраняется длительное время за счет электродвигательной нагрузки. Доля таких КНЭ составляет 2 – 3 % от общего числа.

Потребители электрической энергии по способу сохранения их функциональных возможностей при КНЭ можно классифицировать следующим образом:

1) *высоковольтные (напряжением 6(10) кВ) электрические двигатели.* Основной причиной нарушения функциональных возможностей двигателей после КНЭ (вращение механизма в диапазоне нормальных скоростей при требуемых моментах на валу) является нарушение скоростного режима, вызванного невозможностью передавать механизму необходимую мощность. Во время КНЭ электродвигатели тормозятся, а после восстановления нормального электроснабжения могут потреблять из сети токи $I = (5 \div 7)I_{ном}$ в основном за счет реактивной составляющей. Увеличение потребления реактивной мощности из сети приводит к снижению напряжения на двигателях после КНЭ, которое и может служить причиной нарушения функциональных возможностей двигателей. Режим после КНЭ называется самозапуском электрических двигателей. Исследования показывают, что успешный самозапуск двигателей возможен лишь при суммарной номинальной мощности двигателей 0,2 – 0,3 мощности питающего трансформатора [16], в то время как суммарная мощность электродвигательной нагрузки может быть соизмерима с мощностью питающего трансформатора;

2) *низковольтные (напряжением 380 В) электрические двигатели.* Значительную часть таких двигателей составляют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, у которых особых проблем с самозапуском нет. Однако эти двигатели подключаются к сети магнитными пускателями, которые удерживаются во включенном состоянии электромагнитами, подключенными к силовой сети. При провалах напряжения (в период КНЭ) происходит массовое отключение электрических двигателей, что может служить причиной нарушений технологических процессов производств;

3) *устройства управления элементами электротехнических систем* (например, частотными преобразователями) *и технологических процессов* производства. Такие устройства основное питание получают от электрической сети, а допустимая длительность перерыва их электроснабжения составляет $t_{доп} < 0{,}01$ с, поэтому любой провал напряжения вызывает нарушение функционирования систем управления, которые приводят в конечном итоге к нарушению технологических процессов производств.

Существуют современные методы и средства для решения перечисленных проблем. К ним относятся:

1) использование современных быстродействующих АВР (БАВР) с микропроцессорным пусковым устройством;

2) применение динамических компенсаторов искажения напряжения в качестве источников бесперебойного питания;

3) внедрение новых малозатратных устройств управления магнитными пускателями и систем автоматического каскадного самозапуска низковольтных двигателей;

4) использования новых регулируемых источников реактивной мощности на базе полностью управляемых тиристоров для устранения колебаний и провалов напряжения.

В настоящей работе рассмотрены динамические компенсаторы искажения напряжения (ДКИН) и новые регулируемые источники реактивной мощности для разработки современных технических решений в целях обеспечения надежной работы электрооборудования напряжением 380 В, 6 (10) кВ.

Замечания и пожелания по брошюре
просьба направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.
Редакция журнала «Энергетик»

Автор

Введение

В настоящее время потребителей электроэнергии в первую очередь интересует, как скажется некачественная электроэнергия на технико-экономических показателях работы предприятия и системы электроснабжения. Физической основой для установления допустимых нормальных и предельных кратковременных значений основных показателей качества электрической энергии (КЭЭ) является интегральная реакция приемников электрической энергии и элементов систем электроснабжения на изменение частоты сети, а также на изменения амплитуды и формы кривой напряжения с учетом их характеристики и длительности. Результирующее воздействие КЭЭ на работу электрических потребителей и сетей подразделяется на две группы составляющих этого воздействия — электромагнитную и технологическую [1, 4, 9, 11]. Результирующее воздействие может быть как отрицательным, так и положительным с учетом реальных режимов работы электроприемников и систем электроснабжения.

В последние годы проблема качества электроснабжения становится все более актуальной из-за увеличения числа приемников, чувствительных к кратковременным нарушениям электроснабжения, искажению формы кривой как питающего напряжения, так и тока [2, 4]. Если в экономике XX века качество электрической энергии измерялось числом прерываний электрической энергии (обычно 2 – 3 раза в год), то в новых условиях это определение не соответствует современному силовому оборудованию и электронике, которые чувствительны к кратковременным нарушениям длительности от 15 до 40 мс [2].

Работа электродвигателей напряжением до 1 кВ приводов маслонасосов, вентиляторов и аналогичных механизмов, включенных в технологические защиты технических процессов, микропроцессорной техники, систем телекоммуникаций, автоматизированных систем управления (АСУ) производственным процессом, дорогостоящего медицинского оборудования, стандартных блоков цифровых технологий и интернета часто прерывается очень короткими по продолжительности провалами питающего напряжения и перенапряжениями, которые происходят 20 – 30 раз в год, часто ведут к значительным экономическим ущербам, даже если они происходят за миллисекунды [2 – 4].

Во второй половине 90-х годов XX века в США и Канаде были проведены общенациональные энергетические обследования большого числа промышленных предприятий, результаты которых сыграли важное значение для разработки новых концепций защиты промышленного электрооборудования от провалов напряжения с помощью динамических компенсаторов искажений напряжения (ДКИН). Стоимость ущерба от плохого качества электрической энергии в американской экономике оценивается более чем в 50 млрд дол. в год [2, 3].

Существующие решения по улучшению качества электрической энергии основаны на старой системе взглядов и норм проектирования Правил устройства электроустановок (ПУЭ) по защите предприятий от 2 – 3 отключений электроэнергии в год, хотя в разных регионах в настоящее время их происходит от 10 до 40 [3].

Проблема, связанная с влиянием кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) на работу потребителей электрической энергии, становится все более острой во всех странах по мере усложнения технологических процессов предприятий и использования средств автоматизации. «Сегодня уровень износа оборудования в электроэнергетике составляет 70 – 80 %» и «реформа электроэнергетики не дает возможности предприятиям чувствовать уверенность в завтрашнем дне» [6].

Последние десятилетия растет количество электрических нагрузок, ухудшающих качество энергии в промышленных сетях и системах общего назначения. Внедренный ГОСТ 13109–97, руководящие документы по КЭЭ [11] не создали требуемый финансовый и технический механизм решения задачи обеспечения надежности и качества электроснабжения потребителей, так как эти материалы сначала приводят к штрафным санкциям для производителей и даже потребителей, а организации, занятые распределением энергии, не несут ответственности за глубину и длительность провалов напряжения, которые можно уменьшить путем увеличения мощности короткого замыкания и полного сопротивления сети, а также внедрением релейной защиты и автоматики со временем работы до 50 мс.

Сейчас на рынке появились полностью управляемые вентили типов IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором), GTO (запираемый тиристор) и IGCT (запираемый тиристор с интегрированным блоком управления), которые сделали воз-

можным производство преобразователей напряжения, способных повышать качество электроэнергии.

Проведенные в МЭИ(ТУ) и СПбГГИ [3, 5] исследования влияния КЭЭ показали, что при нарушении нормативных показателей качества электроэнергии (ПКЭ) сокращение срока службы силовых трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ происходит в 1,2 – 1,8 раза; асинхронных двигателей (АД) — в 1,5 – 2,5; устройств продольной емкостной компенсации (УПЕК) — в 2 – 4 раза.

Основными причинами нарушения надежности электроснабжения потребителей являются короткие замыкания (КЗ) в схемах внешнего и внутреннего электроснабжения. Провалы напряжения у потребителей настолько же неизбежны, насколько неизбежны короткие замыкания в сетях, число которых растет по мере старения и изношенности электрооборудования, поэтому следует ожидать лишь увеличения частоты возникновения провалов напряжения [6]. Кроме того, из-за значительной протяженности воздушные линии (ВЛ) электропередачи подвержены всем видам атмосферных воздействий (ветра, гроз, гололеда), которые являются причинами различных видов возмущений сетевого напряжения (вплоть до полного прекращения подачи электроэнергии). Длительность и характер возмущений зависят от схемы электроснабжения и времени работы релейной защиты и автоматики (РЗА) [2, 4, 14]. Статистика свидетельствует, что провалы напряжения глубиной более 50 % составляют лишь 10 % их общего числа; более 80 % провалов длятся десятые доли секунды [2].

Поскольку ГОСТ 13109–97 [11] не нормирует параметры провалов и импульсных перенапряжений (значение, длительность, частоту появления), то электроснабжающие организации не несут даже формальной ответственности за их появление.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Факторы, причины и статистика кратковременных нарушений электроснабжения

1.1. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ И ПРИЧИНЫ КНЭ

Вопросы взаимоотношений энергосистемы и потребителей, обусловленные нарушениями электроснабжения и последствиями таких нарушений в новых экономических условиях, очень актуальны.

К внешним факторам кратковременных нарушений электроснабжения относятся [1, 12 – 14]:

- молнии;
- сильный ветер и снежные бури;
- сервисный отказ оборудования;
- птицы;
- несчастные случаи;
- автомобили, самолеты и поезда.

Причины возможного простоя электрооборудования:

- переключения в системе промышленного электроснабжения;
- провалы напряжения;
- перенапряжения;
- импульсные напряжения;
- мгновенные прерывания напряжения;
- длительные по времени снижения напряжения.

Эксплуатационные причины останова электрооборудования:

- плохое заземление;
- электромагнитные помехи;
- гармонические помехи в сети;
- электромагнитное взаимодействие нагрузки.

Факторы, негативно влияющие на надежность электроснабжения потребителей предприятия:

- резкое снижение надежности системы внешнего электроснабжения объектов, вместо 2 – 3 отключений, которые закладывались в проектные решения, до 20 – 40 отключений в год;
- реформирование электроэнергетической отрасли, отсутствие технических и экономических механизмов повышения качества электрической энергии, разграничения зоны ответственности за КЭЭ;
- физический износ оборудования, отсталость технических решений по применению высоковольтного оборудования и устройств РЗА энергосистем и главных понижающих подстанций (ГПП) предприятий;
- недостаточное финансирование программ капитальных ремонтов, технического перевооружения и модернизации оборудования;
- снижение уровня квалификации обслуживающего персонала энергосистем, предприятий и отсутствие преемственности поколений;
- необходимость уточнения уставок РЗА ввиду существенного изменения загрузки трансформаторов ГПП и режимов работы предприятий.

Последствия перерывов электроснабжения:

- брак продукции;
- повреждение оборудования;
- снижение производительности;
- срыв поставок;
- потеря клиентов;
- травмы персонала;
- загрязнение окружающей среды.

Стоимость проблем качества электроснабжения [2]:

- США потеряли 50 млрд дол. в 2003 г. в результате нарушений качества электроснабжения (Bank of America Report);
- провал напряжения на бумажной фабрике привел к потерям в размере 250 тыс. дол. и потери впустую целого дня производства (Busines Week, June 17, 1996 г.);
- производственная компания потеряла более 3 млн дол., когда летом 1999 г. в Силиконовой долине кратковременно (на не-

сколько миллисекунд) нарушилось электроснабжение (New York Times, January, 2000 г.);

- половина всех компьютерных проблем и одна треть всех потерь данных является причиной нарушений качества электроснабжения питающей сети (Contingency Planning Research).

Для автоматизированных предприятий кратковременные нарушения электроснабжения — являются основной причиной остановов производства, снижения эффективности и производительности. Так, для автомобильного производства 2%-ное увеличение производительности всех заводов устранило бы потребность в двух новых заводах (сбережения в размере 4 млрд дол.).

1.2. СТАТИСТИКА НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ООО «ТОБОЛЬСК-НЕФТЕХИМ» И ОАО «СИБУР-ПЭТФ»

Анализ нарушений электроснабжения предприятий ОАО «Сибур-ПЭТФ» и ООО «Тобольск-нефтехим», приведших к остановам основных производств и связанных с возмущениями, возникающими в энергосистемах Единой Национальной энергетической системы (ЕНЭС), показывает резкое снижение показателей надежности энергосистем сетевых предприятий (табл. 1.1).

Анализ аварийных нарушений электроснабжения ОАО «Сибур-ПЭТФ» и ООО «Тобольск-нефтехим» позволил сделать выводы:

- очень часты кратковременные нарушения электроснабжения на ВЛ 110(220) кВ, что свидетельствует об изношенности основного оборудования и релейной зашиты линий электропередачи (ЛЭП) и говорит об отсутствии независимых источников электроснабжения предприятий;
- сильное воздействие на технологический процесс оказывает КНЭ на шинах 0,4 кВ, что требует внедрения ДКИН для обеспечения непрерывности технологического процесса и снижения ущерба от недовыпуска продукции;
- частые кратковременные нарушения электроснабжения на ВЛ «Иртыш – Менделеево II», «Иртыш – Менделеево I», «ТЭЦ – Бигишево» приводят к провалам напряжения длительностью 0,16 – 0,25 с. Существующие системы автоматического ввода резервного электропитания (АВР) не позволяют оперативно переключиться на соседнюю секцию, что вызывает более глубокое снижение напряжения и останов агрегатов напряжением 380, 690 В;

Таблица 1.1. **Характеристика кратковременных нарушений электроснабжения предприятий**

Дата	Причина нарушения	Последствия	Величины КНЭ	Примечание
22.06.04	Посадка напряжения в системе внешнего электроснабжения ОАО «Сибур-ПЭТФ»	Сбой в работе частотных преобразователей и вторичной автоматики	$\Delta U_п = 39{,}14$ % $\Delta t_п = 0{,}179$ с	Отходы — 1662 кг, аморфный гранулят — 27 т
02.07.04	Посадка напряжения в системе внешнего электроснабжения ОАО «Сибур-ПЭТФ»	Сбой в работе частотных преобразователей и вторичной автоматики	—	Отходы — 842 кг
01.10.04	Посадка напряжения в системе внешнего электроснабжения ОАО «Сибур-ПЭТФ»	Кратковременный останов части технологического оборудования	$\Delta U_п = 35{,}14$ % $\Delta t_п = 0{,}139$ с	—
09.01.05 10 ч 42 мин 14 с	Посадка напряжения на 2-й секции шин 6 кВ	Кратковременный останов части технологического оборудования	$\Delta U_п = 13{,}16$ % $\Delta t_п = 0{,}119$ с	Не привела к отключению
09.01.05 21 ч 12 мин 28 с	Посадка напряжения на 2-й секции шин 6 кВ	Отключились двигатели 6754-К02, 6743-К01, 6741-Х01	—	Не известны
01.03.04	Отключение ВЛ 110 кВ «Иртыш – Менделеево II» ООО «Тобольскнефтехим»	Кратковременный останов части технологического оборудования: ПС Сырьевая — В-3, В-4; РП-202 — МК-201б	$\Delta U_п = 8{,}8$ кВ $\Delta t_п = 0{,}25$ с	АПВ не успешно. АВР I, III не успешен. ПС Сырьевая: АВР РП-202, РП-207 успешен
06.04.04	Посадка напряжения по ВЛ 10 кВ «Пионерлагерь II»	Отключились насосы котельной	—	АПВ успешно
07.07.04	На ВЛ упало дерево	Отключение ПС Сырьевая	$\Delta U_п = 9{,}2$ кВ $\Delta t_п = 0{,}20$ с	—

18.07.04	Отключение ВЛ 110 кВ «Иртыш – Абалак I»	На ПС Епанчино включился короткозамыкатель, не отключился отделитель	$\Delta U_п = 9{,}2$ кВ $\Delta t_п = 0{,}228$ с	Успешно сработала ДФЗ
23.07.04	Отключение ВЛ 110 кВ «ТЭЦ – Бигишево»	Причина неизвестна	—	АВР сработало успешно
26.07.04	Отключение ВЛ 110 кВ «Иртыш – Менделеево II»	Останов технологического оборудования: Б-1/2; МК-201Б, Б-В3, Н-35	$\Delta U_п = 9{,}2$ кВ $\Delta t_п = 0{,}2$ с	АПВ сработало успешно
13.08.04	Отключение ВЛ 110 кВ «ТЭЦ – Бигишево»	АПВ не успешно; АВР ПС «ВОС» сработало успешно	$\Delta U_п = 9{,}3$ кВ $\Delta t_п = 0{,}16$ с	—
17.08.04	Посадка напряжения по ВЛ 10 кВ	Отключение линии Чукманка	$\Delta U_п = 8{,}9$ кВ $\Delta t_п = 0{,}30$ с	Успешно включилась МТЗ
26.09.04	Отключение ВЛ 110 кВ, линия КС-9	Останов оборудования: НОПСВ — агрегат 1; БК-2; М-42/3, ЦГФУ частотный привод 12/2	$\Delta U_п = 8{,}6$ кВ $\Delta t_п = 0{,}2$ с	АПВ не успешно
16.03.05	Отключение ВЛ 110 кВ «Иртыш – Менделеево II» КС-8	Кратковременный останов оборудования ПС «ВОС»	$\Delta U_п = 8{,}8$ кВ $\Delta t_п = 0{,}267$ с	АПВ сработало успешно
21.03.05	КЗ на проходном изоляторе в ЗРУ 110 кВ ТЭЦ, I секция шин	Останов технологического оборудования: • НОПСВ: агрегат 1,3; Н-6А; • ВиК: В-16к-1, Н-2; ЦГФУ: Н-7/2; • ДБО-3: Н-306, 301; Н-7/2, Н-5/3; БК-4, БК-2	—	—
16.04.05	Поврежден концевик муфты КЛ 10 кВ на КТПН-2 ПС Сырьевая	Отключение ПС Сырьевая	$\Delta U_п = 8{,}2$ кВ $\Delta t_п = 0{,}13$ с	—

Окончание табл. 1.1

25.04.05	КЗ в ячейке 13 ПС Сырьевая	АПВ сработало успешно	$\Delta U_п$ = 9,0 кВ $\Delta t_п$ = 0,276 с	—
01.05.05	Отключение ВЛ 110 кВ «Иртыш – Менделеево I»	АПВ успешно	$\Delta U_п$ = 9,3 кВ $\Delta t_п$ = 0,16 с	—
06.06.05	Отключение ВЛ 110 кВ «Иртыш – Абалак»	АПВ успешно	$\Delta U_п$ = 6,1 кВ $\Delta t_п$ = 0,06 с	—
20.06.05	Отключение ВЛ 110 кВ «ТЭЦ – Бигишево»	АПВ не успешно	$\Delta U_п$ = 5,8 кВ $\Delta t_п$ = 0,165 с	—
30.06.05	Отключение ВЛ 110 кВ «ТЭЦ – Бигишево»	АПВ успешно	$\Delta U_п$ = 8,8 кВ $\Delta t_п$ = 0,24 с	—
03.07.05	Отключение ВЛ 110 кВ «Иртыш – Менделеево II»	Не установлено	$\Delta U_п$ = 8,8 кВ $\Delta t_п$ = 0,205 с	—
30.07.05	Отключение ВЛ 110 кВ «ТЭЦ – Бигишево» во время грозы	АПВ успешно	$\Delta U_п$ = 8,5 кВ $\Delta t_п$ = 0,14 с	
31.07.05	Отключение ВЛ 110 кВ «Татарка»	Останов технологического оборудования ЦГФУ: Н-2/1, Н-3/3, Н-2-1, Н-3/3, Н-5-3, Н-6-1, Г-6-2	$\Delta U_п$ = 8,7 кВ $\Delta t_п$ = 0,25 с	АПВ сработало успешно
03.07.05	Отключение ВЛ 110 кВ «Иртыш – Менделеево II»	Не установлены	$\Delta U_п$ = 7,9 кВ $\Delta t_п$ = 0,278 с	—

Примечание. ПС — подстанция; АПВ — автоматическое повторное включение; РП — распределительная подстанция; ДФЗ — дифференциальная защита; МТЗ — максимальная токовая защита; ВОС — водоочистные сооружения; ЗРУ — закрытое распредустройство.

• внедрение ДКИН позволит исключить влияние провалов напряжения на работу всей подключенной к центральному распределительному пункту (ЦРП) электродвигательной нагрузки, осуществить компенсацию реактивной мощности, устранить все виды искажений в трехфазной сети, обеспечить направленную компенсацию гармоник и устранить перенапряжения [15].

Очевидно, что основное влияние на работу электроприемников на предприятиях оказывают именно кратковременные, сравнительно неглубокие провалы напряжения. При кратковременных нарушениях электроснабжения в энергосистеме имеют место:

а) отключение магнитных пускателей и контакторов на напряжение 0,38 кВ, через которые получают питание основные потребители напряжением до 1 кВ, влияющие на работу электродвигателей (ЭД) напряжением 6(10) кВ;

б) срабатывание технологических защит;

в) сбои в программном обеспечении.

1.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОАО «ОЭМК»

При проведении экспериментальных исследований провалов напряжения на шинах подстанций СПЭ ОАО «ОЭМК», питающих чувствительную к посадкам напряжения преобразовательную технику, системы микропроцессорного управления и электродвигательную нагрузку, использован анализатор качества электрической энергии Ресурс UF-2M 3Т-52-5-100-1000 (зав. № 2356).

Кроме того, с августа 2004 г. по настоящее время на ГПП ведется регистрация аварийных событий по четырем вводам 330 кВ и с 2007 г. по двум вводам 110 кВ. За время проведения экспериментальных исследований зафиксировано свыше 40 автоматических запусков регистратора аварийных событий (за не полный 2004 г. — 8; за 2005 г. — 14; за 2006 г. — 12; за 2007 г. — уже 10), результаты которых обработаны и сведены в табл. 1.2, а также представлены на рис. 1.1 – 1.6.

За время экспериментальных исследований зафиксировали как провалы напряжений, так и перенапряжения в узлах СПЭ ОАО «ОЭМК» (табл. 1.3).

Таблица 1.2. **Статистика провалов напряжений на вводе ГПП ОАО «ОЭМК», полученных из осциллограмм Бреслер**

Дата, время	Глубина провала напряжения, %	Число фаз	Длительность, мс
14.08.04 12:07	25,6	3	135
14.08.04 12:17	14,5	3	200
20.08.04 13:18	12,8	1	120
20.08.04 13:19	11,0	1	114
02.09.04 12:42	11,4/11,0	1	122/120
02.09.04 12:42	9,4/10,6	1	99/116
05.09.04 14:04	10,2	2	138
09.09.04 09:39	11,2	3	196
10.02.05 02:35	24,3	3	90
09.09.05 09:39	11,2	3	196
14.02.05 12:22	44,7	1	130
12.05.05 16:00	19,9	3	116
04.06.05 11:16	30,49	2	111
17.06.05 18:20	41,7	3	159
01.07.05 04:37	29,50	2	72
01.07.05 04:48	28,40	1	72
29.07.05 04:47	14,50	1	72
30.07.05 12:34	30,90	3	168
01.08.05 13:16	25,60	3	79
01.08.05 18:17	32,00	3	78
19.08.05 18:17	19,00	3	170
08.09.05 09:01	19,20	1	48
22.01.06 06:32	16,20	3	203
21.05.06 23:43	19,30	2	174
15.06.06 17:05	13,30	3	124
24.06.06 18:55	20,40	3	146
25.06.06 15:45	10,20	1	146
25.07.06 16:47	34,70	1(*C*)	129
27.07.06 16:23	14,50	3	141

Дата, время	Глубина провала напряжения, %	Число фаз	Длительность, мс
03.08.06 11:16	33,60	1(*C*)	80
07.08.06 11:16	100	1(*B*)	58
08.08.06 22:48	12,8	1(*B*)	58
17.08.06 20:11	69,1	1(*B*)	453
11.10.06 17:26	77,6	3	85
02.01.07 17:39	16,7	2	97
02.01.07 18:16	10,2	2	158
26.01.07 18:16	8,4	2	182
25.03.07 09:04	39,6	1(*C*)	72
20.04.07 11:08	33,0	1(*B*)	65
20.04.07 12:44	18,3	1(*C*)	100
26.04.07 22:22	16,4	2	142
31.05.07 22:02	100/42,3	1(*B*)	130
04.06.07 07:12	39,6	1(*C*)	81
08.09.07 09:05	18,9	1(*C*)	71

Статистика инструментальных исследований (табл. 1.3) показывает, что провалы напряжения являются следствием как аварийных режимов (во внешних и во внутренних сетях предприятия), так и нормальных режимов пуска электрооборудования (высоковольтных двигателей, прочей мощной нагрузки).

Из 21 случая провалов напряжения за период со 2 мая по 31 июля 2007 г. (рис. 1.7 – 1.11):

- в двух случаях длительность провала 0,13 с, а глубина больше 19,1 %;
- в одном случае длительность провала 0,12 с, а глубина 10,5 % (см. рис. 1.7);
- в одном случае длительность провала 0,11 с, глубина 15,3 %;
- в шести случаях длительность провала 0,10 с, глубина от 15,7 до 28,1 %;
- в пяти случаях длительность провала 0,08 – 0,09 с, глубина от 11,2 до 27,6 %;
- в оставшихся случаях аварийных режимов длительность 40 – 70 мс, глубина провалов напряжения 10,1 – 11,0 %.

