

07

ISSN 0013-5860



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
1 2001



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издается с января 1930 года

№ 1 ЯНВАРЬ 2001

УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ»
(г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ
«ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАН-
НЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО»
(г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В.,
МЕЩЕРЯКОВ В.М., ЩЕРБАКОВ В.Г.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета),
ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛО-
ВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
КОЧЕТКОВ В.Д.

БЕЛКИН Г.С., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х.,
ДОЛКАРТ В.М., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,
МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А.,
РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВС-
КИЙ О.В. (зам. главного редактора),
ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б.,
УСОВ Н.Н., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕН-
ЦЕВ С.Н.

Издатель: ЗАО "Знак"

103012, Москва, Б.Черкасский пер., 2/10

Адрес редакции:

123242, Москва,

Зоологическая ул., 11, комн. 213

Факс / телефон: 254-11-52

E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

При перепечатке ссылка на журнал
«Электротехника» обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с
точкой зрения авторов статей.

За содержание рекламных материалов
редакция ответственности не несет.

© «Электротехника», 2001 г.

СОДЕРЖАНИЕ

- Слежановский О.В.** Промышленный объектно-ориентированный электропривод 2
- Абрамов Б.И., Дрожжин А.С., Дронов А.С., Колоколкин А.М., Кузнецов Г.Д.** Частотно-управляемые электроприводы на базе высоковольтных преобразователей. 6
- Абрамов Б.И., Авдийский Е.И., Коган А.И., Кожиков О.И., Моцохейн Б.И., Парфенов Б.М.** Современное и перспективное электрооборудование установок для бурения скважин глубиной до 3900 м 11
- Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С., Роговой В.И., Шныренков А.А., Павлов В.И., Павелка И., Павелка П.** К вопросу применения быстроходных частотно-регулируемых электроприводов для турбокомпрессоров магистральных газопроводов. .. 17
- Абрамов Б.И., Коган А.И., Парфенов Б.М., Портной Т.З.** Направления совершенствования электрооборудования одноковшовых экскаваторов 26
- Рейнгольд Ю.Р.** Новые разработки для модернизации электроприводов мощных экскаваторов 30
- Абрамов Б.И., Парфенов Б.М., Шевырев Ю.В.** Методы выбора параметров фильтро-компенсирующих устройств ступенчатого типа для тиристорных электроприводов в системах соизмеримой мощности 38
- Ишханов Э.П.** Электрооборудование лифтов. Перспективы развития и применения 43
- Католиков В.Е.** Технологические особенности применения тиристорного электропривода шахтных подъемных машин 46
- Кузнецов Ю.П., Никифоров Е.А.** Электроприводы мощных конвейерных линий 55
- Абрамов Б.И., Иванов Г.М., Лезнов Б.С.** Энергосбережение средствами электропривода в коммунальном хозяйстве города .. 59
- Федоров А.М.** Новая серия командоаппаратов управления электроприводами 63
- Брагилевский Е.Л., Колин В.В., Лесниковский А.Е., Швеиц С.А., Шныренков А.А.** Унифицированная серия тиристорных бесконтактных пускателей типа ПБР, ПБН, ПБМ 66
- Иванов В.В.** Некоторые вопросы защиты асинхронных электродвигателей от перегрузки 69
- Румянцев А.Н., Батанов В.Е., Кочегарова Л.М.** Особенности сертификации низковольтных комплектных устройств 72

Рыночные реформы, проводимые в России в последние годы, существенно изменили подход к созданию отечественных электроприводов для важнейших отраслей промышленности и сельского хозяйства.

Изменение этого подхода можно характеризовать следующими положениями:

1. Возникла возможность широкого применения новейших достижений передовых зарубежных фирм в конкретных разработках, что исключило тем самым необходимость собственных разработок от А до Я.

2. Ужесточились требования заказчиков к техническим параметрам и исполнению электроприводов, что вызвало необходимость увеличить количество разработок, удовлетворяющих индивидуальным требованиям по обеспечению оптимального типа привода механизмов как в техническом, так и в ценовом плане.