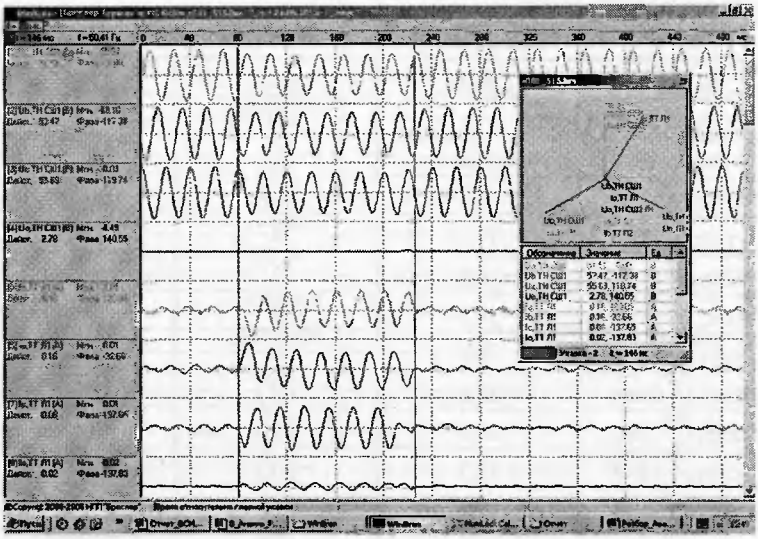


Рис. 1.1. **Посадка напряжения 24.06.06 в ВЛ Е07 н на ГПП-330 ($\Delta U_п$ = 20,4 %, $\Delta t_п$ = 146 мс) из-за КЗ на ПС «Голофеевка» по ВЛ 110 кВ (в 7 км от ПС)**

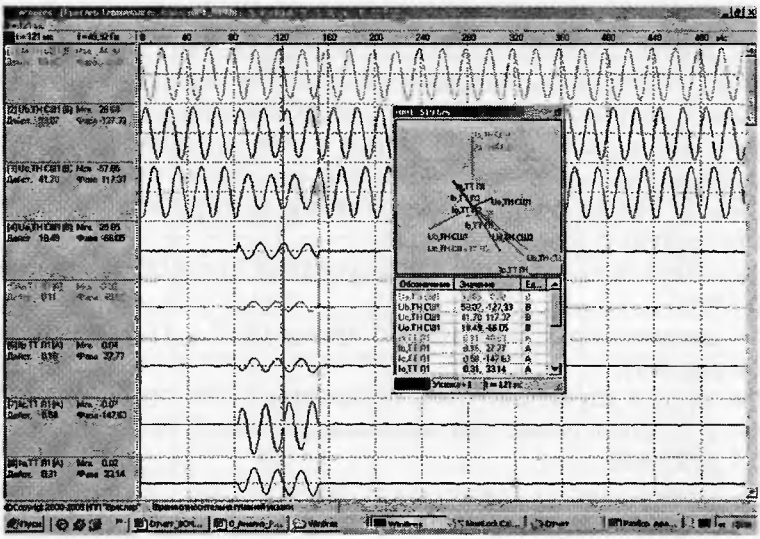
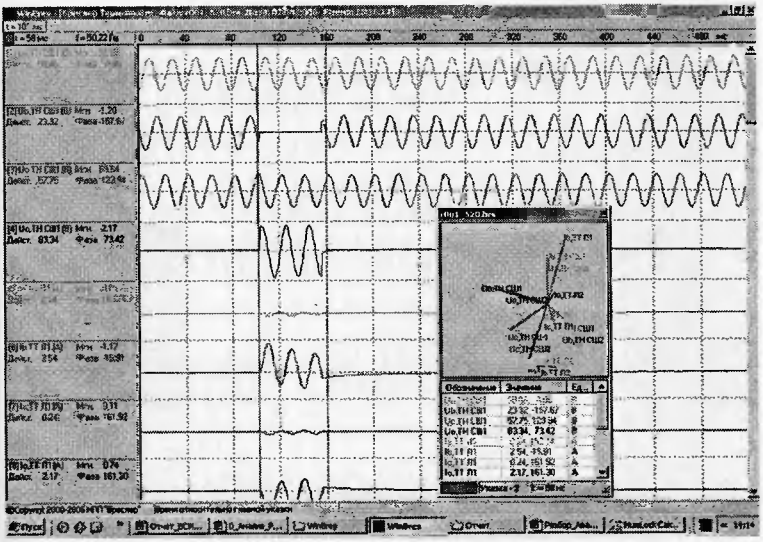
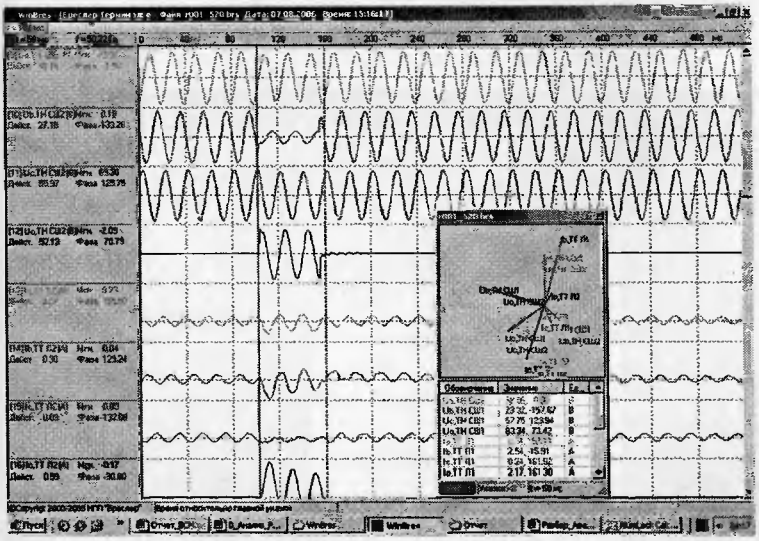


Рис. 1.2. **Короткое замыкание в фазе *С* при пробое муфты, несрабатывание АВР на ПС 17Е, провал напряжения в сетях 110 кВ и на ГПП-330 ($\Delta U_п$ = 33,6 %, $\Delta t_п$ = 80 мс)**



а)



б)

Рис. 1.3. **Провал до нуля в фазе *B*:**
а **— первой секции ГПП-330 ($\Delta U_п$ = 100 %, $\Delta t_п$ = 58 мс); *б* — второй секции ГПП-330 ($\Delta U_п$ = 77,4 %, $\Delta t_п$ = 58 мс)**

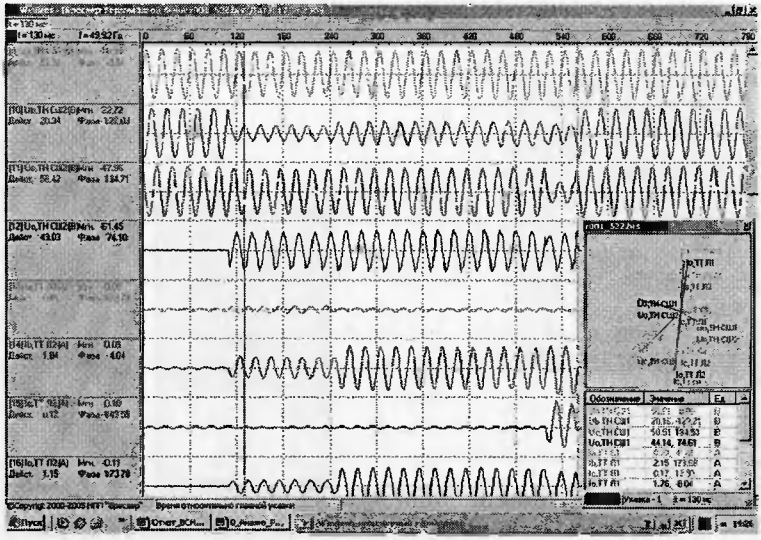


Рис. 1.4. **Провал в фазе *B* первой секции ГПП-330 ($\Delta U_п$ = 69,1 %, $\Delta t_п$ = 453 мс)**

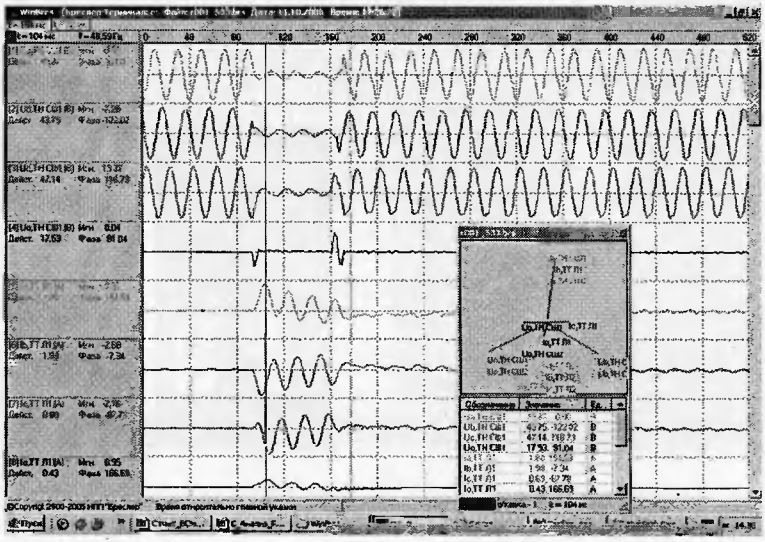
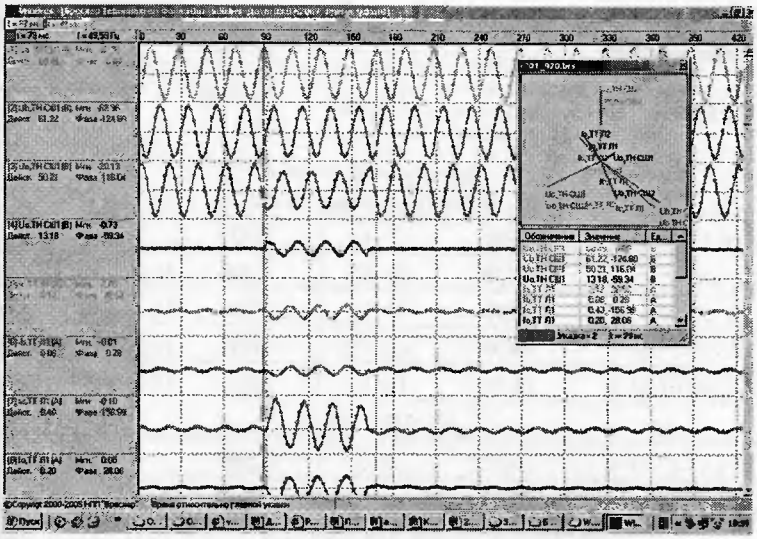
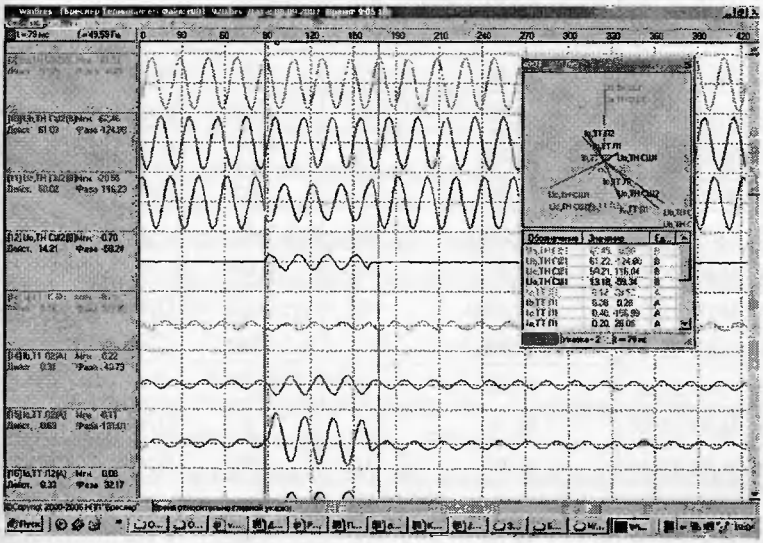


Рис. 1.5. **Ошибочное включение ВЛ 330 кВ № 1 на ПС «Металлургическая – 750» на заземление и провал на СШ1 ГПП-330 ($\Delta U_п$ = 77,6 %, $\Delta t_п$ = 85 мс)**



а)



б)

Рис. 1.6. **Аварийный режим 08 сентября 2007 г.:**
а — СШ1; *б* — СШ2

Таблица 1.3. **Статистика экспериментальных данных провалов напряжений и перенапряжений**

Дата, время	Глубина провала напряжения (перенапряжения), %	Фаза	Длительность КНЭ, с	Примечания
Провалы напряжения				
ПС 011Е, 1 секция 10 кВ				
08.05.07 21:35	10,50	U_a	0,12	—
08.05.07 01:22	11,20	U_b	4,20	Пуск мощного ЭД
12.05.07 02:44	12,30	U_b	5,02	Пуск мощного ЭД
12.05.07 04:28	10,30	U_b	2,96	Пуск мощного ЭД
12.05.07 07:24	11,70	U_a	3,76	Пуск мощного ЭД
ПС 011Е 110 кВ				
12.05.07 17:38	10,10	U_c	0,06	—
13.05.07 18:54	11,70	U_b	3,52	Пуск мощного ЭД
ПС 95К 6 кВ				
31.05.07 21:02	28,10	U_a	0,10	—
31.05.07 21:02	11,00	U_a	0,04	—
07.06.07 09:55	10,40	U_a	3,27	Пуск мощного ЭД
07.06.07 10:06	10,10	U_a	2,90	Пуск мощного ЭД
07.06.07 15:37	11,80	U_a	3,71	Пуск мощного ЭД
07.06.07 15:49	11,90	U_a	3,65	Пуск мощного ЭД
31.05.07 21:02	20,50	U_b	0,13	—
31.05.07 21:02	27,60	U_b	0,09	—
07.06.07 15:38	10,60	U_b	3,63	Пуск мощного ЭД
07.06.07 15:49	10,70	U_b	3,44	Пуск мощного ЭД
31.05.07 21:02	26,30	U_c	0,10	—
07.06.07 15:38	11,40	U_c	3,65	Пуск мощного ЭД
07.06.07 15:49	11,60	U_c	3,64	Пуск мощного ЭД
ПС 97К 6 кВ				
07.06.07 16:38	10,10	U_b	3,46	Пуск мощного ЭД
07.06.07 16:50	10,70	U_b	3,44	Пуск мощного ЭД
ПС 17Е Т1				
10.07.07 11:48	15,30	U_b	0,11	—

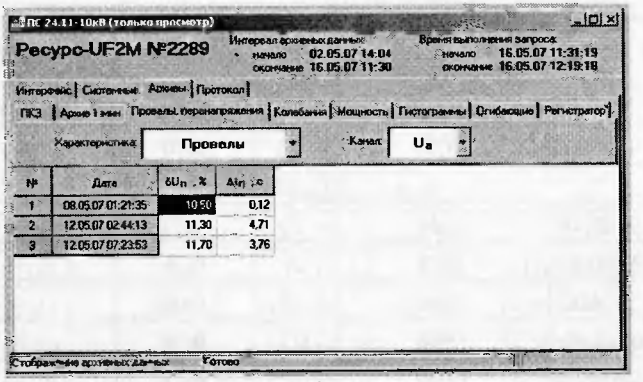
Дата, время	Глубина провала напряжения (перенапряжения), %	Фаза	Длительность КНЭ, с	Примечания
ПС 17Е Т2				
10.07.07 10:47	15,70	U_b	0,10	—
ПС 16Е				
21.07.07 20:38	13,50	U_a	0,09	—
25.07.07 20:32	12,70	U_b	0,35	—
30.07.07 14:33	11,20	U_c	0,08	—
25.07.07 20:32	12,40	U_{ab}	0,34	—
25.07.07 20:32	12,20	U_{bc}	0,33	—
21.07.07 20:38	15,40	U_{ca}	0,09	—
25.07.07 20:32	11,90	U_{ca}	0,31	—
30.07.07 14:33	12,00	U_{ca}	0,09	—
Перенапряжения в сети				
ПС 011Е, 1-я секция 10 кВ				
09.05.07 08:28	1,12	U_a, U_b	>5,0	Более 1,1 $U_{ном}$, всего 64 раза
ГПП 330/110 110 кВ				
16.05—30.05.07	1,11	U_a	>5,0	Более 1,1 $U_{ном}$, всего 110 раз

Статистика провалов напряжений свидетельствует, что было:

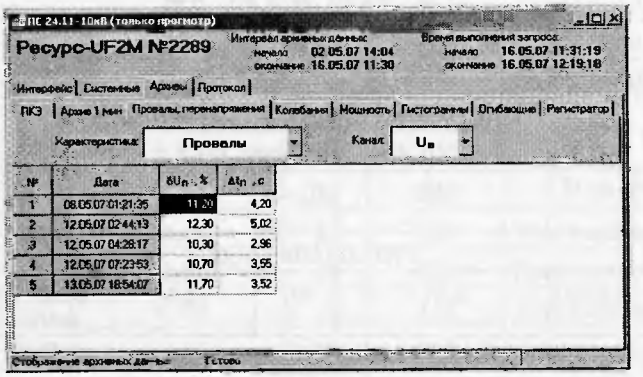
- 20 (45,45 %) однофазных провалов напряжения глубиной 9,4 – 100 % и длительностью 48 – 146 мс;
- 8 (18,2 %) двухфазных провалов напряжения глубиной 8,4 – 29,50 % и длительностью 72 – 184 мс;
- 16 (36,35 %) трехфазных провалов напряжения глубиной 13,3 – 77,6 % и длительностью 78 – 203 мс.

Из результатов исследований провалов напряжений следует, что:

- глубина и длительность провала напряжения по фазам различна для одного и того же аварийного режима;
- при пуске СД напряжением 6(10) кВ на РП 95К наблюдались провалы напряжения глубиной до 11,9 % и длительностью до 3,8 с;



а)



б)

Рис. 1.7. **Протокол провалов напряжения U_a (*а*) и U_b (*б*) за 08 – 13 мая 2007 г.**

- при пуске ЭД напряжением 6(10) кВ на РП 97К наблюдались провалы напряжения глубиной до 10,7 % и длительностью до 3,5 с;
- при пуске ЭД, получающих питание от ПС 11.1К, наблюдались провалы напряжения глубиной до 12,3 % и длительностью до 5,1 с.

Колебания напряжения на шинах ПС 24.11 10 кВ (рис. 1.12, 1.13) ОАО «ОЭМК» свидетельствует о влиянии работы электропечной, однофазной и выпрямительной нагрузок на режим электроснабжения.

95К (только просмотр)

Ресурс-UF2M №2356

Интервал архивных данных: начало 30.05.07 14:02, окончание 14.06.07 10:47

Время выполнения запроса: начало 14.06.07 11:47:51, окончание 14.06.07 12:33:03

Интерфейс | Системные | Архивы | Протокол

ПКЭ | Архив 1 мин | Провалы, перенапряжения | Колебания | Мощность | Гистограммы | Огибающие | Регистратор

Характеристика: Провалы Канал: U_a

№	Дата	δU_n, %	Δt_n, с
1	31.05.07 21:02:07	19,10	0,13
2	31.05.07 21:02:10	28,10	0,10
3	31.05.07 21:02:11	11,00	0,04
4	07.06.07 09:54:58	10,40	3,27
5	07.06.07 10:05:55	10,10	2,90
6	07.06.07 15:37:30	11,80	3,71
7	07.06.07 15:49:15	11,90	3,65

Отображение архивных данных Готово

а)

95К (только просмотр)

Ресурс-UF2M №2356

Интервал архивных данных: начало 30.05.07 14:02, окончание 14.06.07 10:47

Время выполнения запроса: начало 14.06.07 11:47:51, окончание 14.06.07 12:33:03

Интерфейс | Системные | Архивы | Протокол

ПКЭ | Архив 1 мин | Провалы, перенапряжения | Колебания | Мощность | Гистограммы | Огибающие | Регистратор

Характеристика: Провалы Канал: U_b

№	Дата	δU_n, %	Δt_n, с
1	31.05.07 21:02:07	20,50	0,13
2	31.05.07 21:02:08	16,00	0,10
3	31.05.07 21:02:10	27,80	0,09
4	31.05.07 21:02:11	19,40	0,10
5	07.06.07 15:37:30	10,60	3,63
6	07.06.07 15:49:16	10,70	3,44

Отображение архивных данных Готово

б)

95К (только просмотр)

Ресурс-UF2M №2356

Интервал архивных данных: начало 30.05.07 14:02, окончание 14.06.07 10:47

Время выполнения запроса: начало 14.06.07 11:47:51, окончание 14.06.07 12:33:03

Интерфейс | Системные | Архивы | Протокол

ПКЭ | Архив 1 мин | Провалы, перенапряжения | Колебания | Мощность | Гистограммы | Огибающие | Регистратор

Характеристика: Провалы Канал: U_c

№	Дата	δU_n, %	Δt_n, с
1	31.05.07 21:02:08	19,60	0,10
2	31.05.07 21:02:10	26,30	0,10
3	31.05.07 21:02:11	11,30	0,05
4	07.06.07 15:37:30	11,40	3,65
5	07.06.07 15:49:15	11,60	3,64

Отображение архивных данных Готово

в)

Рис. 1.8. **Протокол провалов напряжения U_a (*а*), U_b (*б*) и U_c (*в*) за май – июнь 2007 г.**

95K (только просмотр)

Ресурс-UF2M №2356

Интервал архивных данных: начало 30.05.07 14:02, окончание 14.06.07 10:47

Время выполнения запроса: начало 14.06.07 11:47:51, окончание 14.06.07 12:33:03

Интерфейс | Системные | Архивы | Протокол

ПКЭ | Архив 1 мин | Провалы, перенапряжения | Колебания | Мощность | Гистограммы | Огибающие | Регистратор

Характеристика: **Провалы** Канал: U_{ab}

№	Дата	$\delta U_п$, %	$\Delta t_п$, с
1	31.05.07 21:02:07	25,00	0,12
2	31.05.07 21:02:10	28,50	0,10
3	31.05.07 21:02:11	16,80	0,09
4	07.06.07 15:37:30	11,40	3,69
5	07.06.07 15:49:16	11,50	3,59

Отображение архивных данных | Готово

а)

95K (только просмотр)

Ресурс-UF2M №2356

Интервал архивных данных: начало 30.05.07 14:02, окончание 14.06.07 10:47

Время выполнения запроса: начало 14.06.07 11:47:51, окончание 14.06.07 12:33:03

Интерфейс | Системные | Архивы | Протокол

ПКЭ | Архив 1 мин | Провалы, перенапряжения | Колебания | Мощность | Гистограммы | Огибающие | Регистратор

Характеристика: **Провалы** Канал: U_{bc}

№	Дата	$\delta U_п$, %	$\Delta t_п$, с
1	31.05.07 21:02:07	11,40	0,06
2	31.05.07 21:02:08	22,70	0,11
3	31.05.07 21:02:10	26,70	0,09
4	31.05.07 21:02:11	16,60	0,09
5	07.06.07 15:37:30	10,90	3,66
6	07.06.07 15:49:16	11,10	3,52

Отображение архивных данных | Готово

б)

95K (только просмотр)

Ресурс-UF2M №2356

Интервал архивных данных: начало 30.05.07 14:02, окончание 14.06.07 10:47

Время выполнения запроса: начало 14.06.07 11:47:51, окончание 14.06.07 12:33:03

Интерфейс | Системные | Архивы | Протокол

ПКЭ | Архив 1 мин | Провалы, перенапряжения | Колебания | Мощность | Гистограммы | Огибающие | Регистратор

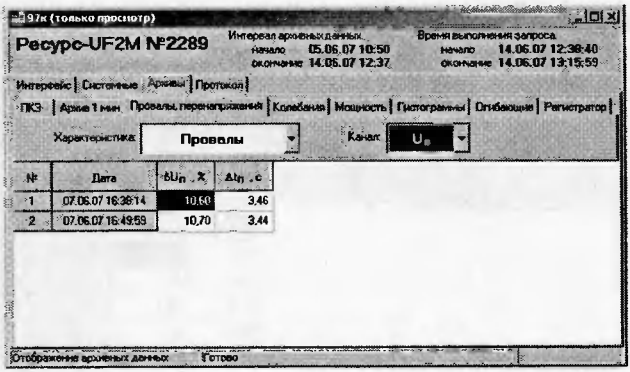
Характеристика: **Провалы** Канал: U_{ca}

№	Дата	$\delta U_п$, %	$\Delta t_п$, с
1	31.05.07 21:02:08	10,40	0,06
2	31.05.07 21:02:10	26,80	0,10
3	07.06.07 15:37:30	11,40	3,64
4	07.06.07 15:49:15	11,50	3,63