3. Открылся доступ к передовым достижениям в области создания современных цифровых систем управления с использованием микропроцессоров и других средств вычислительной техники.

4. Жестокая конкуренция с передовыми зарубежными фирмами потребовала от отечественных разработчиков коренного пересмотра технического уровня применяемых для электроприводов комплектующих и устройств для получения преимуществ при комплектовании электропривода.

5. Повысились требования к экономичности электроприводов, к снижению потерь и эксплуатационных расходов. В связи с постоянным ростом цен на энергоносители вопросы энергосбережения стали преобладающими при выборе электропривода и т. д.

ОАО "Электропривод" (бывший ВНИИэлектропривод), используя длительные многосторонние связи с промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, проводит свои разработки с учётом этих изменений. В результате организации удалось получить заказы, сохранить коллектив и с каждым годом увеличивать число и качество разработок. При этом ученые и инженеры организации использовали значительный теоретический багаж, накопленный в стране за предшествующие годы.

Жизнь показывает, что как в практическом, так и в теоретическом плане развитие автоматизирования электропривода в стране продолжается и можно надеяться, что некоторый застой в этом преодолен и в ближайшие годы мы получим хорошие результаты. В июне-июле 1999 г. в Москве состоялся Всероссийский электротехнический конгресс, на котором (на секции № 3) были обсуждены вопросы состояния автоматизированного электропривода и выражено мнение, что электропривод, как научно-техническое направление, в последние годы получил дальнейшее развитие.

Это связано с повышением требований технологий к электроприводу, с появлением силовых приборов нового поколения и также производителей широкой номенклатуры микропроцессорной техники и других средств управления.

Залогом успеха, кроме того, является сохранение школ электроприводчиков в основных вузах и научно-исследовательских организациях, рост интереса молодежи к освоению этой важной и нужной профессии и появление большого количества специалистов, владеющих вычислительной техникой и программированием.

На Всероссийском электротехническом конгрессе и других мероприятиях по проблемам электропривода были определены основные научно-технические направления развития автоматизированного электропривода на ближайшие годы, исходя из требований технологий по показателям надежности, точности, быстродействию, качеству воспроизведения движения, энергетической эффективности, электромагнитной и информационной совместимости и другим показателям.

При этом была отмечена важность:

- расширения зон применения регулируемых электроприводов переменного тока;
- широкого применения силовой электроники нового поколения в электроприводах постоянного и переменного тока, в том числе и в высоковольтных электроприводах переменного тока;
- широкого применения в электроприводах цифрового управления, средств микропроцессорной и вычислительной техники;
- создания энергосберегающих систем и систем улучшающих энергетическую совместимость установок электропривода и питающих электрических сетей;
- создания высоко динамических электроприводов и систем для высокоточного технологического оборудования;
- создания объектно-ориентированных систем электропривода для уникальных установок.

С учётом этих задач научно-исследовательская организация ОАО "Электропривод" в своей технической и производственной деятельности следует избранному стратегическому направлению по созданию новой электротехнической продукции на основе широкой кооперации с отечественными и иностранными производителями, разработки типовых технических решений для комплексных поставок, расширение сферы услуг при внедрении продукции. Часть из проведенных работ и исследований легли в основу статей этого номера.

Кочетков В.Д., директор ОАО «Электропривод»,
академик РАН

Промышленный объектно-ориентированный электропривод

СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В., доктор техн. наук, проф.

Современный промышленный электропривод (ЭП) — сложная система, состоящая из целого комплекса взаимосвязанных элементов: исполнительный силовой орган (электродвигатель), источник питания (преобразователь), система управления ЭП, включая датчики параметров ЭП, задающие и информационные устройства. Все эти элементы совершенствуются, что позволяет производить все более прогрессивные ЭП, обеспечивающие оптимизацию производственных агрегатов или комплексов [1].

Удобство использования ЭП при создании современных исполнительных механизмов и промышленных комплексов обусловило то, что более 60% энергии, вырабатываемой в развитых странах, потребляется ЭП. Поэтому значимость проблемы совершенствования ЭП очевидна. Особенно в нашей стране, где установленная мощность электродвигателей составляет около 300 млн.кВт, а большая часть из них используется в регулируемых режимах, в то время как эффективность регулируемых ЭП огромна.