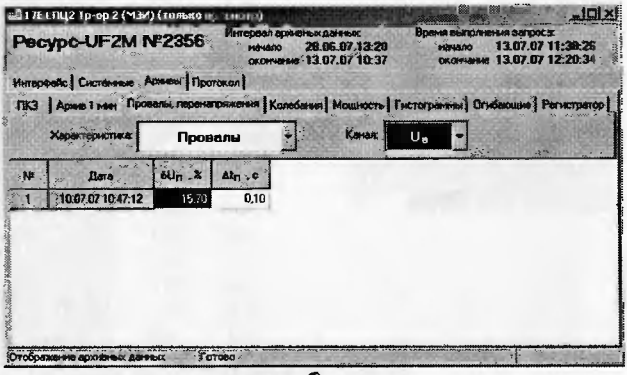
Отображение архивных данных | Готово

в)

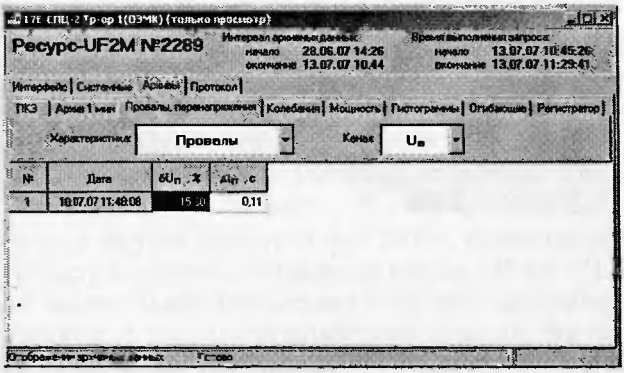
Рис. 1.9. **Протокол провалов напряжения за U_{ab} (*а*) и U_{bc} (*б*) и U_{ca} (*в*) май – июнь 2007 г.**



а)

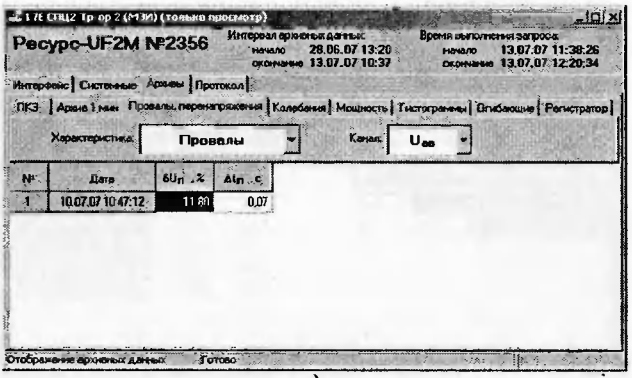


б)

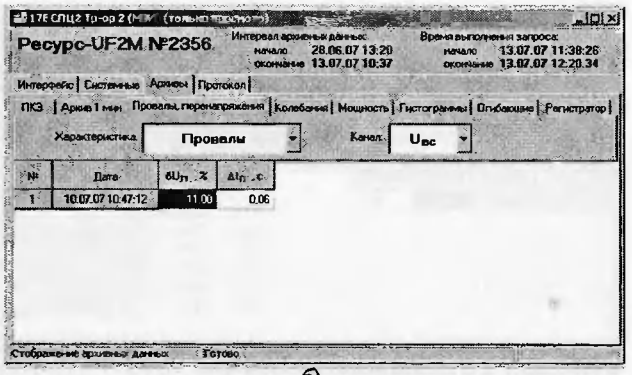


в)

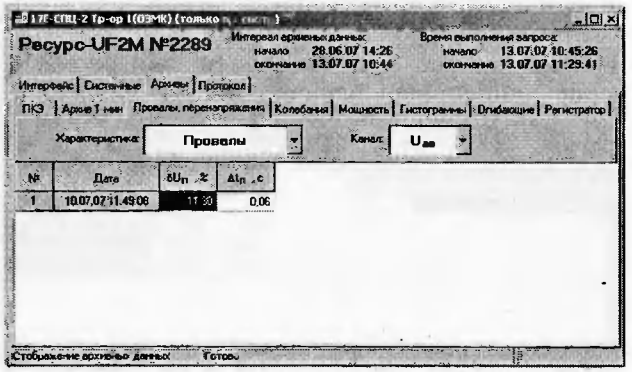
Рис. 1.10. **Протокол провалов напряжения за июнь (*а*) – июль (*б* и *в*) 2007 г.**



а)



б)



в)

Рис. 1.11. **Протокол провалов напряжения U_{ab} (*а*, *б*); U_{bc} (*б*) и U за июль 2007 г.**

ПС 24.11-10кВ (только просмотр)

Ресурс-UF2M №2289

Интервал архивных данных: начало 02.05.07 14:04 окончание 16.05.07 11:30

Время выполнения запроса: начало 16.05.07 11:31:19 окончание 16.05.07 12:19:18

Интерфейс | Системные | Архивы | Протокол

ПКЗ | Архив 1 мин | Провалы, перенапряжения | Колебания | Мощность | Гистограммы | Огибающие | Регистратор

Характеристика: Перенапряжения Канал: U_c

№	Дата	$K_{перU}$	$\Delta t_{перU}$, с
1	09.05.07 08:28:11	1,11	0,29
2	09.05.07 08:33:26	1,10	4,96
3	10.05.07 15:07:24	1,10	3,12
4	10.05.07 16:38:26	1,10	29,97
5	10.05.07 17:00:40	1,10	21,19
6	10.05.07 17:01:31	1,10	5,51
7	10.05.07 17:05:17	1,10	6,35
8	10.05.07 17:12:15	1,10	1,05
9	10.05.07 17:12:16	1,10	0,46
10	10.05.07 17:12:17	1,10	0,44
11	10.05.07 17:12:23	1,10	1,95
12	10.05.07 17:12:25	1,10	1,07
13	10.05.07 17:12:27	1,10	14,59
14	10.05.07 17:12:51	1,10	3,61
15	10.05.07 17:27:09	1,10	17,37
16	10.05.07 17:27:25	1,10	2,81
17	10.05.07 17:29:20	1,10	14,88
18	10.05.07 17:29:37	1,10	30,62
19	10.05.07 18:41:25	1,10	8,40
20	10.05.07 18:41:37	1,10	5,63

Рис. 1.12. **Протокол перенапряжений за 10.05.07**

На ПС 011Е 10 кВ ОАО «ОЭМК» свыше 50 раз имели место (см. рис. 1.12, 1.13) значительные по длительности небольшие перенапряжения, которые могли быть вызваны электромагнитными переходными процессами или запаздываниями в работе устройств РПН трансформаторов. Число перенапряжений с длительностью свыше 10 с составило 40 случаев.

За период с августа 2004 по август 2007 г. регистраторами аварийных событий, установленными на вводах 330 кВ ГПП зафиксированы свыше 40 автоматических запусков, вызванных провалами напряжений. Анализ осциллограмм показал, что параметры провалов напряжения практически одинаковы по всем четырем вводам и отражаются далее на всех потребителях, присоединенных к ГПП (табл. 1.4).

ПС 24.11-10кВ (только просмотр)

Ресурс-UF2M №2289

Интервал архивных данных: начало 02.05.07 14:04, окончание 16.05.07 11:30

Время выполнения запроса: начало 16.05.07 11:31:19, окончание 16.05.07 12:19:18

Интерфейс | Системные | Архивы | Протокол

ПКЭ | Архив 1 мин | Провалы, перенапряжения | Колебания | Мощность | Гистограммы | Огибающие | Регистратор

Характеристика: Перенапряжения Канал: U_c

№	Дата	$K_{перU}$	$\Delta t_{перU}$, с
230	11.05.07 05:44:55	1,10	4,23
231	11.05.07 05:45:00	1,10	12,25
232	11.05.07 05:45:16	1,10	10,40
233	11.05.07 05:45:27	1,10	3,10
234	11.05.07 05:45:31	1,10	3,49
235	11.05.07 05:45:41	1,10	0,09
236	11.05.07 05:45:45	1,10	6,48
237	11.05.07 05:47:44	1,10	8,28
238	11.05.07 07:01:25	1,10	3,28
239	11.05.07 07:01:29	1,10	2,45
240	11.05.07 07:01:34	1,10	1,19
241	11.05.07 07:02:17	1,10	59,82
242	11.05.07 07:03:19	1,11	25,15
243	11.05.07 07:03:44	1,10	18,97
244	11.05.07 07:04:04	1,10	35,40
245	11.05.07 07:04:40	1,10	14,25
246	11.05.07 07:04:55	1,10	18,27
247	11.05.07 10:54:40	1,10	6,85
248	11.05.07 11:21:50	1,10	17,05

Рис. 1.13. **Протокол перенапряжений за 11.05.07**

Из осциллограмм аварийных событий 08 сентября 2007 г. (см. рис. 1.6) следует, что в результате однофазного КЗ в фазе *C* в линии WL303 ГПП, питающей трансформатор Т1 110/10/10 кВ подстанции 17Е, провал напряжения составил 47,2 % $U_{ном}$ по одному вводу и 34 % $U_{ном}$ по второму вводу РУ 330 кВ. Провал напряжения в РУ 110 кВ на всех четырех секциях составил 91 % $U_{ном}$, а длительность провала везде составляет 73 мс.

Помимо отключения трансформатора Т1 произошло также отключение технологического оборудования сталеплавильного цехов (СПЦ-1, СПЦ-2), цеха окомкования и металлизации (ЦОиМ), энергоцеха (ЭНЦ-1) (роликовые грохота, обжиговая машина, приводы постоянного тока I группы клетей, главные приводы черновой группы, среднего и мелкого сорта, два высоковольтных

Таблица 1.4. **Анализ аварийных остановов в системе электроснабжения ОАО «ОЭМК»**

Дата	Место	Авария	Причина	Отключенное оборудование
26.03.03	ЦОиМ	Отключение трансформатора 10/0,4 кВ, ячейка 10 кВ 2А20	КЗ в автомате 2F1 при пробном пуске напряжением 0,4 кВ	SH-33.2
03.04.03	СПЦ-2	Отключение 2-й СШ 0,4 кВ КТП 10/0,4 кВ	КЗ на клеммнике 0,4 кВ в релейном отсеке КТП	1ТП3 КТП 10/0,4кВ
27.06.03	ТСЦ	Отключение трансформатора Т2 VN-13, выход из строя двух блоков Sitop, запитанных от КТП 70	КЗ в силовом кабеле роторных цепей, причина не установлена	Цех водоснабжения (ЦВС)
18.07.03	СПЦ-2	Отключение вводов № 1 6ТП1, 6ТП2 (ячейка 10 кВ № 321 ПС 17Е)	КЗ в сети 0,4 кВ на вводе автомата питания 6ШР-1 и неселективная работа защит 10 и 0,4 кВ	ER-11,12
07.10.03	ТСЦ, СПЦ-1	Отключение котельной вследствие сбоя контроллеров Simatic	КЗ в системе 330 кВ ВЛ «Лебеди – Металлургическая» и провал напряжения до $0{,}7U_{ном}$ (90 мс)	ПС Строительная
10.10.03	ЦСП, СПЦ-1	Отключение ячейки 110 кВ № 205, устройства компенсации реактивной мощности SH-34, ЭД жидкой смазки, гидравлики из-за провала напряжения	КЗ в линии 750 кВ «КАЭС – Украина». Глубина провала по фазе *С* 214 кВ (49 % $U_{ном}$ фазы), длительность 80 мс (4 периода)	ГПП
24.11.03	СПЦ-1 СПЦ-2	Остановка главных приводов штабелеров № 1,2,3 и др. из-за работы защит контуров системы S-5, S-7	Посадка напряжения из-за отключения линии 750 кВ на КАЭС	НЗС, стан-350
28.01.04	ЦОиМ	Простой всех ШП (всего четыре) длительностью 21,5 ч	КЗ на 1-й СШ 10 кВ ПС 33/1 и отключение Q-101 ПС 33/2 токами растекания КЗ	

Продолжение табл. 1.4

Дата	Место	Авария	Причина	Отключенное оборудование
31.03.04	ЭСПЦ	Отключение ДСП № 1 – 3 от снижения давления воды в 3-м ЦК SH-20	Отключение ВЛ 110 кВ № 1 ПС Голофеевка – ПС Элегазовая 24.11 из-за КЗ линии *А* на землю	Простой ДСП от 0,25 до 0,5 ч
13.04.04	ЦОиМ	Аварийная остановка ШП № 1 из-за нарушения работы КИПиА, при повторных пусках выход из строя ЭД КТГ № 3 1800 кВт	КЗ между секциями и на землю, пробой и разрыв изоляции ЭД 1800 кВт во время пуска	Простой ШП
23.06.04	ОСМ и БТ	Отключения ВЛ 110 кВ № 1 «Оскол-500 – Стройиндустрия»	Удар молнии в линию, КЗ, отключение по отсечке	Остановка печи № 2 и ЦКП
23.06.04	ЦОиМ	Отключение ячейки 6 кВ № 6,5 РП-94К из-за провала напряжения в сетях 10/6 кВ	КЗ в кабеле 10 кВ к КТП 93N, запитанной от РП 93К	Бентонит
24.06.04	ЦСП	Остановка БКЗ № 2 из-за КЗ в ВЛ 110 кВ «Голофеевка – Тяговая – Н. Оскол»	Удар молнии в линию, КЗ, отключение по отсечке	Котельная
14.08.04	ЦСП	Провал напряжения на линии WL-103 из-за КЗ в линии 500 кВ; провал напряжения до 138 кВ (120 мс): в 12 ч 09 мин и 12 ч 18 мин, затем отключение ввода 35 кВ Т1 ПС «Орликовская»	Удар молнии в линию 500 кВ ПС Оскол-500, аналогично в линию 110 кВ ПС Голофеевская	ГПП
14.02.05	СПЦ-1 СПЦ-2	Остановка на 30 мин по срабатыванию защитных контуров Simatic	КЗ на землю в фазе *С* ВЛ 500 кВ (между ПС Металлургическая и Старый Оскол-500)	НЗС, стан-350

14.03.05	ЦСП	Отключение силового трансформатора Т1 110/10/6 кВ	КЗ в шинном мосту 10 кВ, срабатывание ДФЗ	ПС 91Е
01.07.05	ЭСПЦ, ЦОиМ СПЦ-1 СПЦ-2 ЭНЦ	Провал напряжения до $0{,}3U_{ном}$, развал схем КИПиА, управления и т. д. В 4 ч 48 мин несанкционированный пробой фазы С ВВ Q-1 ДСП-1, снова КЗ в сети 110 кВ	Не отключилась фаза на ВВ Q-1 АКОС-1, затем выключилась в 4 ч 37 мин на ВВ Q-2 резервного выключателя и пробой ОПН на землю	Простои: (ДСП) — 8 ч 27 мин; (ДСП) — 4 ч 15 мин, (ДСП) — 3 ч 23 мин, (ДСП) — 4 ч 16 мин; водоподготовка — 2 ч 43 мин; ЦОиМ — 1 ч 43 мин; ШП-1 — 4 ч 10 мин, ШП-2 — 3 ч 25 мин; ШП-3 — 2 ч 20 мин, ШП — 55 мин; СПЦ-1 — 46 мин, СПЦ-2 — 1 ч 37 мин, 1ч 56 мин; ЭНЦ-1 КС — 9 мин, ЦКС — 12 мин
08.09.05	Все цехи ОЭМК	В 9 ч 01 мин отключение четырех СШ 110 кВ «спокойной» СШ 110 кВ по ДЗШ линии W3-B1, затем через 12 мин аналогичное отключение по линии W3-A1. Перерыв в электроснабжении по ГПП — 14 мин	КЗ в шейке концевой муфты отечественного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в КЛ WL-302 (фаза В), 110 кВ АКОС № 2; через 12 мин повторное КЗ при повторном включении	Все участки
10.01.06	ЦСП, ЦОиМ	Аварийное отключение ячейки № 31 10 кВ для КТП ЦРМО, ЦППиР, ОСМиБТ	Трехфазное КЗ в муфте кабеля 10 кВ; глубокая посадка напряжения	Простой обжиговой машины 1,5 ч, отключение всех турбомашин в ЦОиМ

Продолжение табл. 1.4

Дата	Место	Авария	Причина	Отключенное оборудование
23.01.06	ЭСПЦ	Аварийное отключение ячейки 10 кВ HDB23 ПС 14Е	КЗ в кабельной разделке на КТП ЭП8А	Простой ДСП-3 20 мин по следящему приводу гидравлики
02.02.06	ЭНЦ-1	Полное отключение обоих вводов КТП2-630 ЦКС и ВКЦА	КЗ в 0,4 кВ на ВКЦА № 1	Отключение ЦКС и ВКЦА — около 1 ч, простой СПЦ-1,2; ЦОиМ — 12 ч
16.02.06	КЦ	Полное отключение обоих вводов КТП2-1000	КЗ в автомате 0,4 кВ	Простой кранов ЦСД-1
09.05.06	ЦОиМ	Отключение ячейки № 17 РП93К из-за снижения напряжения в сети 10 кВ.	КЗ в сети 10кВ на ПНС «ОСМиБТ»	Останов приводов окомкования
25.05.06	ЦСП	Отключение КИГ, КТГ и ВКЦА № 2	КЗ во время дождя в линии 110 кВ ввод № 2 на ПС Промводозабор, провал U ниже $0{,}5U_{ном}$, срабатывание ТО	Простой ШП № 1, 2 (около 1 ч)
22.06.06	СПЦ-1	Простой стана из-за отключения ячейки 57 и ВВ, СВ на ПС 16Е	КЗ в кабеле 10 кВ от ячейки 57 и неселективное отключение ввода	
24.06.06 в 18.56	ЦСП	Посада напряжения в ВЛ Е07 и на ГПП (до $0{,}78U_{ном}$) из-за КЗ на ПС Голофеевка по 110 кВ (7 км от ПС)	Удар молнии в ВЛ 110 кВ в 7 км от ПС Голофеевка	
24.06.06 в 19.18	ЦСП, ЦОиМ	Отключение ВЛ Е07 (37 с), обоих вводов на ПС Строительная, остановка ШП № 1, 2, 3; остановка котельной ОЭМК	КЗ на ПС Голофеевка в зоне ДЗШ по ВЛ 110 кВ отключение всех шин 110 кВ на ПС Голофеевка	ПС. 24.11, Строительная

25.06.06	ЦСП	Отключение ВЛ Е07 по дистанционной защите	Удар молнии в ВЛ	Отключение ПС 24.11
03.08.06	СПЦ-2	Остановка основных производств СПЦ-2	Однофазное КЗ при пробое муфты, не срабатывание АВР на ПС 17Е, посадка U в сетях 110 кВ	Отключение технологического оборудования
11.10.06	ОЭМК	Остановка основных производств ОЭМК из-за провала напряжения в сети 330 кВ до 0,3 $U_{ном}$ на 80 мс	Ошибочное включение ВЛ 330 кВ № 1 на ПС Металлургическая – 750 на заземление	ГПП
02.01.07	ЦСП	Остановка технологических агрегатов в ТСЦ, ЦВС, КЦ, ЦОИ из-за обесточивания двух СШ 10 кВ	Отключение ВЛ № 2 110 кВ от РП 110 кВ ПС Голофеевка от ДЗШ	
05.02.07	ЭСПЦ	Остановка печей, АКОС, разливки из-за остановки насосов насосной станции № 3 водного хозяйства ЭСПЦ	КЗ в КТП2-1600 РП -98К, отключение КТП с повреждением трансформатора 1600 кВ · А, насосной станции № 3. Пробои с обоих вводов 0,4 кВ	Недовыплавка 17 плавок
25.03.07	КАЭС	Нарушение режима электроснабжения	Провал напряжения на КАЭС	

Примечание: КТП — комплектная трансформаторная подстанция; ЦОиМ (цех окомкования и металлизации); СПЦ — сталеплавильный цех; ТСЦ – товарно-сырьевой цех; ЭСПЦ — электросталеплавильный цех; СШ — секция шин; КАЭС – Курская АЭС; ГПП – главная понижающая подстанция; ОСМ и БТ — объединение строительных материалов и бытовой техники; ЦВС — цех водоснабжения; ШП — шламовая печь; ЦК — центробежный компрессор; ЭД — электродвигатель; КТГ — компрессор технологического газа; ЦМРО — цех ремонта металлургического оборудования; ВВ — вакуумный выключатель; ДЗШ — дифференциальная защита шин; ДФЗ — дифференциально-фазная защита; ДСП — дугосталеплавильная печь; АКОС — агрегат комплексный обработки стали; ТСЦ — товарно-сырьевой цех; ОПН — ограничитель перенапряжений; КЦ — компрессорный цех

СД кислородных компрессоров 1А, 2А и устройства динамической компенсации).

Статистика провалов напряжений на ОЭМК свидетельствует, что было:

- 20(45,45 %) однофазных провалов напряжения глубиной 9,4 – 100 % и длительностью 48 – 146 мс;
- 8(18,2 %) двухфазных провалов напряжения глубиной 8,4 – 29,50 % и длительностью 72 – 184 мс;
- 16(36,35 %) трехфазных провалов напряжения глубиной 13,3 – 77,6 % и длительностью 78 – 203 мс.

Анализ осциллограмм и проведенные исследования ОЭМК показали, что параметры провалов напряжения практически одинаковы по всем четырем вводам 110 кВ предприятия и отражаются далее на всех подстанциях и потребителях, присоединенных к ГПП. Анализ расчетно-экспериментальных исследований показал, что остаточные напряжения в начальный момент восстановления для большинства подстанций равны (0,39 – 0,55) $U_{ном}$. При таких остаточных напряжениях с учетом длительности переходных процессов 1 – 3 с, нарушается непрерывность технологических процессов производств, получающих питание от указанных подстанций.

Отключения потребителей и систем управления техпроцессом происходят при провалах напряжения глубиной свыше 20 %. Длительность провала напряжения влияет на число отключившихся потребителей. Анализ аварийных ситуаций на ОЭМК показал, что причинами отключений электрооборудования служат: сбои в системах управления технологическими процессами (Simatic); срабатывание защит преобразователей напряжения в электроприводах постоянного и переменного тока; отключения контакторов и магнитных пускателей напряжением 380 В и нарушение устойчивости электродвигательной нагрузки.

ГЛАВА ВТОРАЯ

Классификация устройств защиты от провалов напряжения

Различают следующие устройства, защищающие электрооборудование промышленных предприятий от провалов напряжения (маховик, статический источник бесперебойного питания (ИБП), динамический компенсатор искажений напряжения, статический компенсатор (СТАТКОМ), параллельно работающий СД, повышающий преобразователь, активный фильтр и бестрансформаторный последовательный усилитель).

Провалы напряжения длительностью 20 – 50 мс могут приводить к ущербам в десятки и даже сотни миллионов рублей за одно нарушение. Самый легкий способ защитить чувствительные процессы от провалов — это установка ИБП. Однако из-за большой стоимости и обслуживания ИБП устанавливаются только для основных потребителей и в местах, где проблемы с электропитанием могут причинить значительные повреждения, например в больнице, при производстве компьютеров, в финансовых учреждениях [2].

Для большинства производственных процессов установка защитного оборудования должна быть обоснована технико-экономическим расчетом, который показывает, что установка ИБП экономически целесообразна. Проблема защиты от провалов напряжения электродвигателей в промышленном производстве на данный момент решается как использованием быстродействующих АВР полным временем переключения за 25 – 45 мс, так и внедрением ИБМ.

2.1. ТИПЫ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Маховик вместе с двигателем-генератором (ДГ) может защитить производственные процессы от всех провалов напряжений. Когда происходит падение напряжения, то снижение напряжения на нагрузке замедляется путем подключения маховика, соединенного с двигателем-генератором. Схема соединения маховика с двигателем-генератором изображена на рис. 2.1.

Статический ИБП. Основные компоненты статического ИБП, который запасает энергию только для защиты от провалов напряжения на короткое время, представлены на рис. 2.2. Если произошло снижение напряжения, нагрузка начинает получать питание от батареи через преобразователь напряжения постоянного — переменного тока.

Динамический компенсатор искажений напряжения. Во время провала напряжения ДКИН остается подсоединенным к электрической сети и добавляет отсутствующую часть напряжения. Он добавляет эту отсутствующую часть напряжения через трансформатор, подсоединенный последовательно к нагрузке. В зависимости от назначения энергия для питания нагрузки в период провала может получаться из сети или от дополнительного источника

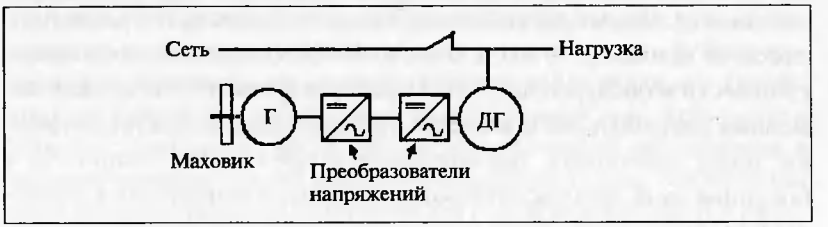


Рис. 2.1. **Схема включения маховика для компенсации провалов напряжения**

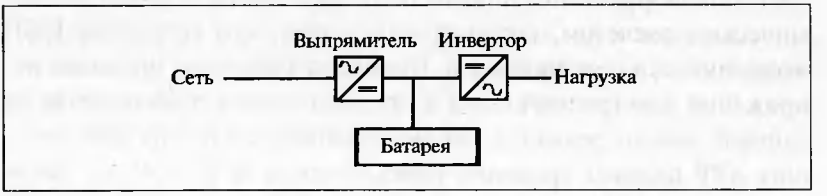


Рис. 2.2. **Схема включения ИБП для компенсации провалов напряжения**

(в основном это конденсаторы). Рассмотрим два типа ДКИН от различных производителей.

Первый (ДКИН-1) не содержит источников энергии и постоянно подключен к сети. Этот вариант экономически целесообразен, если нужно повышать напряжение не более чем на 50 %. Модификация ДКИН, способного поднять напряжение на 30 %, будет рассмотрена далее. Опыт использования ДКИН показал, что, начиная с этой модификации устройства, целесообразно их применение для защиты чувствительного от провалов напряжения оборудования.

Второй (ДКИН-2, рис. 2.3) содержит источник энергии, рассчитанный на большую нагрузку. Устройство мощностью 2 МВт способно поднять напряжение на нагрузке в 4 МВт на 50 % или на нагрузке в 8 МВт на 25 %. В отличие от большинства других устройств, мощность данного источника энергии способна выдержать длительные провалы напряжения.

Статический компенсатор (СТАТКОМ) [4], подсоединенный параллельно нагрузке, может снижать провалы напряжения путем добавления реактивной мощности в сеть. Способность снижать провалы может быть усилена путем использования дополнительного источника энергии, такого как сверхпроводящий магнитный источник энергии [6].

Хотя компенсаторы СТАТКОМ (рис. 2.4) способны поглощать и возвращать реактивную мощность $Q_{СТАТКОМ}$, их по причинам

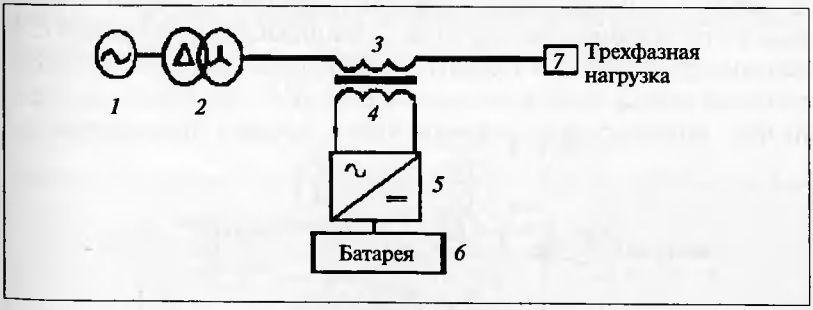


Рис. 2.3. **Схема аключения ДКИН для компенсации проаалов:**
1 — электрическая сеть; *2* — питающий трансформатор; *3*, *4* — первичная и вторичная обмотки автотрансформатора; *5* — преобразователь напряжения; *6* — источник питания (конденсаторная установка); *7* — нагрузка

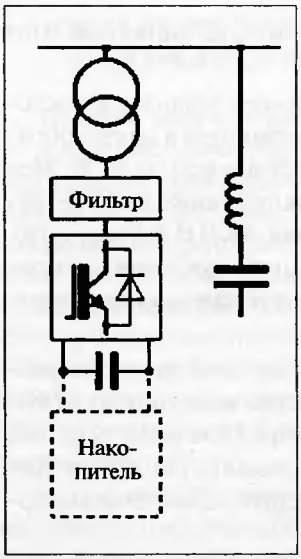


Рис. 2.4. **Статический компенсатор**

экономического характера применяют лишь для статической компенсации.

Система СТАТКОМ в режиме снижения напряжения переходит в режим источника постоянного тока. Напряжение на выводах конденсатора может поддерживаться постоянным.

Параллельное соединение синхронного двигателя с нагрузкой. Параллельно подсоединенный синхронный двигатель с нагрузкой несколько напоминает СТАТКОМ, но не содержит силовой электроники. Способность синхронного двигателя обеспечивать большую реактивную нагрузку позволяет такой системе восполнять провалы напряжения глубиной до 60 % на протяжении 6 с. Вместе с этим маленький маховик способен защитить нагрузку от полного отключения электроэнергии на время до 100 мс (рис. 2.5).

Повышающий преобразователь. Для защиты электрооборудования от провалов напряжения используют преобразователь постоянного тока, повышающий напряжение шин постоянного напряжения (например, двигателя с переменной частотой вращения) до номинального уровня (рис. 2.6). Наибольший провал, который может быть компенсирован повышающим преобразователем, зависит от его номинального тока. Повышающий преобразователь начинает работать, как только провал напряжения будет зафиксирован на шинах постоянного тока. Вместе со способностью обеспечить компенсацию симметричного провала напряжения до

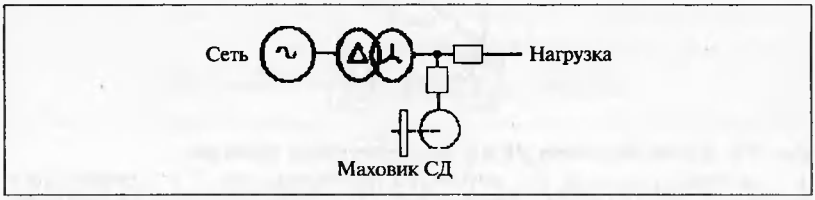


Рис. 2.5. **Схема включения параллельно нагрузке СД с маховиком**

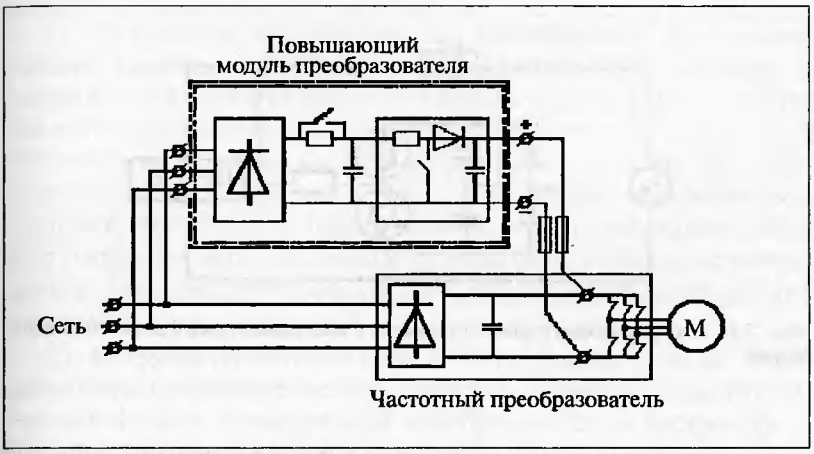


Рис. 2.6. **Повышающий преобразователь**

50 %, повышающий преобразователь имеет возможность компенсировать глубокие несимметричные провалы, такие как полный выход из строя одной из фаз. Для защиты от полного отключения электроэнергии повышающий преобразователь может быть снабжен батареями.

Активный фильтр (рис. 2.7) [2, 14] — это преобразователь, который может работать как выпрямитель, при использовании IGBT тиристоров вместо диодов. Активный фильтр может постоянно поддерживать напряжение в течение всего периода провала напряжения. Номинальный ток активного фильтра определяет максимальное значение компенсации провала напряжения.

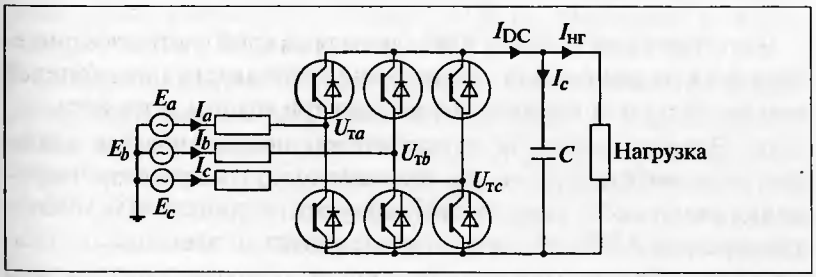


Рис. 2.7. **Активный фильтр**

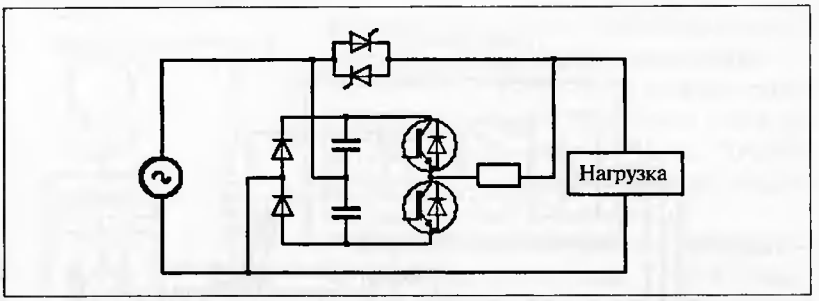


Рис. 2.8. **Бестрансформаторное устройство с последовательной добавкой напряжения**

Бестрансформаторное устройство с последовательной добавкой напряжения. В случае возникновения провала напряжения статический выключатель устройства, показанного на рис. 2.8, открывается и нагрузка начинает получать питание через инвертор. Энергия на шинах постоянного напряжения инвертора поддерживается двумя заряженными и последовательно соединенными конденсаторами. При провалах напряжения до 50 % это устройство может восстановить номинальный уровень напряжения. В данном устройстве имеющиеся источники питания (конденсаторы) могут смягчить полное отключение электроэнергии на ограниченный период времени. Устройство обеспечивает возможность восстановления напряжения и при несимметричных провалах.

2.2. ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Частота возникновения провалов для каждой части электрической сети различна. Для увеличения устойчивости потребителей при провалах напряжения используют три группы устройств.

А) Электроснабжение потребителей поддерживается внешним источником. Для защиты чувствительного к провалам напряжения электрооборудования используются устройства (маховик и статический ИБП), которые могут защитить от всех провалов напряжения. Продолжительность защиты от провала напряжения зависит только от количества запасенной энергии.

Б) Повышение напряжения до необходимого для работы уровня. Системы СТАТКОМ и ДКИН используют оставшееся напряжение в сети в качестве начального уровня, к которому добавляют недостающую часть напряжения. Если они не могут восстановить напряжение до номинального значения, то часто восстановление его к уровню $0{,}94U_{ном}$ обеспечивает неотключение нагрузки. Напряжение будет считаться восстановленным, если оно (напряжение сети в течение провала плюс добавочное напряжение) будет достаточным для обеспечения нормальной работы нагрузки.

С) Нагрузка питается от сети, даже в течение провала. Чтобы сохранить постоянное питание нагрузки, такие системы, как активный фильтр, повышающий преобразователь и бестрансформаторное устройство с добавкой напряжения, компенсируют провал напряжения, пропуская более высокий ток через свою сеть. Поэтому максимальное значение провала, который может быть компенсирован, зависит от номинального тока этих устройств.

Устройства группы Б поднимают напряжение до определенного уровня, обеспечивающего работу потребителей. Если технологический процесс на производстве чувствителен к провалам $\Delta U_п$, то это производство может быть оборудовано защитными системами из группы Б, такими как ДКИН, который имеет способность повышать напряжение на ΔU, тогда общая нечувствительность процесса к провалам напряжения будет равной $-\Delta U_п - +\Delta U$. С другой стороны, системы из группы С защищают технологический процесс от провалов с определенным уровнем восстановления напряжения. При установке защитных систем из группы С число остановок электрооборудования снизится, если допускаемый провал напряжения составит 30 % по сравнению с начальным значением, определенным ГОСТ 13109–97 в 10 %.

Решения о закупке исправляющего оборудования для предотвращения повреждений, вызванных провалами напряжения, зависит от стоимости устройств защиты и срока их окупаемости. В Европе известны три ценовые категории: более 250 евро/кВ · А; от 150 – 250 евро/кВ · А; менее 150 евро/кВ · А.

Нужно отметить, что низкая стоимость решения имеет высокое значение при закупке оборудования. Принимая в расчет то, что стоимость электроэнергии в Европе 0,05 евро/(кВт · ч); а эффек-

тивность равна 97 %, ежегодные потери при установке 1 кВт составят 13,1 евро. Учитывая процентную ставку по кредиту в банке, равную 10 %, потери за 10 лет составят 80,4 евро за каждый 1 кВт · ч.

Время реакции защитных устройств или переходного процесса можно разделить на три категории:

а) менее 1 мс;

б) от 1 – 5 мс;

в) более 5 мс.

Чтобы проанализировать стоимость ожидаемых сокращений отключений нагрузки и стоимость защитного оборудования, используем формулу:

$$K_{пр}K_{откл} \geq \frac{C_{вл}}{C_{пров}}\left[\frac{(1+k)^{T_р}(k+C_{обсл})-C_{обсл}}{(1+k)^{T_р}-1}\right],$$

где $C_{вл}$ — первоначальные вложения на каждый 1 кВ · А; $K_{откл}$ — число ежегодных отключений в зависимости от числа провалов; $K_{пр}$ — доля предотвращенных отключений, %; $K_{пр}K_{откл}$ — ежегодные предотвращенные отключения; $C_{пров}$ — стоимость отключения 1 кВ · А за период провала напряжения; $C_{обсл}$ — стоимость обслуживания 1 кВ · А в год, % $C_{вл}$; k — корректирующий фактор; $T_р$ — проектное время.

При использовании оптимистичных значений для защитных устройств (таких как $C_{вл}$ = 100 евро/(кВ · А); $C_{обсл}$ = 0, $K_{пр}$ = 100 %) эта формула будет использоваться для определения сокращения стоимости отключений в зависимости от стоимости описанных здесь защитных устройств.

2.3. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Согласно ГОСТ 13109–97 ***провал напряжения*** — это снижение напряжения на шинах электроприемника глубиной более 10 % $U_{ном}$ длительностью до 30 с с последующим восстановлением [11]. Допустимые значения провалов напряжения для различных электроприемников не нормируются.

За рубежом существует несколько стандартов допустимых показателей провалов напряжения, разработанных для компьютер-

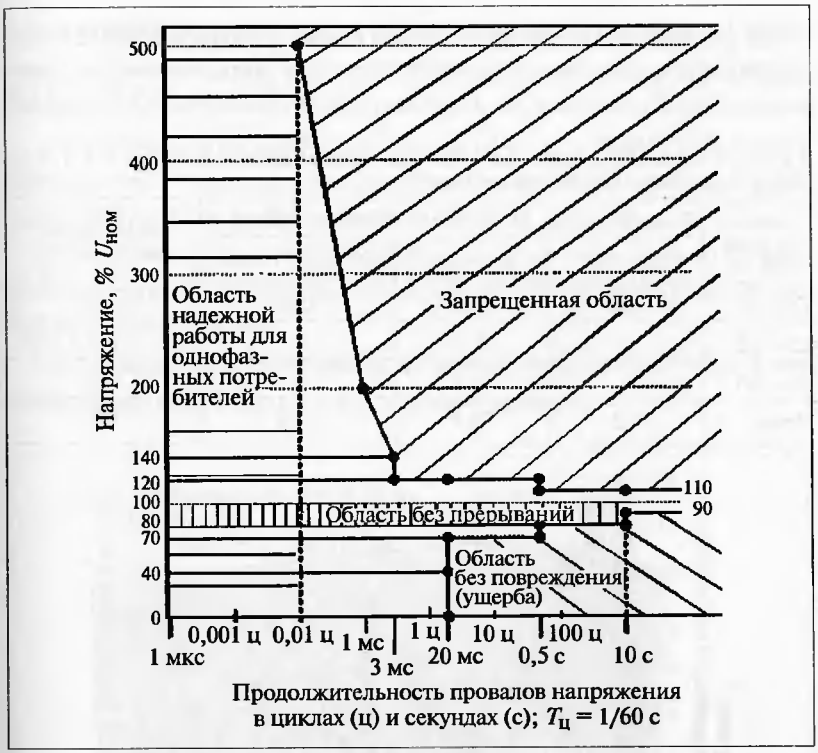


Рис. 2.9. **Допустимые значения отклонения напряжения по стандарту ITIC (Ассоциация производителей вычислительного оборудования и оргтехники)**

ного оборудования и предприятий по производству микросхем (рис. 2.9) [2, 4].

Воздействие КНЭ на работу потребителей электрической энергии предприятий зависит от глубины и длительности провалов напряжения. Проведенные научные исследования показали, что при глубине провалов напряжения, не превышающей 10 % независимо от их длительности, помехочувствительные электрические приемники предприятий устойчивы к воздействию КНЭ. Поэтому из всех имеющихся осциллограмм КНЭ были исключены те, где глубина провала $\delta U_п \leq 10$ %. Пример распределения провалов напряжения по глубине, длительности и частоте появления приведен в табл. 2.1.

Во второй половине 90-х годов XX века в США и Канаде были проведены энергетические обследования большого числа промышленных предприятий. Результаты этих обследований (рис. 2.10)

Таблица 2.1. **Характеристики провалов напряжения для линии W1 110 кВ Белорусского металлургического завода**

Глубина провала $\delta U_п$, %	Доля интервалов, %, при длительности провалов $\delta t_п$, с			Общий провал напряжения, %
	0,01 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,35 и более	
10 – 25	6,3	52,1	22,9	81,3
25 – 35	0	8,3	0	8,3
35 – 60	0	10,4	0	10,4
Итого	6,3	70,8	22,9	100

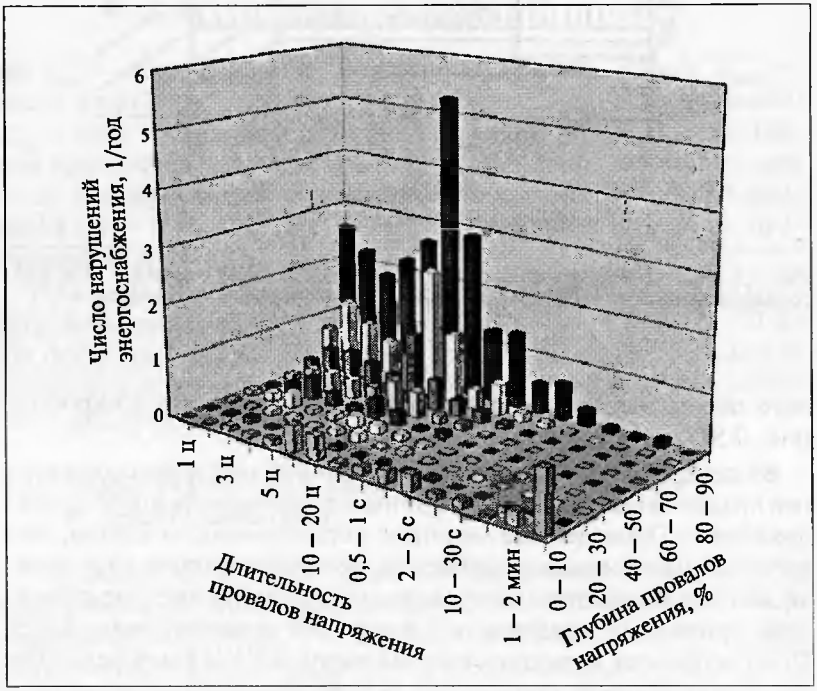


Рис. 2.10. **Статистические показатели провалов напряжения в электрических сетях высокого напряжения США (по данным Electric Power Research Institute-EPRI и Electritek)**

имели большое значение для разработки новых концепций защиты промышленного электрооборудования от провалов напряжения.

Из приведенных графиков (рис. 2.10 и 2.11) видно, что подавляющее число провалов напряжения (более 90 %) имеют длительность менее 1 с и глубину не более 50 % $U_{ном}$ [2, 3].

Разработка технических мероприятий по повышению безаварийной работы электродвигательной нагрузки предприятий требует решения задач:

а) повышения напряжения на шинах секций подстанций при снижениях напряжения и КЗ в энергосистеме;

Рис. 2.11. **Статистические показатели провалов напряжения в СЭС**

б) снижение чувствительности двигательной нагрузки к провалам напряжения;

в) снижение вероятности возникновения таких КНЭ в энергосистеме, системе промышленного электроснабжения (СПЭ), при которых нарушается нормальная работа потребителей;

г) использование динамических компенсаторов провалов напряжения и т. п.

До последнего времени проблема влияния КНЭ на работу электроприемников решалась исключительно с помощью источников бесперебойного питания с аккумуляторным либо инерционным накопителями энергии. Провалы напряжения в десятые доли секунды очень часто приводят к частичной или полной остановке сложного автоматизированного производства. Прямые и косвенные ущербы предприятий и организаций достигают сотен тысяч и даже десятков миллионов рублей в год.

В настоящее время появились полностью управляемые вентили (ПУВ): IGBT — биполярный транзистор с изолированным затвором; GTO — запираемый тиристор; IGCT — запираемый тиристор с интегрированным блоком управления, что сделало возможным производство активных фильтров и преобразователей напряжения, способных повышать качество электроэнергии.

Рассмотрим наиболее перспективные решения, которые предложены зарубежными поставщиками (США, Канада, Франция, Финляндия и др.):

а) устройства компенсации реактивной мощности СТАТКОМ (система статической компенсации реактивной мощности) [4, 7];

б) динамические компенсаторы искажений напряжения (ДКИН) [3, 4], представляющее собой устройство с двукратным преобразованием напряжения.

2.4. СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Устройство компенсации реактивной мощности типа СТАТКОМ. Устройство СТАТКОМ (система статической компенсации реактивной мощности) предназначено для компенсации реактивной мощности резкопеременной нагрузки $Q_н$. В схеме СТАТКОМ с ПУВ (рис. 2.12) имеется двухуровневый преобразователь напряжения ПН, выполненный на основе транзисторов или тиристоров

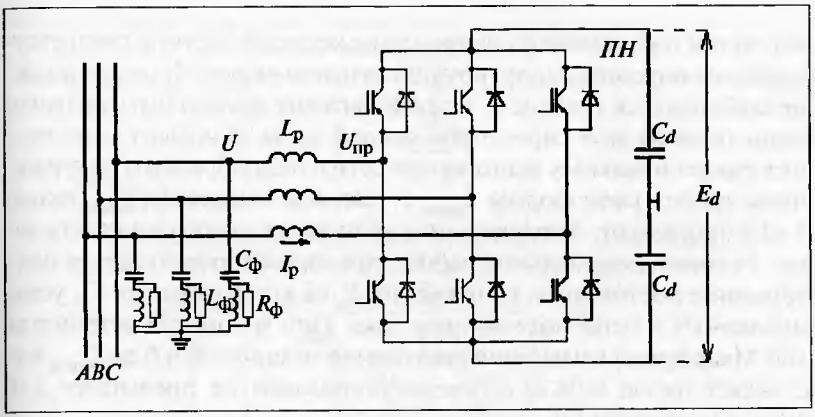


Рис. 2.12. **Схема устройства СТАТКОМ:**
U — напряжение на шинах переменного тока; $U_{пр}$ — напряжение преобразователя; C_d — конденсаторная батарея на стороне постоянного напряжения (E_d); $L_р$ — фазный реактор; $C_ф$, $L_ф$, $R_ф$ — емкость, индуктивность и активное сопротивление широкополосного фильтра для компенсации высших гармоник

с параллельными диодами с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) сигнала несущей частоты [7]. Широкополосный фильтр с элементами ($C_ф$, $L_ф$, $R_ф$) настроен на компенсацию требуемых высших гармонических составляющих.

Устройство позволяет генерировать или потреблять реактивную мощность $Q_{СТАТКОМ}$, следовательно, реактивная мощность узла нагрузки может изменяться от $Q_н + Q_{СТАТКОМ}$ до $Q_н - Q_{СТАТКОМ}$. При выдаче мощности ($Q_{СТАТКОМ} > 0$) $U < U_п$, а при потреблении ее ($Q_{СТАТКОМ} < 0$) $U > U_п$. Обычно мощность устройства $Q_{СТАТКОМ}$ несколько больше максимальной реактивной мощности нагрузки $Q_н$, чтобы гарантированно обеспечить возможность поддержания заданного коэффициента мощности нагрузки. При снижении напряжения система СТАТКОМ переходит в режим источника тока, независимого от напряжения в узле нагрузки.

Для управления устройством СТАТКОМ используется генератор напряжения несущей частоты ШИМ (не показанный на рис. 2.12), создающий три синусоидальных модулирующих напряжения, образующих трехфазную систему. Управление транзисторами (тиристорами) каждой фазы осуществляется независи-

мо, путем наложения на напряжение несущей частоты соответствующей синусоиды модулирующего напряжения. При этом должно соблюдаться условие — в любой момент должен быть включен лишь один из двух тиристоров каждой фазы. В момент пересечения синусоидальных напряжений сети с пилообразным напряжением треугольной формы $u_{шим}$ с частотой изменения $f_{шим}$ около 1 кГц происходит формирование импульсов управления вентилями. Условием нормальной работы преобразователя является поддержание постоянным напряжения E_d на конденсаторах C_d, установленных в цепи постоянного тока. При мощности устройства 160 Мвар время изменения реактивной мощности от 0 до $Q_{ном}$ составляет около 0,08 с, а перерегулирование не превышает 5 % скачка мощности [7].