Параметры ЭП определяются требованиями машиностроительного комплекса различных отраслей народного хозяйства. В связи с этим диапазон мощности электроприводов чрезвычайно широк — от долей киловатта до 100 МВт. Диапазон регулирования частоты вращения двигателей достигает 10000 и более.

Технический же уровень комплектного ЭП во многом определяется качеством относительно небольшой номенклатуры основных компонентов: силовых полупроводниковых приборов, исполнительных двигателей, средств управления, защиты и диагностики, а также средств теплоотвода и конструктивов. От них зависит возможность реализации того или другого алгоритма управления и построения структуры привода, включая выбор типа преобразователя.

Удельный вес основных компонентов современного объектно-ориентированного привода показан на рис.1.

Одними из важнейших компонентов объектно-ориентированного ЭП являются силовые полупроводниковые приборы (СПП).

Силовая электроника бурно развивается. Четко выявилась тенденция к созданию мощных управляемых СПП, разработке интегрированных приборов в гибридном и твердотельном исполнении в виде законченных модулей со структурами, изолированными от корпуса модулей. Совершенствование технологии позволяет непрерывно увеличивать мощность приборов, повышать быстродействие и даже изготавливать на одной пластине приборы МОП и биполярной технологии.

С появлением полностью управляемых приборов открывается возможность проектировать преобразователи с высокими энергетическими показателями и с хорошей совместимостью с сетью, а также реализовывать ранее известные, но сложные в исполнении преобразователи с неявно выраженным звеном постоянного тока, отличающиеся однократным преобразованием энергии и допускающими двусторонний обмен энергией.

До недавнего времени регулируемый ЭП выполнялся преимущественно на основе применения электродвигателей постоянного тока. Однако по мере со-

вершенствования силовых полупроводниковых приборов и средств управления, повышения их надежности все больше проявляется тенденция к ориентации на регулируемый электропривод переменного тока.

Применение в качестве исполнительных двигателей переменного тока открыло возможность практически неограниченного увеличения мощности и улучшения перегрузочной способности ЭП, недостижимых при использовании двигателей постоянного тока вследствие ограничений по условиям коммутации. Отсутствие коллектора, кроме того, значительно расширяет области применения ЭП и обеспечивает экономию меди.

Тем не менее еще нельзя однозначно сказать, что регулируемый ЭП переменного тока доминирует в новых разработках. Созданы перспективные двигатели постоянного тока, а стоимость преобразователей ЭП значительно ниже стоимости преобразователей ЭП переменного тока.

Современные мощные тихоходные двигатели постоянного тока проектируются с многоходовыми обмотками якорей, с шихтованными станинами и пониженным количеством полюсов. Это позволяет улучшить их геометрию, снизить влияние вихревых токов и увеличить мощность при том же диаметре [2].

Применение мощных стабильных постоянных магнитов способствует улучшению показателей машин постоянного тока небольшой мощности и расширяет области их применения.

За счет оптимизации конструкции магнитной системы, улучшения системы охлаждения, применения более совершенных изоляционных материалов, компактности обмоток осевого удлинения активной части, применения системы диагностического контроля достигнуто увеличение мощности на 40—70% для разных типоразмеров машин общего применения при сохранении высоты центра. Кроме того, ресурс работы щеточного аппарата доведен до 15000 ч [3].

В случае ориентации на применение ЭП переменного тока необходимо учитывать, что тип и конструкция двигателей оказывают влияние на выбор типа преобразователей, структуры систем управления и их элементную базу. В большинстве случаев желательно обеспечить синусоидальную форму тока в обмотках двигателя. При этом может бы достигнут предельный диапазон регулирования.

С другой стороны трапецеидальная форма тока обеспечивает достижение более высоких значений момента (приблизительно на 14%), но при этом в зоне низких частот вращения начинает сказываться пульсация момента, приводящая к эффекту шатания.