Компенсаторы выполняют следующие основные функции:

- регулирование напряжения в узле нагрузки за счет изменения потоков реактивной мощности;
- подавление колебаний напряжения за счет компенсации резкопеременной реактивной мощности;
- устранение несимметрии напряжения, вызванной неравномерным распределением реактивной мощности по фазам;
- повышение устойчивости узла нагрузки за счет того, что при провалах напряжения СТАТКОМ работает в режиме источника тока.

Устройство СТАТКОМ имеет более высокую эксплуатационную надежность, чем синхронные компенсаторы. В отличие от тиристорно-реакторных групп СТАТКОМ снижает вероятность возникновения резонансных явлений, обусловленных наличием конденсаторных батарей.

Динамические компенсаторы искажений напряжения как надежное устройство защиты электрооборудования от КНЭ. Динамические компенсаторы искажений напряжения представляют собой устройство с двукратным преобразованием напряжения, вход которого подключен к системе электроснабжения (рис. 2.13). Через управляемый выпрямитель напряжение подается на конденсаторы C_d; через управляемый инвертор на базе ПУВ и через вольтодобавочный трансформатор ВДТ выход ДКИН подключен к нагрузке. Вторичная обмотка ВДТ включена последовательно с нагрузкой, и в ней наводится напряжение $dU_в$, компенсирующее провал напряжения в системе электроснабжения (СЭС).

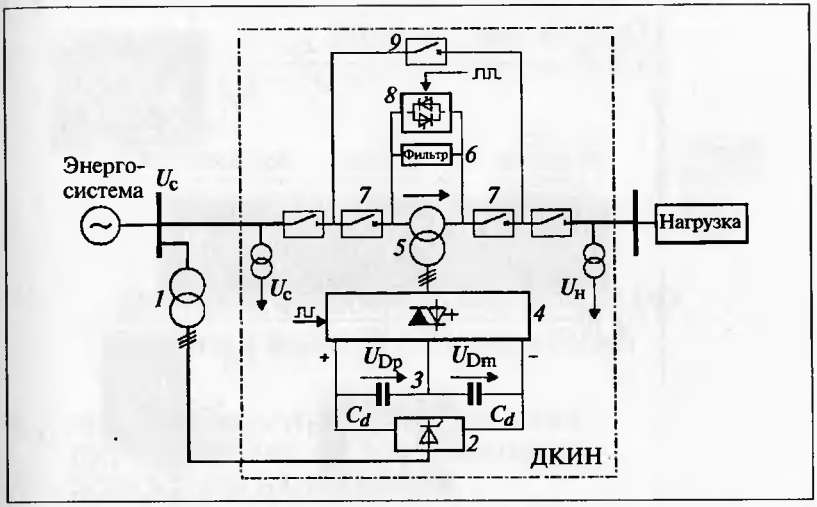


Рис. 2.13. **Функциональная схема работы устройства ДКИН:**
U_c — напряжение энергосистемы; $U_н$ — напряжение на нагрузке; U_{Dp} — положительное напряжение постоянного тока; U_{Dm} — отрицательное напряжение постоянного тока; $dU_в$ — напряжение компенсации провала; *1* — входной трансформатор; *2* — тиристорный управляемый выпрямитель; *3* — аккумулирующие конденсаторы; *4* — управляемый инвертор на базе ПУВ; *5* — вольтодобавочный трансформатор; *6* — фильтр высших гармонических составляющих напряжения; *7* — выключатели; *8* — защитное устройство ДКИН; *9* — байпасный выключатель

В отличие от СТАТКОМ с поперечным подключением к узлу нагрузки, подключение ДКИН последовательное. При возникновении провала напряжения в СЭС остаточное напряжение прямой последовательности более чем в 90 % случаев выше 50 % $U_{ном}$. Поэтому ДКИН сохраняет питание от СЭС и полностью компенсирует провал напряжения на нагрузке $U_н$ за счет напряжения $dU_в$ в течение 2 с. Управление инвертором на базе ПУВ пофазное, при несимметричных провалах напряжения компенсация провала $dU_в$ ВДТ будет также несимметричной, но такой, чтобы напряжение $U_н$ было симметричным и равным (близким) номинальному в течение всего периода провала напряжения сети.

Основные цели устройства ДКИН [3, 4]:

- устранение несимметрии по фазам и несинусоидальности в нормальном режиме работы;

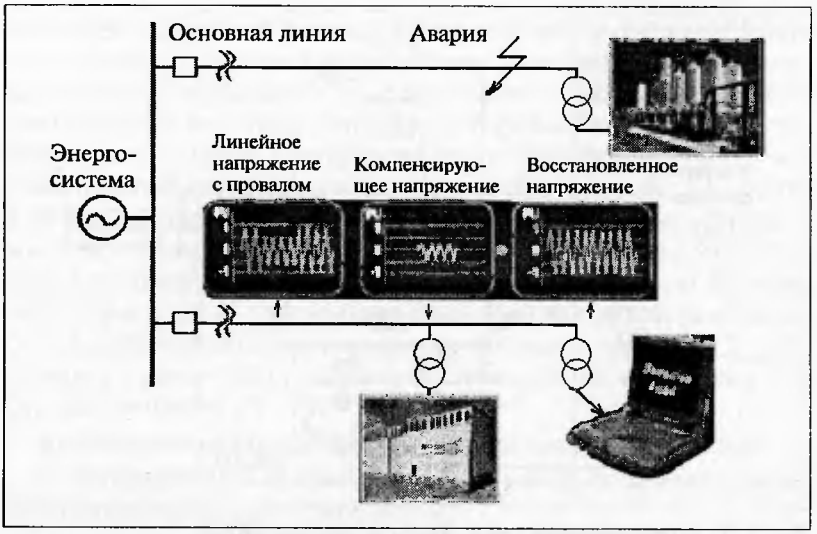


Рис. 2.14. **Диаграмма работы ДКИН при нарушениях электроснабжения**

- обеспечение надежного и непрерывного электроснабжения потребителей за счет IGBT-преобразователя напряжения и вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) в случае аварийных и ненормальных режимов в электрических сетях (рис. 2.14).

Устройство ДКИН обеспечивает:

- частичную или полную защиту от всех видов КЗ (при трехфазных провалах напряжения в цепи питания до нуля номинальное (или близкое к нему) напряжение поддерживается в течение 200 мс, а при провалах напряжения глубиной до 50 % — в течение 2 с);
- время реакции на кратковременные нарушения электроснабжения — не более 2 мс;
- эффективность работы устройств более 98,8 % при 100%-ной нагрузке по отношению к мощности компенсатора;
- компенсацию гармонических составляющих и фликера;
- синусоидальную форму выходного напряжения;
- симметрирование напряжения на нагрузке.

В состав ДКИН не входят аккумуляторные батареи, поэтому оно отличается высокой надежностью, низкой потребляемой мощностью и малыми затратами на эксплуатацию.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Динамический компенсатор искажений напряжения

3.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ДОСТОИНСТВА ДИНАМИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Структурная схема работы ДКИН приведена на рис. 3.1. Система управления непрерывно контролирует выходное напряжение и сравнивает его с заданным пороговым уровнем напряжения. Если выходное напряжение поставки меньше заданного значения, преобразователь источника напряжения немедленно начинает вводить дифференциальное напряжение и поддерживать номинальное напряжение на стороне нагрузки.

Динамические компенсаторы искажений напряжения представляют собой устройство с двукратным преобразованием напряжения, вход которого подключен к системе электроснабжения. Через управляемый выпрямитель напряжение подается на конденсаторы C_d. Выход ДКИН через управляемый инвертор на базе полностью управляемых вентилей и через вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) подключен к нагрузке. Вторичная обмотка ВДТ включена последовательно с нагрузкой, и в ней наводится напряжение $dU_в$, компенсирующее провал напряжения в системе электроснабжения (СЭС) [3, 4].

Динамический компенсатор искажения напряжения предназначен для того, чтобы компенсировать влияние провалов напряжения на линиях в местах подключения чувствительного к искажениям напряжения оборудования. Нормальное электроснабжение осуществляется и при провалах напряжения в питающей системе электроснабжения в связи с тем, что ДКИН регулирует

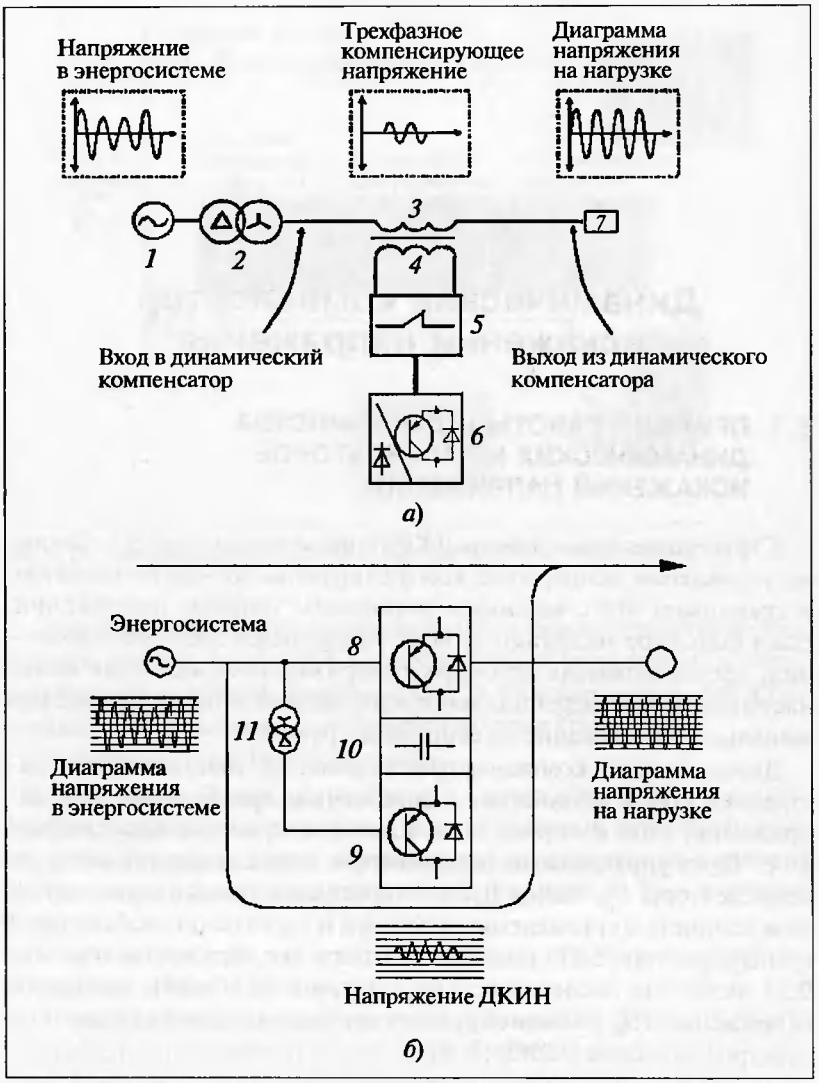


Рис. 3.1. **Структурная схема работы ДКИН:**

а — с вольтодобавочным трансформатором; *б* — с согласующим трансформаторами при КНЭ; *1* — трехфазный источник электроснабжения; *2* — питающий трансформатор; *3* — вторичная обмотка ВДТ; *4* — первичная обмотка ВДТ; *5* — выключатель; *6* — преобразователь напряжения; *7* — нагрузка; *8* — инвертор; *9* — выпрямитель; *10* — конденсаторная батарея; *11* — согласующий трансформатор

напряжение на нагрузке, приближая его к номинальному значению и устраняя КНЭ от энергосистемы. Устройство ДКИН-AS за 1 мс обеспечивает отклик на провал напряжения с последующим полным восстановлением напряжения в следующую половину цикла. Динамический компенсатор искажения напряжения обес-

Таблица 3.1. **Сравнительные технические характеристики ДКИН**

Показатель	ДКИН-SS	ДКИН-AS
Входное напряжение, В	480	380; 480; 690 до 15000
Кратковременная перегрузочная способность по току	200 % — 30 с	125 % — 10 мин
	400 % — 5,0 с	150 % — 1 мин
	600 % — 0,5 с	700 % — 0,6 с
	—	1000 % — 0,1 с
Частота сети, Гц	50/60	50/60
Эффективность работы при 50%-ной загрузке, %	99	99
Выходное напряжение, В	480	380; 480; 690 до 15000
Регулирование напряжения, %	+5 ÷ –10	—
Перегрузочная способность по току, %	160	160
Время реакции устройства, мс	Не более 2	От 2 – 4
Допустимая длительность трехфазных провалов напряжения до 50 %, с	2	Зависит от исполнения
Допустимая длительность двухфазных провалов напряжения до 70 %, с	2	Зависит от исполнения
Допустимая длительность однофазных провалов напряжения до 100 %	2	Зависит от исполнения
Мощность устройства, кВ · А	333; 665; 1000; 1300; 1700; 2000	До 6000 (при $U_{ном}$ = 380 В)
Номинальные токи устройств, А	400; 800; 1200; 1600; 2000; 2400	Зависит от исполнения
Стандартная степень защиты шкафа	IP20	IP21
Подвод кабеля	Сверху, снизу	Сверху, снизу
Условия эксплуатации, °С	0 – 40	0 – 50

Рис. 3.2. **Диаграмма работы ДКИН при различных видах КЗ:**
A — область защиты при трехфазном КЗ; *A* + *B* — область защиты при междуфазном КЗ; *A* + *B* + *C* — область защиты при однофазном КЗ

Рис. 3.3. **Диаграмма работы ДКИН с расширенным диапазоном защиты (по времени провала) при КЗ:**
A — область защиты при трехфазном КЗ; *A* + *B* — область защиты при междуфазном КЗ; *A* + *B* + *C* — область защиты при однофазном КЗ

печивает полную компенсацию провалов напряжения в пределах номинального при перегрузках по току 200 % в течение не менее 30 с, частичное исправление для трехфазных провалов напряжения вплоть до 50 % и однофазных провалов до 55 % в течение не менее 30 с (табл. 3.1).

Динамические компенсаторы искажений напряжения имеют исполнения:

- *по входному напряжению:*

380, 480, 690, 6000, 10 000, 35 000, 138 000 В;

- *по мощности устройств:*

380 В: от 25 до 6000 кВ · А;

6(10) кВ: от 1000 до 50 000 кВ · А;

- *с системой водяного и/или воздушного охлаждения;*
- *контейнерного или шкафного исполнения;*
- *по условиям эксплуатации:*

–20 ÷ +40 °С;

–40 ÷ +50 °С.

Основные преимущества ДКИН:

- защита от всех видов коротких замыканий (рис. 3.2, 3.3, табл. 3.2);
- время реакции на кратковременные нарушения электроснабжения 2 мс;
- эффективность работы устройств более 98,8 % при 100%-ной нагрузке;
- низкая потребляемая мощность и малые эксплуатационные затраты;
- компенсация гармонических составляющих, фликеров;

Таблица 3.2. **Минимальный уровень остаточных напряжений на стороне распределения для ДКИН и исправление их к уровню 90, 95 и 100 %**

Причина КНЭ	Выходное напряжение, %, не менее	Минимальное входное напряжение, %, при заданном выходном	
		ДКИН-S	ДКИН-R
Трехфазное КЗ	90	63	72
Междуфазное КЗ	90	58	68
Однофазное на землю	90	40	55
Трехфазное КЗ	95	67	76
Междуфазное КЗ	95	64	74
Однофазное на землю	95	48	63
Трехфазное КЗ	100	70	80
Междуфазное КЗ	100	70	80
Однофазное на землю	100	55	70

- синусоидальная форма выходного напряжения;
- отсутствие аккумуляторных батарей и высокая надежность.

Отклик на кратковременные нарушения электроснабжения (провалы напряжения) ДКИН намного превышает показатели аналогичных устройств корректировки напряжения.

3.2. ДИНАМИЧЕСКИЙ КОМПЕНСАТОР ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В

Сравнительная стоимость источника бесперебойного питания (ИБП) мощностью 400 кВ · А и ДКИН (мощностью 333 кВ · А) напряжением 380 В приведена на рис. 3.4 и в табл. 3.3.

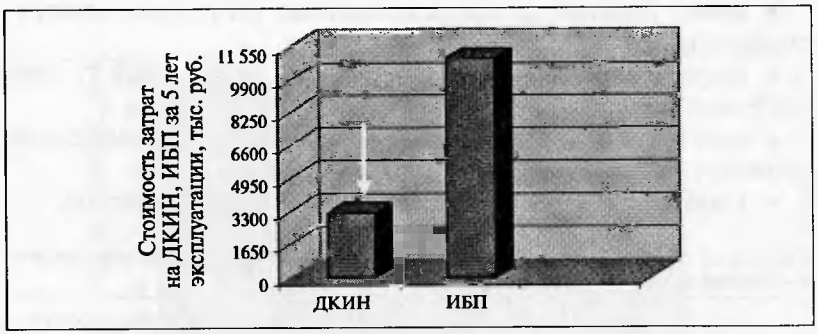


Рис. 3.4. **Сравнительная стоимость ДКИН и ИБП**

Таблица 3.3. **Сравнительный анализ эффективности устройств компенсации искажений напряжения**

Показатель	ДКИН	ИБП
Первоначальная стоимость устройства, тыс. руб.	2400	3450
Эффективность работы, %	99	93
Потребляемая мощность в год, тыс. кВт · ч	25,4	165,7
Стоимость затрат на электроэнергию, тыс. руб.	45	678
Общие затраты за 1 год, тыс. руб.	2505	4908
Общие затраты за 5 год, тыс. руб.	2928	10 014

Одной из ключевых особенностей является то, что ДКИН непосредственно связан со вторичной обмоткой ВДТ. Подключение ДКИН напряжением 380 В зависит от типа системы заземления (рис. 3.5). В четырех проводных сетях типа TN-C при входном напряжении меньше заданного значения ДКИН немедленно начинает вводить дифференциальное напряжение и поддерживать номинальное напряжение на стороне нагрузки $U_{ном}$ [2]. Необходимую энергию получают с помощью накопителя энергии (конденсаторной батареи). Постоянное напряжение непрерывно контролируется; конденсаторы, если требуется, снабжаются энергией от зарядного устройства.

Ответ на кратковременное нарушение нормального электроснабжения (обнаружение перекоса напряжения/провала до преобразователя и повторная стабилизация напряжения нагрузки) будет за 1(2) мс. Преобразователь ДКИН, используя высокую частоту переключения (типа PWM), способен выдавать быстрые распоряжения для ответов на искажения напряжений. Чтобы поддерживать допустимые отклонения напряжения, фильтр постоянного тока соединяется с конвертером на выходе ДКИН непосредственно.

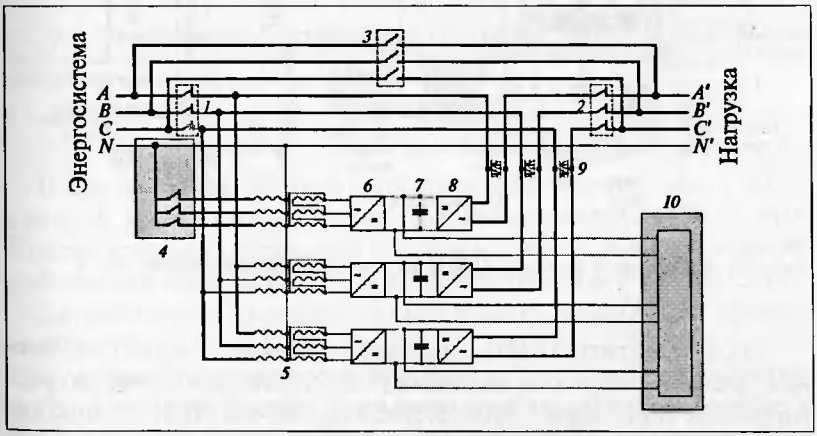


Рис. 3.5. **Схема аключения ДКИН напряжением 380 В:**
1, 2 — выключатели; *3* — байпасный выключатель; *4* — переключатель нейтрали; *5* — ВДТ; *6* — выпрямитель; *7* — звено постоянного тока; *8* — инвертор; *9* — защитная цепь ДКИН; 10 — накопитель энергии

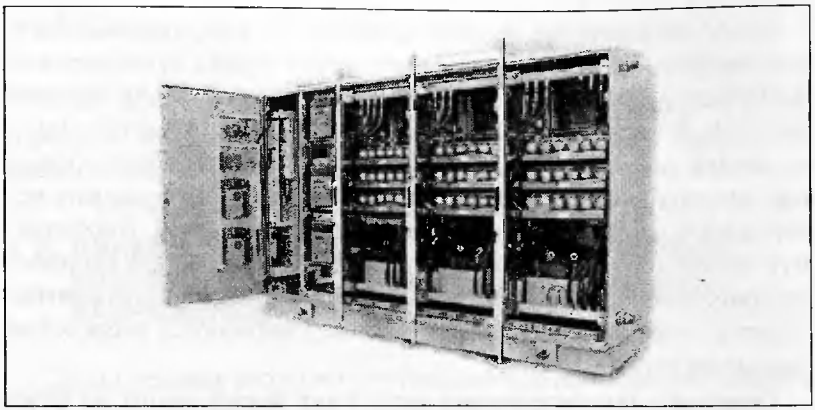


Рис. 3.6. **Внешний вид устройства ДКИН на ток 1500 А и напряжением 380 В**

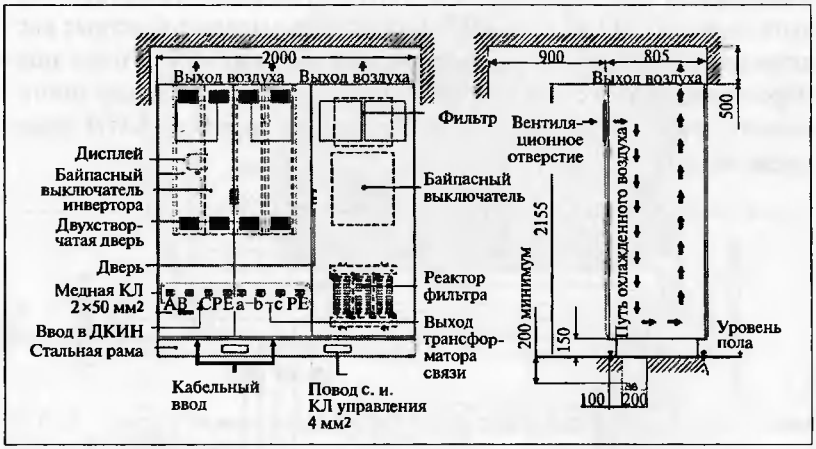


Рис. 3.7. **Габаритные размеры ДКИН на ток 1500 А и напряжение 380 В**

Чтобы защитить ДКИН (преобразователь источника напряжения) в случае КЗ со стороны нагрузки используются быстро реагирующие тиристоры *9* (рис. 3.5). Внешний вид ДКИН напряжением 380 В и на ток 1500 А приведен на рис. 3.6, откуда видно, что ДКИН установлен на раме, для охлаждения преобразователя напряжений используется водяное охлаждение. Габаритные размеры приведены на рис. 3.7.

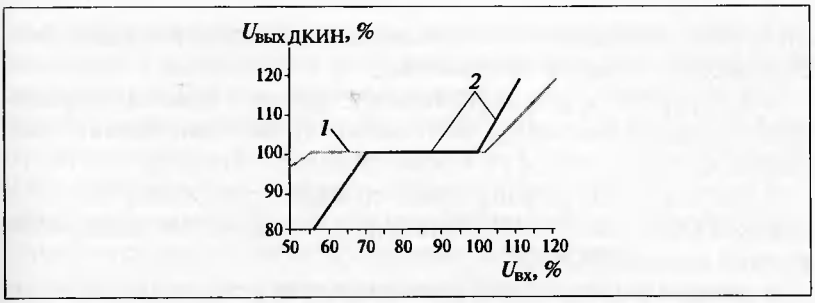


Рис. 3.8. **Характеристики регулирования напряжения устройством ДКИН-30 при КНЭ для схемы соединения обмоток трансформатора треугольник-звезда:**
1 — при однофазном КЗ; *2* — при трехфазном КЗ

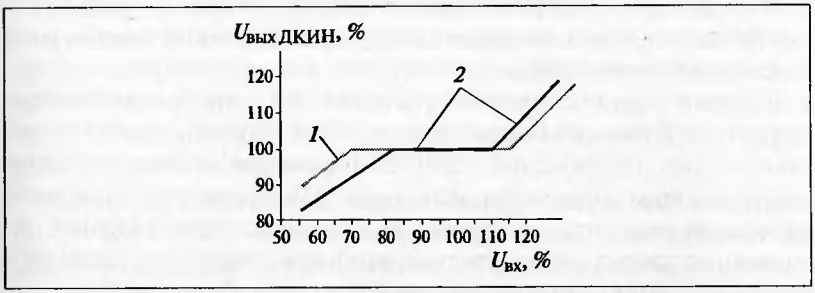


Рис. 3.9. **Характеристики регулирования напряжения ДКИН (с расширенным диапазоном компенсации провалов и перенапряжений) при КНЭ для схемы соединения обмоток трансформатора треугольник-звезда:**
1 — при однофазном КЗ; *2* — при трехфазном КЗ

В случае более глубокого падения напряжения или с более длинной продолжительностью ДКИН напряжением 380 В продолжает устранять искажения напряжения в максимально возможной степени согласно характеристике устройства (рис. 3.8, 3.9).

Динамический компенсатор искажений напряжения обеспечивает:

- полное восстановление трехфазных провалов до номинального уровня или уровня, определенного спецификой модели, с поддержанием заданного значения в течение 200 мс при провалах напряжения глубиной до 100 % номинального;
- исправление симметричных трехфазных падений напряжения глубиной до 50 % и однофазных провалов глубиной до 55 %,

до уровня, определенного спецификой модели, с поддержанием заданного значения в течение 30 с;

- непрерывное регулирование трехфазного провала напряжения и провалов вплоть до 90 % номинального напряжения. Возможен выбор для более глубоких продолжающихся провалов;
- непрерывное регулирование трехфазных перенапряжений и скачков вплоть до 110 % номинального напряжения (для расширенной модели ДКИН);
- исправление несимметрии напряжения со стороны сети (от трансформатора);
- ослабление дозы фликера в напряжении;
- автоматическую компенсацию линейных падений напряжения до нагрузки.

Таким образом, ДКИН обеспечивает потребителю высокое качество напряжения, защищает нагрузку от большинства обычных искажений напряжения.

Динамический компенсатор искажений напряжения контролирует поступающее напряжение и, когда оно отклоняется от номинального напряжения, ДКИН формирует соответствующее напряжение компенсации, используя IGBT-инвертор и последовательные реакторы. Динамический компенсатор искажений напряжения предназначен для того, чтобы смягчить провалы напряжения на линиях, питающих чувствительное оборудование.

Таким образом, электроснабжение осуществляется все время, а ДКИН обеспечивает напряжение на нагрузке, равное номинальному или близкое к нему, устраняя кратковременные нарушения электроснабжения от энергосистемы. Стоимость ДКИН мощностью 320 кВ · А в 3,8 раза меньше стоимости ИБП. Мощность устройства ДКИН напряжением 380 В на треть меньше номинальной мощности ИБП, используемого для тех же целей.

3.3. ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ДИНАМИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Быстрое исправление провалов напряжения. Устройство ДКИН-AS обеспечивает очень быстрый отклик за 1 мс на провал напряжения, с восстановлением напряжения наполовину в течение 1 мс, обеспечивая полное восстановление напряжения в следующей половине цикла. Это обеспечивает полное регулирование прова-

лов напряжения в пределах номинального в течение не менее 30 с, частичного исправления для трехфазных провалов напряжения глубиной до 50 % и однофазных провалов до 35 % в течение не менее 30 с, что гарантирует продолжение работы электрической нагрузки без перерывов, когда происходят провалы напряжения. Отклик на кратковременные нарушения электроснабжения (провалы напряжения) ДКИН намного превышает показатели аналогичных устройств для корректировки напряжения.

Хорошая точность регулирования. Динамический компенсатор искажений напряжения обеспечивает непрерывное регулирование в пределах 1 % номинального напряжения, когда напряжение изменяется в пределах 90 — 100 % (или в пределах 90 — 110 % для ДКИН с расширенным диапазоном регулирования). Такое регулирование позволяет улучшить или оптимизировать точность и надежность работы электрической нагрузки вследствие стабильности электроснабжения. Регулирование выходного напряжения продолжается не только, когда происходят скачки напряжения, в отличие от других аналогичных устройств, но и когда нет дискретного изменения выходного напряжения.

Изменение несимметрии напряжения. Динамический компенсатор искажений напряжения устраняет несимметрию напряжения от источника. Если в поставляемом напряжении присутствует несимметрия, то это значительно уменьшает токи, протекающие по трехфазным двигателям, и соответственно увеличивает их срок службы.

Исправление дозы фликера. Динамический компенсатор искажений напряжения уменьшает дозу фликера в поставляемом напряжении до принятых номинальных значений. Мерцание напряжения проявляется в лампах накаливания, флюоресцентных и дуговых лампах, производящих мерцающий свет, который становится более заметным, когда частота изменения напряжения приближается к 8,8 Гц. Такой мерцающий свет может чрезвычайно раздражать работающих людей и уменьшать их производительность.

Выравнивание уровня напряжения. Динамический компенсатор искажений напряжения может быть сконфигурирован так, чтобы обеспечить компенсацию падения напряжения в линии, питающей нагрузку. Динамический компенсатор искажений напряжения убирает падение напряжения по всей линии при больших на-

грузках, таким образом обеспечивая постоянное напряжение в конце линии на вводе в нагрузку.

Высокая эффективность. Динамический компенсатор искажений напряжения имеет эффективность более 98 % при полной нагрузке и по этому показателю значительно превосходит аналогичные устройства. Эффективность ДКИН выше, когда не требуется корректировки напряжения.

Высокая надежность. Динамический компенсатор искажений напряжения состоит из испытанного временем инвертора, основанного на технологии, которая используется в устройствах управления электродвигателями на протяжении уже 15 лет.

Устойчивость к перегрузкам. Динамический компенсатор искажений напряжения рассчитан на 150%-ную перегрузку (от номинальной нагрузки, кВ · А) при обеспечении 10 % непрерывных исправлений.

Восприимчивость оборудования к провалам напряжения. Все электронное оборудование ДКИН имеет некоторый уровень невосприимчивости к изменению напряжения, поэтому напряжение питания должно обеспечиваться на уровне 100 % номинального для нормального функционирования оборудования.

Кроме того, ДКИН имеет полный цифровой контроль выходного напряжения. Это включает необходимые средства управления, измерения, индикаторы и тревоги, чтобы позволить оператору контролировать статус системы и ход работы и совершать любые мероприятия в случае необходимости. Прибор включает в себя жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) размером 4 × 20 и ведет журналы ошибок и изменений напряжения.

Динамический компенсатор искажения напряжения:

- охватывает все мощности трансформаторных подстанций напряжением 380 В (от 50 до 6000 кВ · А);
- охватывает почти все мощности трансформаторных подстанций напряжением 6(10) кВ (от 1000 до 50 000 кВ · А);
- предназначен для защиты чувствительной к искажениям электроэнергии нагрузки напряжением от 208 В до 138 кВ;
- обеспечивает быстрое исправление провалов напряжения (1 – 4 мс);
- в номинальном режиме защищает нагрузку от других проблем с напряжением (небаланс, фликер, гармоники);
- работает при температуре окружающей среды от –40 до +50 °С;

- непрерывно осуществляет управление выходным напряжением (недискретное изменение);
- выпускаются с уровнем компенсации провалов напряжения величиной 15, 20, 30 или 35 %.

Динамический компенсатор искажений напряжения обеспечивает исправление следующих искажений напряжения:

- провалов напряжения, вызванных КЗ в питающих сетях;
- несимметрии напряжения;
- гармонического искажения напряжения (например, 5, 7, 11 и 13-я гармоники);
- дозы фликера;
- провалов напряжения, вызванных ошибками во внешней питающей сети.

Динамический компенсатор искажений напряжения, таким образом, обеспечивает потребителя электроэнергией высокого качества, защищая нагрузку от большинства обычных кратковременных нарушений электроснабжения. Это гарантирует, что нагрузка продолжит работать при номинальном напряжении или близком к номинальному, когда напряжение поставки снижается.

Устройство ДКИН обеспечивает: минимальные капитальные затраты, высокую надежность, компактность, высокий КПД, простую интеграцию с системой релейной защиты, незначительные расходы на техническое обслуживание, время компенсации провалов напряжения глубиной менее 50 % более 1 ч. Максимальное время компенсации отключений электроснабжения может составлять 3 с при использовании дополнительных конденсаторных батарей или других источников питания.

Динамический компенсатор искажений напряжения имеет полный цифровой контроль (управление) относительно выходного напряжения, включает необходимые средства управления, измерения, индикаторы и тревоги, чтобы позволить оператору контролировать состояние ДКИН и работу, выбирать любое соответствующее действие.

3.4. ОСЦИЛЛОГРАММЫ РАБОТЫ ДКИН ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Для ДКИН с задаваемой паспортной глубиной провала 30 % на рис. 3.10 – 3.18 приведены осциллограммы работы для разных

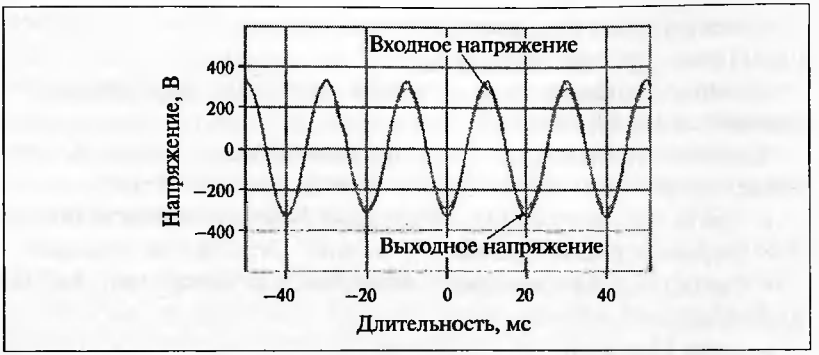


Рис. 3.10. **Реакция ДКИН на остаточное напряжение, равное 90 % номинального**

Рис. 3.11. **Реакция ДКИН на остаточное напряжение, равное 80 % номинального**

видов коротких замыканий и вызываемых ими нарушений электроснабжения [2].

Реакция ДКИН на симметричный трехфазный провал напряжения, равный 90 % номинального напряжения, показан на рис. 3.10. Такой провал может быть вызван запуском электродвигателя большой мощности или отдаленной аварией в сети распределения. Выходное напряжение ДКИН полностью восстановлено до номинального напряжения в течение 10 мс.

Реакция ДКИН на симметричный трехфазный провал напряжения, равный 80 % номинального напряжения, показана на рис. 3.11. Такой провал может быть вызван серьезной отдаленной аварией в энергосистеме. Из осциллограмм выходного напряже-

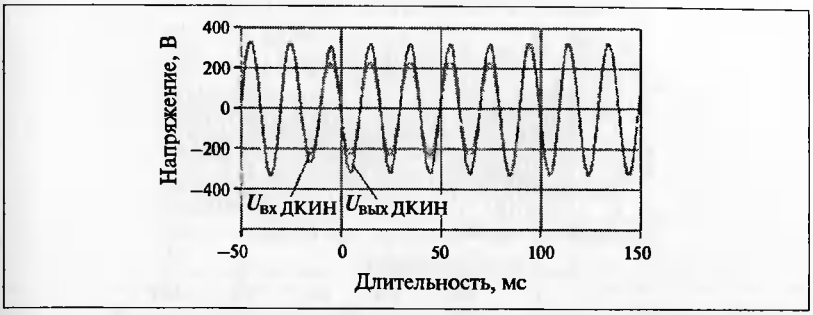


Рис. 3.12. **Реакция ДКИН на остаточное напряжение, равное 70 % номинального, длительностью 100 мс**

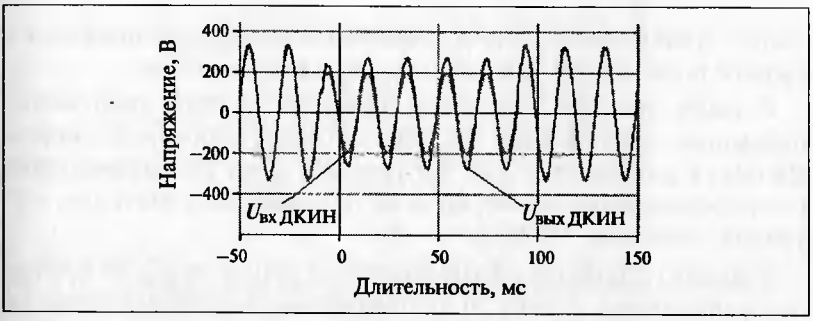


Рис. 3.13. **Реакция ДКИН на остаточное напряжение, равное 60 % номинального, длительностью 100 мс**

ния ДКИН следует, что напряжение на нагрузке полностью восстанавливается до номинального в течение 10 мс.

Реакция ДКИН на симметричный мгновенный трехфазный провал напряжения с остаточным напряжением 70 % номинального и длительностью провала 100 мс показан на рис. 3.12. Такой провал напряжения мог быть вызван каким-либо нарушением в питающей сети. Выходное напряжение ДКИН полностью восстанавливается до номинального в течение 10 мс.

Реакция ДКИН на симметричный мгновенный трехфазный провал напряжения глубиной 40 % номинального, длительностью 100 мс показана на рис. 3.13. Такой провал мог бы быть вызван какой-либо аварией в питающей энергосистеме. В этой си-

Рис. 3.14. **Реакция ДКИН на провал напряжения глубиной 50 % номинального и длительностью 1 с**

туации ДКИН частично восстанавливает выходное напряжение к уровню более чем 85 % номинального в течение 10 мс.

Следует отметить, что если провал питающего напряжения превышает паспортную глубину провала выбранной модели ДКИН (в данном случае 30 %), устройство все равно продолжит регулировать напряжение, но не до номинального значения, а до уровня, например, $0{,}9U_{ном}$.

Реакция устройства ДКИН на симметричное трехфазное падение напряжения, равное 50 % номинального, длительностью 1 с показана на рис. 3.14. Такой провал хотя и маловероятен, однако мог быть вызван коротким замыканием в распределительной сети среднего напряжения. Без защиты с помощью ДКИН это привело бы к ошибкам или остановке всего работающего оборудования на предприятии. Динамический компенсатор искажений напряжения частично исправляет выходное напряжение (обеспечивая более чем 71 % номинального). Электрическое оборудование, чувствительное к провалам, равным 70 % (или меньше) номинального, будет полностью защищено и продолжит работать без перерыва.

Реакция устройства ДКИН на однофазное падение напряжения на стороне нагрузки трансформатора, соединенного по схеме треугольник-звезда, равное 50 % номинального, длительностью приблизительно 130 мс показана на рис. 3.15. Такой провал случается относительно часто, может быть вызван ошибкой в местной распределительной сети и приводит к останову большинства

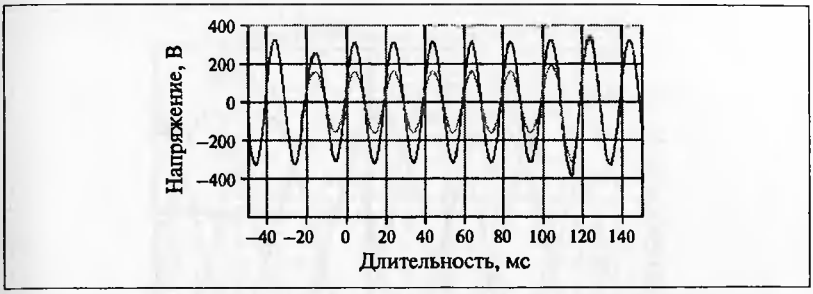


Рис. 3.15. **Реакция ДКИН на однофазный провал напряжения глубиной 50 % номинального и длительностью 130 мс**

Рис. 3.16. **Реакция ДКИН на междуфазный провал напряжения глубиной 50 % номинального и длительностью 100 мс**

электрического оборудования. Динамический компенсатор искажений напряжения восстанавливает выходное напряжение по этой фазе к уровню более 95 % номинального в течение 10 мс. Чувствительное электрическое оборудование будет полностью защищено от провала напряжения и продолжит работать без отключения.

Реакция ДКИН на провал междуфазного напряжения глубиной 50 % номинального значения и длительностью 100 мс показана на рис. 3.16. Такой провал может быть вызван ошибкой в местной распределительной сети, или даже ошибкой в высоковольтной сети, и приводит к останову большинство электрического оборудования. Динамический компенсатор искажений напряжения восстанавливает выходное напряжение в этой фазе к уровню более 75 % номинального в течение 10 мс. Поэтому электриче-

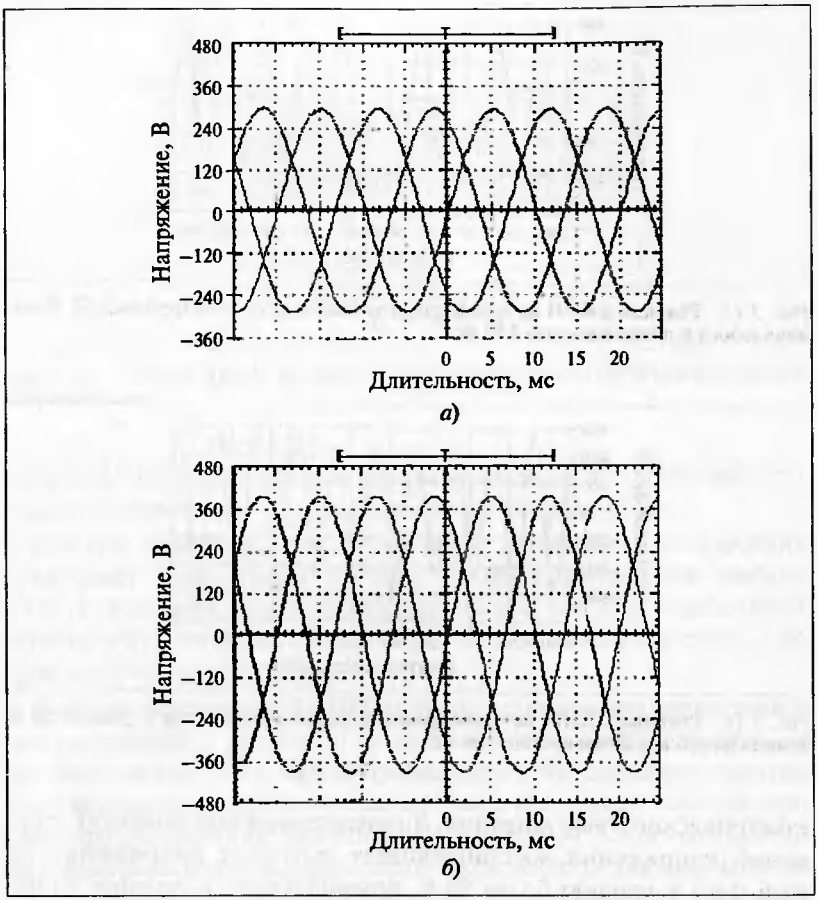


Рис. 3.17. **Осциллограмма провала напряжения глубиной 25 % номинального:** *а* — трехфазное входное напряжение с 25%-ным уменьшением значения амплитуды; *б* — исправленное выходное напряжение

ское оборудование, чувствительное к входному напряжению меньше чем 75 % номинального напряжения будет полностью защищено от провалов напряжения и продолжит работать без остановки.

Для случая провала напряжения глубиной 25 % номинального (трехфазное входное напряжение с пиковым значением напряжения, равным 293 В, рис. 3.17, *а*), выходное исправленное через

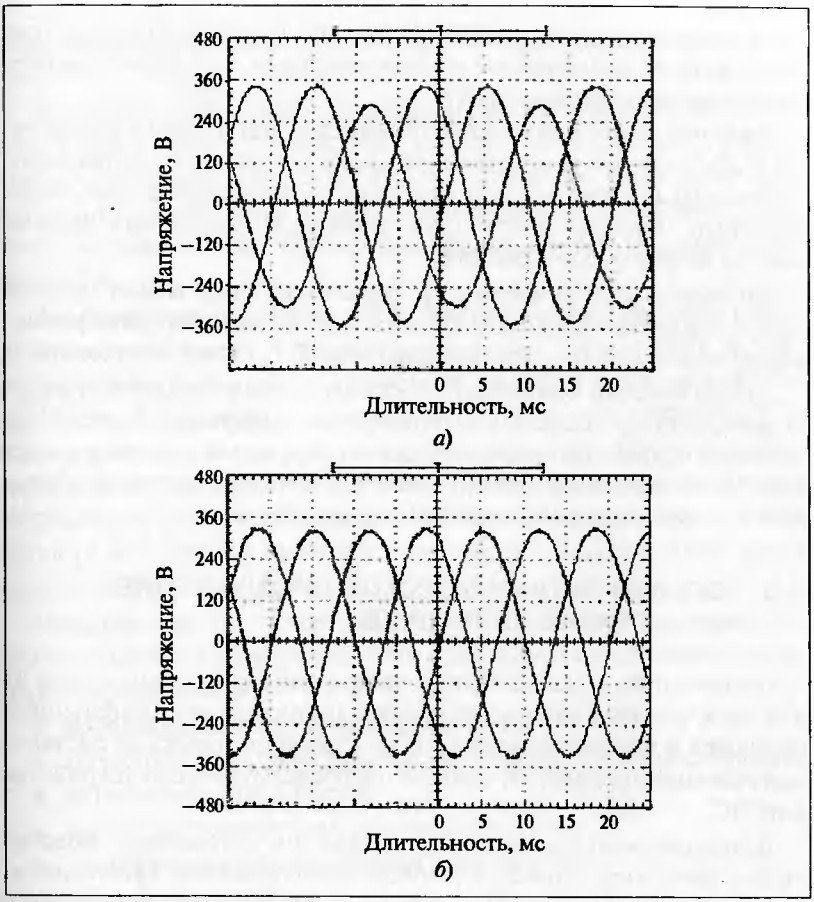


Рис. 3.18. **Осциллограммы несимметричного режима работы:**
а — несимметричные линейные напряжения с 10%-ной несимметрией; *б* — исправленное выходное напряжение

ДКИН напряжение с мгновенным значением 391 В (100 %) приведено на рис. 3.17, *б*. Как можно заметить, выходное напряжение симметрично и синусоидально, будучи полностью исправленным ДКИН.

Осциллограммы работы устройства ДКИН с 10%-ной несимметрией трехфазных входных линейных напряжений показаны на рис. 3.18, *а*, а на рис. 3.18, *б* изображены линейные выходные на-

пряжения, исправленные ДКИН. Можно заметить, что линейные напряжения симметричны и синусоидальны, т. е. полностью исправлены устройством ДКИН.

Динамический компенсатор искажения напряжения динамично и эффективно управляет провалами напряжения, перенапряжениями и другими влияющими на электрическую нагрузку нарушениями, которые могут быть причиной нарушения режима работы электрооборудования.

Динамический компенсатор искажения напряжения исправляет несимметрию напряжения со стороны нагрузки трансформатора и может защищать оборудование от 5, 7, 11 и 13-й гармоник.

Динамический компенсатор искажения напряжения использует микропроцессорный контроллер для инвертора, а также исправляет эффект фликера, всплески напряжения и перенапряжения. Этот надежный прибор имеет статический и ручной обходной выключатель в стандартной модификации.

3.5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ПОСТАВКЕ ДКИН 10 КВ

Динамический компенсатор искажений напряжения служит для электроснабжения комплексной нагрузки, чувствительной к провалам и перенапряжениям в электроэнергетической системе, получающей питание от секции распределительного устройства или ПС.

Динамический компенсатор искажений напряжения обеспечивает компенсацию искажений электроснабжения при условии, что электроснабжение нагрузки не будет полностью прервано. С использованием чрезвычайно быстрых переключений полупроводниковым преобразователем напряжения ДКИН реагирует за время меньше чем 1 мс, и таким образом эффективно защищает чувствительную нагрузку от провалов напряжения или перенапряжений. Система работает в режиме реального времени.

Предлагаемый проект поставки ДКИН имеет существенные преимущества: нет вращающихся частей, высокая надежность и низкие эксплуатационные затраты в совокупности с продолжительным (25 лет) сроком эксплуатации.

В течение большинства времени ДКИН находится в резервном режиме и только контролирует входное напряжение. Поэтому по-

тери минимизированы и достигнута очень высокая эффективность.

Динамический компенсатор искажений напряжения не нуждается в обслуживании, поскольку не имеет механических частей. Отключения электроэнергии для осмотра могут быть намечены согласно потребностям клиента. В маловероятном случае сбоя системы ремонт может быть выполнен на месте за максимальное время 2 ч.

Все оборудование, кроме ВДТ, гармонического фильтра и устройства охлаждения, устанавливается в двух контейнерах наружной установки. В одном контейнере находится все устройство ДКИН и оборудование управления, в отдельном контейнере — конденсаторная батарея. Вольтодобавочный трансформатор, гармонический фильтр и охлаждающееся устройство установлены на открытом воздухе справа от контейнеров. Преимущество контейнерного исполнения заключается в том, что ДКИН можно легко перемещать.

Предложение поставки содержит данные проекта поставки, строительства и испытания системы ДКИН со следующим основным оборудованием:

- вольтодобавочным трансформатором;
- гармоническим фильтром высокой пропускной способности;
- конденсаторной батарей;
- зарядным устройством постоянного тока;
- преобразователем источника напряжения;
- обходной шиной;
- охлаждающей системой;
- системой управления;
- наружным контейнером для преобразователя (опция дополнительного заказа);
- наружным контейнером конденсатора (опция дополнительного заказа).

Все оборудование ДКИН спроектировано, построено и проверено в соответствии с последними требованиями к таким устройствам. Трансформатор, IGCT-преобразователь источника напряжения и устройство накопления энергии оценены для чувствительной к искажениям напряжения электрической нагрузки.

При проектировании, строительстве и испытательных процедурах ДКИН используются международные стандарты:

- IEC 146-1/DIN/ 60146. Общие требования для выравнивающих преобразователей;
- IEC 76. Силовые трансформаторы;
- DIN/EN 60204. Безопасность машин. Электрическое оборудование машин и механизмов. Ч. 1. Общие требования;
- IEC 529/DIN 40 050. Защиты для электрического оборудования;
- EN 60721 /IEC 721. Классификация групп параметров окружающей среды и их серьезности;
- EN 292. Безопасность машин: основные концепции, общие принципы для проекта;
- IEEE 519. Гармоники;
- IEC 68-1. Конденсаторы;
- IEC 439. Низковольтные переключающие устройства и аппаратура управления;
- IEC 694. Общие условия для переключающих устройств высокого напряжения и аппаратура управления;
- DIN/VDE 0110. Изоляции для оборудования низковольтных систем. Фундаментальные требования;
- DIN 31000/VDE 1000. Общее руководство для проектирования технического оборудования в целях удовлетворения требований безопасности;
- DIN /VDE 40008. Инжиниринг, признаки безопасности и общие условия.

Разработчиком предоставляются следующие сертификаты качества:

- сертификат качества системы ISO 9000/EN 29000;
- свидетельства гарантии качества ISO 9001;
- свидетельства управления качеством DIN EN ISO 9001.

Технические требования заказчика к устройству ДКИН:

- высота над уровнем моря до 1000 м;
- место установки — внутренний;
- площадь, требуемая для установки оборудования, — приблизительно 10 × 20 м (площадь установки ДКИН может быть уменьшена, если является критическим фактором);
- наружная температура воздуха: максимальная +35 °С, минимальная –35 °С;

- сейсмоустойчивость — не более 0,3*g*.

Главные технические данные:

- номинальное напряжение — 10 кВ;
- колебание напряжения поставки — ±10 %;
- максимальная мощность КЗ в точке подключения ДКИН — 273,2 МВ · А;
- частота — 50 Гц;
- колебания частоты — ±3 %.

Собственные нужды для устройства ДКИН включают трехфазную сеть напряжением 380 В и частотой 50 Гц.

Проектные требования к ДКИН включают:

- значение трехфазных провалов напряжения — 35 %;
- продолжительность трехфазных провалов напряжения — 200 мс;
- значение однофазных провалов напряжения — 50 %;
- продолжительность однофазных провалов напряжения — 200 мс;
- номинальную мощность защищаемой нагрузки — 7,0 МВ · А;
- максимальное падение напряжения в устройстве ДКИН при номинальной нагрузке приблизительно 2,5 %;
- время реагирования — не более 1 мс;
- точность регулирования напряжения — не более ±5 %;
- обычное время перезарядки накопителя энергии — 3 мин.

Номинальная мощность защищаемой нагрузки (см. приложение) определена согласно данным проекта № 1750.88Э3 ГПИ «Электропроект» (Москва) «Расчет токов КЗ в режиме питания токопровода от ГПП-3» и выполненных службой РЗА предприятия расчетов по фактическим данным измененной нагрузки и схемы электроснабжения ООО «Тобольск-Нефтехим» (табл. 3.4).

Преобразователь источника напряжения имеет водяное охлаждение. Для охлаждения циркулирующий воды используется оборудование на основе водно-испарительного устройства; для охлаждения трансформатора масляная или воздушная система охлаждения (ONAN или ONAF), которая определяется во время разработки проекта.

Основные граничные условия согласно спецификации ДКИН:

- все три фазы всегда проводят ток, даже в течение искажений напряжений со стороны «ввода» в ДКИН;
- сопротивление нулевой последовательности от ДКИН к нагрузке принято бесконечным.

В то время как первое условие обязательно, второе может быть устранено при использовании специального проекта вводного трансформатора и системы управления.

Одна из ключевых особенностей устройства состоит в том, что ДКИН непосредственно связан со вторичной обмоткой вольтодобавочного трансформатора.

Система управления непрерывно контролирует входное напряжение и сравнивает его с заданным пороговым уровнем напряжения. Если напряжение поставки меньше заданного значения, преобразователь источника напряжения ДКИН немедленно начинает вводить дифференциальное напряжение и поддерживать номинальное напряжение на стороне нагрузки $U_{ном}$. Энергия, требуемая для достижения этой задачи, будет получена в том числе и с помощью конденсаторной батареи.

Постоянное напряжение непрерывно контролируется, и конденсаторы снабжаются, если требуется, энергией от зарядного устройства.

Входное напряжение поставки U_c непрерывно контролируется, и в короткое время возможно устранение искажений входного напряжения (поступающего от энергосистемы) незамедлительным воздействием на преобразователь напряжения ДКИН. Время реакции на провал напряжения составляет 1 – 2 мс.

Преобразователь источника напряжения использует высокую частоту переключения (типа PWM), следовательно, он способен

Таблица 3.4. **Данные токов трехфазного короткого замыкания для ЦРП**

Центральный распределительный пункт (ЦРП)	Подвод питания	$I^{(3)}_{к\,max}$, кА	$I^{(3)}_{к\,min}$, кА
ЦРП-1, I и II секции	От ГРУ ТЭЦ	15,79	8,45
ЦРП-1, I и II секции	От ГПП-3	11,36*	9,45*
ЦРП-2, I и II секции	От ГРУ ТЭЦ	16,55	8,66
ЦРП-2, I и II секции	От ГПП-3	14,05	11,24
ЦРП-4, I и II секции	От ГРУ ТЭЦ	14,06	7,92
ЦРП-4, III и IV секции	От ГПП-3	16,55	12,78
ПС «Сырьевая»	От ВЛ	10,86	5,07

* Вторичные значения.

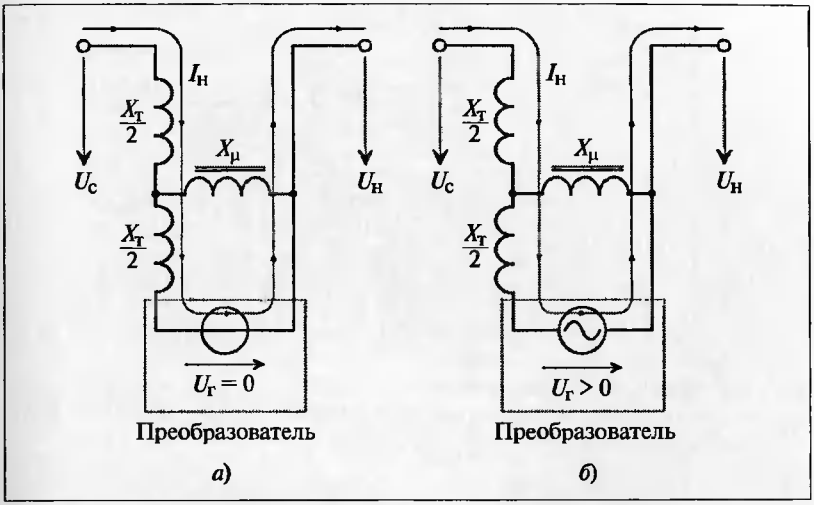


Рис. 3.19. **Схема замещения вольтодобавочного трансформатора в нормальном режиме (*а*) и режиме повышения напряжения на нагрузке (*б*):**
$U_н$ — напряжение на стороне нагрузки; $X_μ$ — сопротивление взаимоиндукции между обмотками трансформатора

выдавать быстрые воздействия для ответов на искажения напряжений.

В нормальном режиме работы ДКИН функционирует в режиме малых потерь — режиме КЗ. Как показано на рис. 3.19, вольтодобавочный трансформатор в резервном режиме работает идентично трансформатору тока (ТТ) в режиме КЗ.

В нормальном режиме вольтодобавочный трансформатор работает как вторично закороченный ТТ, что означает, что угол $\delta U_в$ между напряжением $U_с$ и магнитным потоком B практически равен 0.

Следует заметить, что преобразователь не выключается в режиме КЗ. Благодаря передовой технологии запираемых тиристоров с интегрированным блоком управления IGCT потери на электропроводимость полупроводников и диэлектрика незначительны. Эти потери будут учитываться в резервном режиме работы ДКИН.

RC-цепочка, работающая как фильтр переменного тока, включена параллельно индуктивности трансформатора и соединяется через вольтодобавочный трансформатор. Это фильтрирующее устройство обеспечивает обход для гармонических потоков, гене-

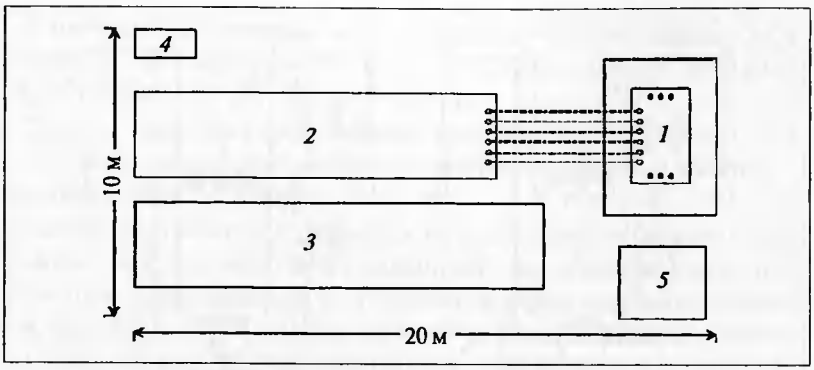


Рис. 3.20. **Вариант расположения системы ДКИН:**
1 — вольтодобавочный трансформатор; *2* — устройство ДКИН; *3* — конденсаторная батарея; *4* — обходная система шин; *5* — гармонический фильтр

рируемых при включении преобразователя источника напряжения ДКИН в режиме повышения напряжения, что позволяет при работе преобразователя источника напряжения ДКИН под нагрузкой предотвратить нежелательные искажения напряжения. Во время режима КЗ этот фильтр не действует, начиная с момента, когда преобразователь перестает генерировать гармоники.

На рис. 3.20 приведена одна из возможных компоновок расположения оборудования ДКИН напряжением 10 кВ. Площадь размещения ДКИН может быть уменьшена при ограничении места установки.

На рис. 3.21 и 3.22 показан внешний вид устройства и преобразователя ДКИН. Для обслуживания и поддержания изоляции ДКИН в случае внутреннего КЗ применяется обходной выключатель и разъединители для обоих выводов трансформатора. Для обеспечения динамической устойчивости используются быстро реагирующие тиристоры, чтобы защитить преобразователь источника напряжения в случае КЗ со стороны нагрузки.

Для ДКИН производитель использует современные полупроводники типа GTO или IGCT-тиристоры. Эти элементы представляют современные мощные полупроводники, которые объединяют преимущества обычного GTO и IGBT-транзистора, имеют низкие потери и управляемый переход, соответственно.

В табл. 3.5 показаны преимущества двух вышеупомянутых технологий IGCT для ДКИН, которые заключаются в следующем:

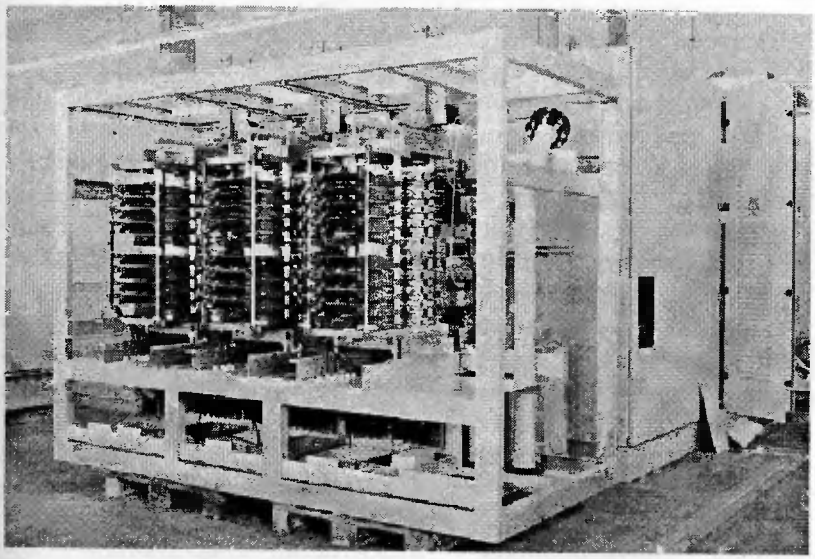


Рис. 3.21. **Внешний вид системы ДКИН**

- возможности применения для среднего напряжения;
- низких потерях и электропроводимости;
- высокой частоте переключений;
- низких потерь при переключениях;
- не требует демпфирования.

Для ДКИН невозможен отказ элементов, так как монолитная структура IGCT-тиристоров обеспечивает такое поведение при перегрузках, как и тиристоры GTO. Т. е. при сверхтоках силиконовый диск обеспечивает достаточно надежный канал проводимости и, следовательно, пропускает ток

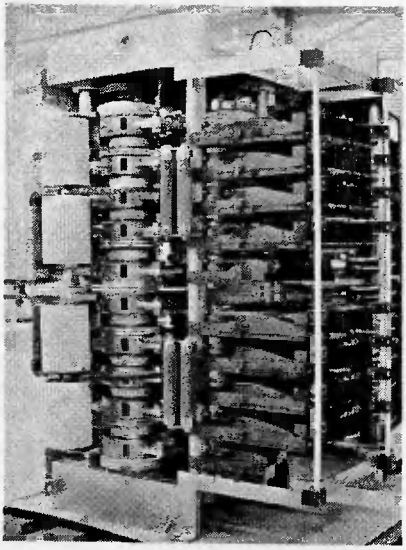


Рис. 3.22. **Внешний вид преобразователя напряжений ДКИН**

без любого разъединения или сопутствующего разрушения. Этот тонкий диск был протестирован при подаче пикового тока 68 кА несколько раз, выдерживая тепловую нагрузку мощностью 100 МА^2. За время испытаний были трещины на фарфоровом корпусе, но механическая прочность элемента осталась неповрежденной.

Поставщики ДКИН имеют много успешно работающих в течение нескольких лет устройств на базе IGCT-систем и не наблюдали никаких отказов устройств, хотя эти системы работают на предельной нагрузке почти все время.

Преобразователь ДКИН охлаждается водой, не требует обслуживания, что оптимизирует стоимость устройства.

Таблица 3.5. **Особенности различных типов полупроводниковых решений**

Параметр	GTO-тиристор	IGBT-транзистор	IGCT-тиристор
Показатель переключений	Низкочастотное переключение Применимость к сетям напряжением 6 – 10 – 35 кВ Низкие потери	Высокая частота переключений Низкие потери при переключениях Не требует ограничений Встроенный драйвер для шлюзов	Высокая частота переключений Низкие потери при переключениях и в проводниках Применимость к сетям напряжением 6 – 10 – 35 кВ Не требует демпфирования Встроенный диод и драйвер для шлюза
Конструкция преобразователя	Не чувствителен к кратковременным сбоям в питающем напряжением	Всего несколько элементов на низкое напряжение Последовательно/параллельные соединения только на низком напряжении	Не чувствителен к кратковременным сбоям в питающем напряжении Подходит для последовательно/параллельных соединений на высоком напряжении
Конструктивные свойства элементов	Высокая и проверенная надежность Компактность	Модульное исполнение	Компактное и модульное исполнение Минимальное количество деталей, выполненных на номинальном напряжении

Интерфейс управления ДКИН организован через оптоволоконный кабель, устраняя любое влияние электромагнитных помех. Компактность выполнения устройства позволяет выполнить замену вышедших из строя компонентов в пределах 2 ч.

Динамический компенсатор искажений напряжения использует цифровой быстродействующий программируемый контроллер AC PEC 800. Объектно-ориентируемый язык программирования для диспетчера Simulink легок в использовании для адаптации алгоритмов управления даже во время ввода в эксплуатацию персоналом на рабочем месте.

Программирование основано на отборе желательных функций от встроенной библиотеки модулей и сборки их к заключительной структуре управления. Интерфейс пользователя через монитор компьютера и принтера обеспечивает легкое представление сигналов управления. Программное обеспечение позволяет быстро получать всю входную и выходную информацию, требуемую согласно условиям работы.

Все защитные функции для ДКИН осуществлены в программном обеспечении контроллера типа AC PEC 800. Дифференциальная токовая защита трансформатора или ток короткого замыкания на стороне нагрузки потребителя не являются единственными функциональными защитами, построенными в зависимости от специфических условий аварий.

Система управления и защиты может переключать ДКИН в обход, если это устройство стало недействующим, гарантируя, таким образом, непрерывную подачу энергии потребителю.

Компьютер служит как регистратор событий: регистрирует и показывает различные режимы работы во время действия ДКИН. Система управления ДКИН позволяет:

- преобразовывать электрический сигнал в оптический;
- поддерживать выбор заданного времени ограничений, требуемого устройством ДКИН;
- управлять режимом КЗ;
- наблюдать и фиксировать параметры работы устройства ДКИН.

Динамический компенсатор искажений напряжения оборудован системой контроля провалов напряжения. Устройство хранит соответствующие данные входных/выходных напряжений, токов

Рис. 3.23. **Характеристики работы ДКИН при одно-, двух- и трехфазных провалах напряжения различной длительности**

и параметров цепи постоянного напряжения на диске, который можно просмотреть для дальнейшего анализа.

К монитору компьютера можно обращаться через интернет. Система может быть приведена в готовность с помощью электронной почты или SMS в случае любых сбоев.

Эффективность ДКИН в работе составляет более 98 %.

Гармоническое искажение от преобразователя источника напряжений до питающей нагрузки меньше, чем по требованиям стандарта IEEE 519. Гармонических воздействий практически не наблюдается, и они не рассматриваются.

Система предназначена для трехфазных провалов напряжения в энергосистеме значением до 35 % и длительностью 200 мс. В случае более глубокого падения напряжения или с большей длительностью система продолжает устранять искажения напряжения в максимально возможной степени согласно характеристике устройства (рис. 3.23). Для падений напряжений вне заданной спецификации ДКИН поддерживает напряжение на нагрузке на уровне напряжения, меньшем номинального (100 %) [2].

В поставку ДКИН включены:

- один вольтодобавочный трансформатор (приблизительно 10 МВ · А);

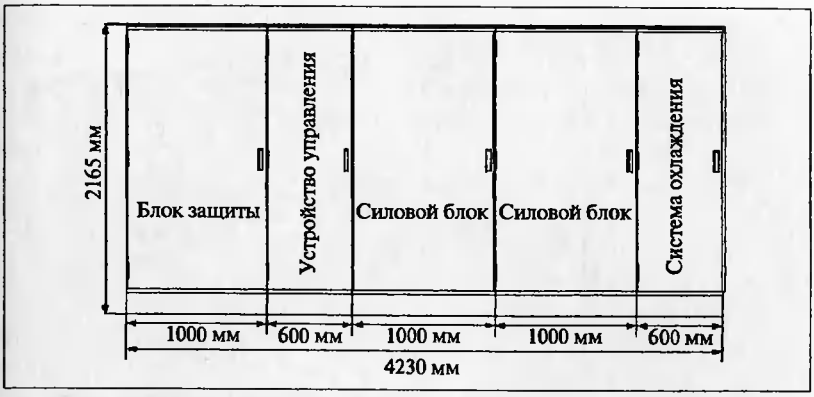


Рис. 3.24. **Габаритные размеры отдельных составляющих устройства ДКИН мощностью 2,5 МВ · А напряжением 10 кВ**

- один гармонический фильтр с высокой пропускной способностью;
- одна конденсаторная батарея постоянного тока с цепью разрядки;
- одно устройство зарядки постоянного тока;
- один преобразователь источника напряжения;
- три выключателя на напряжение 10 кВ;
- одна охлаждающаяся система для преобразователя;
- один пульт управления;
- одно устройство, контролирующее падение напряжения;
- один набор кабельных соединений;
- один наружный контейнер для оборудования ДКИН;
- один наружный контейнер для конденсаторной батареи;
- один набор документации (с тремя идентичными копиями);
- аппаратные средства ЭВМ и программное обеспечение;
- стандартный протокол приемки и испытаний ДКИН.

На рис. 3.24 приведены габаритные размеры, а на рис. 3.25 показан внешний вид ДКИН мощностью 2,5 МВ · А напряжением 10 кВ.

Итак, динамический компенсатор искажений напряжения обеспечивает:

- полное восстановление трехфазных провалов напряжений указанных уровней для специфической модели до номинального уровня;

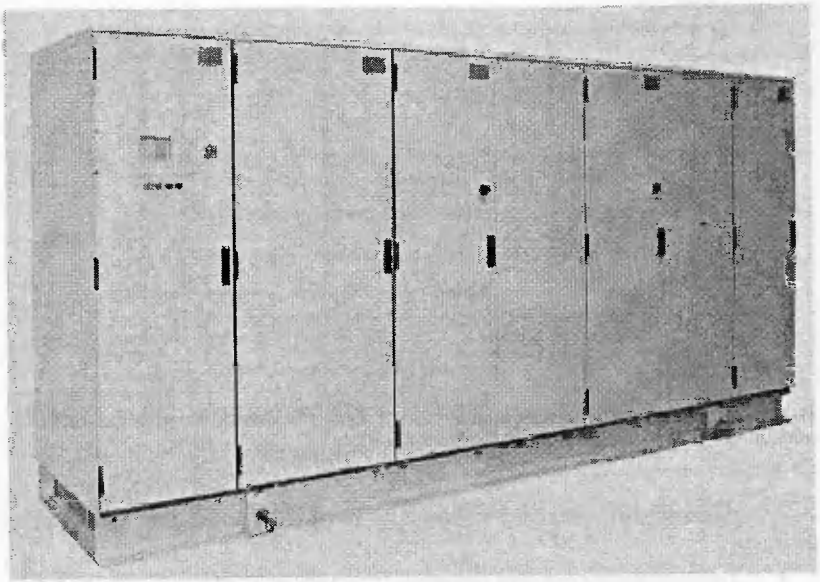


Рис. 3.25. **Внешний вид ДКИН мощностью 2,5 МВ · А напряжением 10 кВ**

- максимальный уровень полного исправления трехфазных КНЭ определен для каждой модели. Например, ДКИН 30 % обеспечит исправление трехфазных КНЭ с остаточным напряжением до 70 % длительностью до 30 с;
- частичное исправление для КНЭ с остаточным напряжением 50 % по крайней мере в течение 30 с (все модели). Способность исправления однофазных на землю КЗ в 1,5 раза по времени выше, чем для трехфазных. Например, ДКИН обеспечит полное исправление однофазных КЗ с остаточным напряжением до 55 % длительностью до 30 с. Все модели ДКИН обеспечивают непрерывное регулирование напряжения для трехфазных КНЭ к уровню 90 % и однофазных — к уровню 85 % номинального напряжения на нагрузке;
- непрерывное регулирование напряжения к номинальному при трехфазных перенапряжениях до 110 % номинального напряжения поставки (расширенная модель ДКИН);
- исправление симметричных трехфазных падений напряжения вплоть до 50 % и однофазных провалов до 70 %, до уровня, определенного спецификой модели, не менее 30 с. В табл. 3.2 по-

казаны возможности исправления КНЭ к уровню 90, 95 и 100 % напряжения на нагрузке;

- непрерывное регулирование трехфазных перенапряжений и скачков вплоть до 110 % номинального (расширенное регулирование модели ДКИН);
- исправление несимметрии напряжения со стороны сети;
- ослабление дозы фликера в напряжении;
- автоматическую компенсацию линейных падений напряжения.

Оценивая преимущества ДКИН, отметим следующее:

- при провалах напряжения в системе электроснабжения ДКИН более чем в 90 % случаев обеспечивает нормальное напряжение на нагрузке в течение всего провала напряжения;
- при глубоких провалах напряжения (вплоть до 100 %) ДКИН за счет аккумулирующих конденсаторов C_d поддерживает нормальное напряжение на нагрузке не менее 0,2 с (можно увеличить это время до нескольких секунд) с последующим плавным снижением напряжения; такой длительности в большинстве случаев достаточно для отключения КЗ и исчезновения провала напряжения;
- в нормальном режиме, когда ЭДС ВДТ равна нулю, ДКИН практически не потребляет электрическую энергию из СЭС; за счет этого общие затраты за 5 лет эксплуатации оказались в 3,8 раза меньше, чем затраты на источник бесперебойного питания на базе аккумуляторных батарей.

3.6. СРОК ОКУПАЕМОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ДКИН

Внедрение ДКИН позволяет устранить (уменьшить):

- брак продукции;
- повреждение оборудования;
- снижение производительности;
- срыв поставок;
- потерю клиентов;
- травмы персонала;
- загрязнение окружающей среды.

Для предприятий ненамеченное время простоя — ведущая причина потери эффективности и производительности, а провалы напряжения — главный вкладчик. Так, для главного автомобильного производства 2%-ное увеличение производительности всех

Рис. 3.26. **Потери от провалов напряжения для производств**

заводов устранило бы потребность в двух новых заводах (сбережения в размере 4 млрд дол.).

Составляющие ущерба от КНЭ определим как:

$$У_{кнэ} = У_1 + У_2 + У_3 + У_4 + У_5 + У_6,$$

где $У_1$ — потери производства (недовыпуск продукции); $У_2$ — отходы производства; $У_3$ — затраты на возобновление производства; $У_4$ — трудовые затраты производства; $У_5$ — поврежденное оборудование и ремонт; $У_6$ — другие затраты.

Экономический эффект от внедрения ДКИН на Западе определяют путем оценки ущерба, пропорционального недоотпуску (браку) продукции в размере 3 – 5 дол./кВт (для нефтехимической промышленности) установленной мощности (рис. 3.26 и табл. 3.6) [2].

При внедрении нового оборудования в системе электроснабжения предприятия приведенные затраты в течение года определяют по формуле (Б. И. Кудрин. Электроснабжение промышленных предприятий. М., 2005)

$$З = Е_н K + И + У, \qquad (3.1)$$

где $Е_н$ — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (принимаем $Е_н = 0{,}20$); K — капиталовложения в оборудование; $И$ — издержки при эксплуатации оборудования; $У$ — производ-

Таблица 3.6. **Затраты от нарушения качества электроснабжения (КЭЭ) в дол./кВт установленной мощности согласно EPRI**

Отрасль или производство	Затраты от нарушений КЭЭ, дол./кВт (официальные данные EPRI)	
	минимальные	максимальные
Автомобильное производство	5,0	7,5
Производство каучука и пластмасс	3,0	4,5
Текстильная промышленность	2,0	4,0
Бумажная промышленность	1,5	2,5
Издательское производство	1,0	2,0
Нефтехимическая промышленность	3,0	5,0
Металлургическая промышленность	2,0	4,0
Стекольная промышленность	4,0	6,0
Горнодобывающая промышленность	2,0	4,0
Производство пищевых продуктов	3,0	5,0
Фармацевтическая промышленность	5,0	50,0
Электронная промышленность	8,0	12,0
Производство полупроводников	20,0	60,0
Коммуникации и информатика	1,0	10,0
Больницы, банки, гражданские учреждения	2,0	3,0

ственный ущерб при функциональном отказе оборудования (характеризуется вероятностью отказа оборудования).

При сравнении двух вариантов технических решений оптимальным вариантом внедрения нового оборудования считается тот, у которого приведенные затраты, определяемые по (3.1), минимальны. Таким образом, приведенные затраты старого оборудования (существующей схемы АВР) определяются по формуле

$$З_1 = E_н K_1 + И_1 + У_1, \qquad (3.2)$$

а приведенные затраты при внедрении нового оборудования (при внедрении ДКИН) определяются как

$$З_2 = E_н K_2 + И_2 + У_2. \qquad (3.3)$$

Потери от недовыпуска продукции на ОАО «Карельский Окатыш» за 2004 г. (принимаем как ожидаемый экономический эффект от выполнения работ по ДКИН) определяются как

$$C_{\text{ож эф}} = У_{2004} = У_{\text{пр}} + У_{\text{кос}},$$

где $У_{\text{пр}}$ — прямые потери от недовыпуска продукции в связи с нарушениями электроснабжения в 2005 г.; $У_{\text{кос}}$ — косвенные потери на продувку, промывку, удаление остатков, пусковые режимы.

Прямые потери от недовыпуска продукции в связи с нарушениями электроснабжения в 2005 г. взяты из данных ОАО «Карельский Окатыш» и приведены ниже.

Расчет экономического ущерба ДОФ дан для случая отключения воздушной линии электропередачи № 220 за 20.06.05. В результате отключения линии электропередачи № 220 20.06.05 произошло отключение оборудования ДОФ. Время простоя секции составило 47,5 ч.

Потери производства концентрата составили:

$$47{,}5 \cdot 95{,}1 = 4517 \text{ т},$$

где 95,1 — производительность 1-й секции по выпуску концентрата 20.06.05, т/ч;

$$4517 \cdot 649{,}3 = 2\,932\,888 \text{ руб.}$$

где 649,3 — полная стоимость 1 т концентрата, руб.

В результате неоднократного отключения линии электропередачи № 220 сгорели шесть тиристоров.

Ущерб составил 6 · 1500 = 9000 руб.

Итого: 2 932 888 + 9000 = 2 941 888 руб.

Косвенные потери (продувка, промывка, удаление остатков, пусковые режимы) составляют 3 % потерь от недовыпуска продукции, связанных с нарушениями электроснабжения в 2005 г. ОАО «Карельский Окатыш», что составляет

$$У_{\text{кос}} = 0{,}03 У_{\text{пр}} = 0{,}03 \cdot 2\,941\,888 = 88\,256 \text{ руб.}$$

Итого, суммарные потери от недовыпуска продукции на «Карельский Окатыш» или ожидаемый экономический эффект при внедрении ДКИН на предприятии составляют

$$C_{\text{ож эф}} = У_{2005} = (У_{\text{пр}} + У_{\text{кос}})N =$$
$$= (2\,941\,888 + 88\,256)N = 30\,301\,530 \text{ руб.},$$

где N — число нарушений электроснабжения за 2005 г.

Суммарные затраты на повышение надежности системы электроснабжения путем внедрения ДКИН на РП-53 составляют

$$K_{2\,\text{ДКИН}} = K_{2\,\text{РП-53}} + K_{3\,\text{РП-56}} = 42\,828\,500 \text{ руб.}$$

Таким образом, сравнительный годовой экономический эффект от внедрения нового оборудования, разработанного в рамках НИОКР для ОАО «Карельский Окатыш», по сравнению с существующей ситуацией без внедрения ДКИН определяется как:

$$Э_{\text{г}} = З_1 - З_2 = E_{\text{н}}(K_1 - K_2) + (И_1 - И_2) + (У_1 - У_2), \qquad (3.4)$$

и равен

$$Э_{\text{г}} = З_1 - З_2 = 0{,}2(0 - 42\,828\,500) + (88\,256 - 0) +$$
$$+ (30\,301\,530 - 0) = 21\,824\,086 \text{ руб.}$$

Окупаемость затрат при внедрении устройств ДКИН на РП-53 ОАО «Карельский Окатыш» составит:

$$T_{\text{ок ДКИН}} = \frac{C_{\text{ДКИН}}}{Э_{\text{г}}} = \frac{42\,828\,500}{21\,824\,056} = 1{,}96 \text{ года.}$$

Экономическую эффективность предлагаемых технических решений на Западе определяют путем оценки ущерба, пропорционального недоотпуску (браку) продукции в размере 8 – 16 евро/(кВт · ч) (Börninck S., Schwab A. J. Ausfallkosten für Industrieunternehmen durch Stromversorgungsunterbrechungen. Institut für Electroenergiesysteme // Univ. Karlsruhe. 2002. 101. № 12. S. 36 – 39) или стоимости затрат на нарушение электроснабжения по установленной активной мощности электрооборудования (см. табл. 3.6). Тогда, экономический эффект за счет снижения ущер-

бов от кратковременных нарушений электроснабжения при внедрении ДКИН на ОАО «Карельский Окатыш» составит:

$$Э_{EPRI\ год} = (2 - 4)\ дол./кВт \cdot 139\ 100\ кВт \cdot 10 =$$
$$= (278\ 200 \div 556\ 400) \cdot 10 = (77\ 896\ 000 \div 155\ 792\ 000)\ руб.$$

Срок окупаемости решений по повышению надежности системы электроснабжения ОАО «Карельский Окатыш» по первой оценке экономического эффекта составляет почти 2 года, а по оценке эффективности предлагаемых технических решений по западной методике — от 6,6 до 3,3 мес.

Заключение и основные выводы

1. Существующий подход к решению проблем качества электрической энергии сосредоточен на старой системе взглядов по защите предприятий от двух-трех отключений электроэнергии в год, а не 20 – 30, что имеет место в настоящее время.

2. На надежности электроснабжения промышленных предприятий и чувствительных к искажениям питающего напряжения электропотребителей сказывается реформирование электроэнергетической отрасли, отсутствие экономических и технических механизмов повышения качества электрической энергии.

3. Анализ нарушений электроснабжения, произошедших на многих предприятиях и приведших к остановам основных производств, показал, что основными причинами нарушений являются кратковременные посадки и провалы напряжения в энергосистемах (т. е. имеет место резкое снижение показателей надежности энергосистем и сетевых предприятий). Причем ситуация не изменится в лучшую сторону в ближайшие 5 лет, а поэтому предприятиям надо самим решать проблемы.

Имеют место остановы производства и ущерб, связанный с низким качеством электроэнергии, отключением высоковольтных и низковольтных потребителей (синхронных и асинхронных двигателей, преобразователей частоты, контакторов, пускателей и т. п.).

4. По данным экспериментальных исследований провалов напряжения на шинах РП-53 ОАО «Карельский Окатыш» выявлено, что:

- 4 раза наблюдались провалы глубиной свыше 10 – 15 % и длительностью от 0,17 до 0,86 с;
- 3 раза наблюдались провалы напряжения глубиной свыше 16 % и длительностью 1 – 2 мс;
- 5 раз наблюдались провалы глубиной свыше 5,4 – 10 % и длительностью от 0,21 до 0,86 с;
- 4 раза наблюдались провалы напряжения глубиной 4,6 – 5,0 % и длительностью от 0,10 до 0,81 с;
- 2 раза наблюдались провалы напряжения глубиной 100 %.

Потери производства дробильно-обогатительной фабрики при отключении ВЛ № 220 20.06.05 составили 4517 т. Суммарные потери от недовыпуска продукции на «Карельский Окатыш» или ожидаемый экономический эффект при внедрении ДКИН на предприятии за 2005 г. составит около 30 млн. руб.

5. Для обеспечения непрерывности технологического процесса, снижения ущербов от брака продукции предлагается внедрить динамические компенсаторы искажений напряжения, питающие потребители основных производств. Это обеспечит непрерывную работу основных механизмов в режимах кратковременных нарушений электроснабжения, даст снижения потерь и потребления электрической энергии, улучшение режимов работы СД и АД.

6. Назначение динамических компенсаторов искажений напряжения заключается в следующем:

- обеспечении надежного и непрерывного электроснабжения потребителей за счет IGBT, IGCT-преобразователя напряжения и вольтодобавочных трансформаторов в случае провалов и посадок напряжений в электрических сетях длительностью до 3 с;
- фильтрации гармонических составляющих в питающем напряжении;
- устранении несимметрии по фазам питающего напряжения в нормальных и аварийных режимах.

7. Областью применения ДКИН являются как распределительные устройства напряжением 0,4 – 6 – 10 – 35 кВ, имеющие двигательную и технологическую нагрузку, так и отдельные приемники электрической энергии, системы управления, высокочувствительные к кратковременным нарушениям электроснабжения.

8. Динамические компенсаторы искажений напряжения выпускаются на входное напряжение 380, 480, 690, 6000, 10 000, 13 800, 35 000, 38 500, 110 000, 138 000 В или нестандартное напряжение. Выпускаемые ДКИН напряжением 380 В по мощности охватывают все существующие трансформаторные подстанции (от 25 до 6000 кВ · А); а напряжением 6(10) кВ — существующие в России распределительные устройства с учетом фактического коэффициента их загрузки (от 1000 до 50 000 кВ · А).

9. По уровню компенсации входного напряжения различают:

- ДКИН-20, 30, 40 % с компенсацией трехфазных провалов напряжения (соответственно $U_{ост} = 0{,}8$; 0,7 и 0,6 отн. ед.) к $0{,}9U_{ном}$ и с компенсацией однофазных провалов напряжения ($U_{ост} = 0{,}35$ отн. ед.) к $0{,}9U_{ном}$;
- ДКИН-20, 30, 40 % с компенсацией трехфазных провалов напряжения (соответственно $U_{ост} = 0{,}8$; 0,7 и 0,6 отн. ед.) к $U_{ном}$;
- ДКИН-20, 30, 40 % с компенсацией трехфазных провалов напряжения (соответственно $U_{ост} = 0{,}8$; 0,7 и 0,6 отн. ед.) к $U_{ном}$ и удержанием всей нагрузки на номинальном напряжении в течение 200 мс при $U_{ост} = 0$;
- ДКИН-20, 30, 40 % с компенсацией трехфазных провалов напряжения (соответственно $U_{ост} = 0{,}8$; 0,7 и 0,6 отн. ед.) к $U_{ном}$ и удержанием всей нагрузки на номинальном напряжении в течение 1000 – 3000 мс;
- ДКИН-20, 30, 40 % с компенсацией трехфазных провалов напряжения (соответственно $U_{ост} = 0{,}8$; 0,7 и 0,6 отн. ед.) к $U_{ном}$, непрерывная корректировка напряжения до уровня ±10 %, т. е. устранение как провалов, так и перенапряжений на вводе защищаемой нагрузки.

Устройства ДКИН-20(30) % означают, что при трехфазных провалах напряжений на вводе с остаточным напряжением $U_{ост} = 0{,}7(0{,}6)$ отн. ед. — на защищаемой нагрузке будет $0{,}9U_{ном}$, при однофазных провалах напряжений и остаточном напряжении $U_{ост} = 0{,}35U_{ном} - 0{,}9U_{ном}$.

Вторая модификация устройств ДКИН-20(30) %, означает, что когда при трехфазных провалах напряжений остаточное напряжение $U_{ост} = 0{,}8(0{,}7)$ отн. ед., на нагрузке будет $U_{ном}$.

Третья разновидность устройств ДКИН-20(30) % обеспечивает на нагрузке $U_{ном}$ при трехфазных провалах напряжений на вводе и остаточном напряжении $U_{ост} = 0{,}8(0{,}7)$ отн. ед., удержание нагрузки на номинальном напряжении в течение 200 мс при $U_{ост} = 0$ (для случая трехфазных КЗ).

Четвертая разновидность устройств ДКИН-20(30) % с компенсацией трехфазных провалов напряжения от уровня $U_{ост} = 0{,}8(0{,}7)$ отн. ед. к уровню $U_{ном}$, кроме того, обеспечивает непрерывную корректировку напряжения ±10 %, т. е. устраняет и провалы, и перенапряжения на вводе защищаемой нагрузки.

Следует отметить, что ДКИН-30 % будет защищать и при более глубокой посадке напряжений, вызванных различными видами КЗ, согласно приведенным ниже характеристикам.

10. Свыше 250 устройств ДКИН с 2000 г. поставлены компаниям Ford, GM, Lucent, Square D, Fort James, FSI, OTI, International Rectifier, KLA Tencor, Applied Materials, M*M Mars, Nestle, Engines Inc, LTV Copperweld, Eaton и др.

11. По оценкам западных экспертов, стоимость и обслуживание ДКИН (даже не говоря об их значительных технических преимуществах) в 3,8 раза ниже стоимости ИБП, что значительно сокращает срок их окупаемости.

ПРИЛОЖЕНИЕ
ОПРОСНЫЙ ЛИСТ ПОСТАВКИ ДКИН НАПРЯЖЕНИЕМ 10 КВ

Организация:		Место нахождения:	
Тел. /Факс		E-mail:	

	1. Питающая сеть	
1.1	Высокое напряжение, кВ	
1.2	Среднее напряжение, кВ	
1.3	Частота сети, Гц	
1.4	Напряжение в точке подключения ДКИН, кВ	
1.5	Данные трансформатора (мощность, ток короткого замыкания, МВ · А)	
1.6	Колебания напряжения, максимальные/минимальные (+, –), %	
1.7	Максимальная мощность короткого замыкания в точке подключения ДКИН, МВ · А	
1.8	Минимальная мощность короткого замыкания (требуется для расчета обратного воздействия на сеть), МВ · А	
1.9	Колебания частоты максимум/минимум, %	
1.10	Допустимое падение напряжения при пуске, %	
1.11	Представить однолинейную схему электрических соединений	
1.12	Какие другие потребители уже подключены к распредустройству, какая их суммарная потребляемая мощность?	

	2. Требуемая компенсация падения напряжения на стороне нагрузки				
2.1	Трехфазные провалы напряжения, %	20	V	30	V
2.2	Трехфазные провалы напряжения, другие требования	Нет			
2.3	Однофазные провалы напряжения, %	50		V	
2.4	Однофазные провалы напряжения, другие требования	Нет			
2.5	Продолжительность трехфазных провалов напряжения, мс	200			

2.6	Продолжительность трехфазных провалов напряжения, другие требования	Нет	
2.7	Продолжительность однофазных провалов напряжения, мс	200	
2.8	Продолжительность однофазных провалов напряжения, другие требования	Нет	
2.9	Допустимая длительность провала напряжения, мс	200	
2.10	Номинальная мощность защищаемой нагрузки, МВ · А	7,0	
2.11	Коэффициент мощности, отн. ед.	0,8	
2.12	Подключение	Звезда	V

	3. Условия окружающей среды и требования к оборудованию		
3.1	Уровень загрязненности окружающей среды	Пыль	
3.2	Степень защиты ДКИН (IP32, IP54, IP00)	IP54	
3.3	Температура окружающей среды, °С	5	
3.4	Высота над уровнем моря, м	<1000	
3.5	Требуется ли дополнительный входной коммутационный шкаф в комплекте с разводкой, предохранителями и выключателями для создания видимого разрыва?	Да	V
3.6	Требуется ли входной контактор/выключатель (нужное выделить)?	Да	V
3.7	Требуется ли шунтирующий контактор/выключатель (нужное выделить)?	Да	V
3.8	Требуется ли интерфейс обмена данных PROFIBUS или MODBUS?	Да	V
3.9	Требуется ли модуль аналоговых выходов?	Да	V
3.10	Желаемое напряжение управления (~110/220, =110/220), В	=220 В	
3.11	Комплект ЗИП	Малый	V

Список литературы

1. **Гуревич Ю. Е.** Об упорядочении взаимоотношений энергоснабжающих организаций и промышленных потребителей в области надежности электроснабжения // Электрические станции. 1998. № 9. С. 31 – 35.
2. **Taylor C. W.** Power System Stability, McGraw Hill, Inc., 1994. Performance of AC Motor Drives During Voltage Sags and Momentary. Interruptions, EPRI PQ Commentary. No. 3, December 1998.
3. **Применение** динамических компенсаторов искажений напряжения с целью обеспечения надежности электроснабжения потребителей / О. Н. Ивкин, Э. А. Киреева, В. М. Пупин, Д. В. и др. // Главный энергетик. 2006. № 1. С. 28 – 38.
4. **Куро Ж.** Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники. 2005. 1(31). С. 22 – 26, № 2(32). С. 26 – 30.
5. **Электромагнитная** совместимость оборудования на предприятиях по транспортировке и переработке нефти и газа при наличии источников высших гармонических / Б. Н. Абрамович, Ю. В. Гульков, М. М. Волошкин и др. // Энергетика в нефтегазодобыче. 2005. № 1. С. 23 – 26.
6. **Новости** энергетики // Главный энергетик. 2005. № 11. 2005. С. 14 – 15.
7. **Берх И. М., Мазуров М. И., Николаев А. В.** Система векторного регулирования статического компенсатора СТАТКОМ // Изв. НИИПТ. № 59. 2003. С. 89 – 95.
8. **Кузнецов В. Г., Шидловский А. К.** Фильтросимметрирующие устройства для повышения качества электроэнергии в сетях // Электричество. 1976. № 2. С. 27 – 32.
9. **Шидловский А. К., Кузнецов В. Г.** Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев: Наукова думка, 1985.
10. **Железко Ю. С.** Влияние потребителя на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение // Промышленная энергетика. 1991. № 8. С. 39 – 42.
11. **ГОСТ 13109–97** «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Изд-во стандартов, 1998.
12. **Гамазин С. И., Пупин В. М., Марков Ю. В.** Обеспечения надежности электроснабжения и качества электроэнергии // Промышленная энергетика. 2006. № 11. С. 51 – 56.
13. **Гамазин С. И., Пупин В. М., Марков Ю. В.** Современные способы повышения надежности электроснабжения потребителей на-

пряжением 10,6 и 0,4 кВ // Промышленная энергетика. 2008. № 8. С. 20 – 24.

14. **Бородин Б. Н., Пупин В. М., Егорова М. С.** Системный подход к повышению надежности электроснабжения потребителей Оскольского электрометаллургического комбината // Промышленная энергетика. 2008. № 11. С. 28 – 38.
15. **Справочник** по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / Под общ. ред. С. И. Гамазина, Б. И. Кудрина, С. А. Цырука. М.: Изд. дом МЭИ, 2010.
16. **Пупин В. М.** Новые технологии защиты электрооборудования от нарушений в питающих сетях // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем», ЭНЕРГО-2010 (Москва, 1 – 3 июня 2010 г.): в 2 т. М.: Издат. дом МЭИ, 2010. Т. 2. С. 42 – 46.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Введение 6

ГЛАВА ПЕРВАЯ. **Факторы, причины и статистика кратковременных нарушений электроснабжения** 9

1.1. Основные факторы и причины КНЭ 9

1.2. Статистика нарушений электроснабжения ООО «Тобольск-Нефтехим» и ОАО «Сибур-ПЭТФ» 11

1.3. Экспериментальные исследования и мониторинг провалов напряжения в системе электроснабжения ОАО «ОЭМК» . . . 15

ГЛАВА ВТОРАЯ. **Классификация устройств защиты от провалов напряжения** 37

2.1. Типы устройств защиты электрооборудования 38

2.2. Повышение устойчивости потребителей при провалах напряжения 42

2.3. Характеристика провалов напряжения в энергосистеме 44

2.4. Современные устройства повышения надежности и качества электроснабжения потребителей 48

ГЛАВА ТРЕТЬЯ. **Динамический компенсатор искажений напряжения** 53

3.1. Принцип работы и достоинства динамических компенсаторов искажений напряжения 53

3.2. Динамический компенсатор искажений напряжения для электрооборудования напряжением 380 В. 58

3.3. Основные преимущества динамических компенсаторов искажений напряжения 62

3.4. Осциллограммы работы динамического компенсатора искажений напряжения при провалах напряжения 65

3.5. Технико-экономическое предложение по поставке ДКИН 10 кВ 72

3.6. Срок окупаемости и экономический эффект от внедрения ДКИН. 85

Заключение и основные выводы 91

Приложение. Опросный лист поставки ДКИН напряжением 10 кВ 95

Список литературы 97

Библиотечка электротехника
Приложение к производственно-массовому журналу «Энергетик»

ПУПИН ВАЛЕРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

Устройства защиты от провалов напряжения

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23
Тел. (495) 675-19-06, тел./факс 234-74-21

Редакторы: **Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская**
Худож.-техн. редактор **Т. Ю. Андреева**
Корректор **Г. И. Эрли**

Сдано в набор 10.04.11. Подписано в печать 13.05.11.
Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Печ. л. 6,25. Заказ БЭТ/05(149)-2011.
Макет выполнен издательством «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.
Отпечатано типографией издательства «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Журнал «Энергетика за рубежом»

Приложение к журналу «Энергетик»

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу «Энергетик» — **«Энергетика за рубежом»**. Это приложение выходит **один раз в два месяца.**

Журнал «Энергетика за рубежом» знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики:

— *развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;*
— *особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;*
— *опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;*
— *модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;*
— *распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;*
— *энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.*

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ». Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.**

Подписной индекс журнала «Энергетика за рубежом» — *приложения к журналу «Энергетик»*

87261

Об авторе

Валерий Михайлович Пупин — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» НИУ «Московский энергетический институт». Работает в должности управляющего проектами ООО «НПК Промир» г. Москва.

Автор более 100 печатных изданий по вопросам расчетов параметров электродвигателей, переходных процессов в системах электроснабжения, режимов пуска и самозапуска двигателей, устойчивости систем промышленного электроснабжения, в том числе «Совершенствование надежности работы схем подстанций нефтепроводов при коротких замыканиях», «Процессы в узлах нагрузки при самозапуске электродвигателей», «Моделирование систем промышленного электроснабжения», «Статическая устойчивость систем промышленного электроснабжения».

Динамический компенсатор искажений напряжения —
надежность Вашего электроснабжения.