Требования к форме тока зависят от конструкции двигателей. Наиболее чувствительными к форме тока являются двигатели так называемой дисковой конструкции, при которой мала индуктивность обмоток.

Широко распространенными типами преобразователей, используемых в частотно-управляемых электроприводах, являются инверторы тока напряжения, циклоконверторы и их модификации. Каждый из названных типов отличается своими особенностями и опирается на определенный тип силовых приборов.

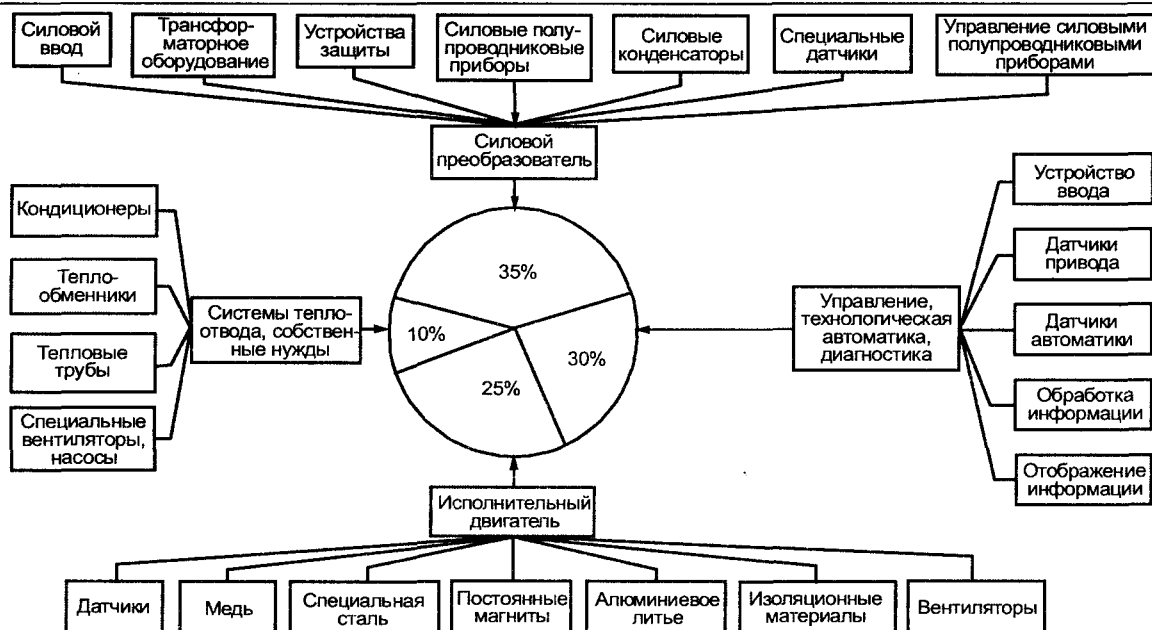


Рис.1. Схема комплектации объектно-ориентированных электроприводов

Наименее жесткие требования к СПП предъявляются при создании циклоконверторов — преобразователей с естественной коммутацией и инверторов тока для систем с коммутацией нагрузкой. Преобразователи этих типов обычно проектируются с ориентацией на использование обычных тиристоров.

Достоинство циклоинверторов — высокая надежность, отсутствие устройств принудительной коммутации, возможность двухстороннего обмена энергией без привлечения дополнительных средств. К недостаткам их можно отнести большое количество силовых приборов, ограниченный диапазон регулирования частоты, низкие энергетические показатели.

Недостатки инвертора тока — прямоугольная или квазипрямоугольная форма тока, ограниченное быстродействие изменения тока вследствие наличия дросселя в звене постоянного тока.

Освоение производства управляемых силовых полупроводниковых приборов открыло новые возможности в создании инверторов напряжения с неуправляемым звеном постоянного тока и широтно-импульсной модуляцией напряжения у инвертора. Такие ШИМ преобразователи обеспечивают высокие энергетические показатели и в случае использования быстродействующих СПП позволяют формировать рабочие токи, близкие к синусоидальным. При этом необходимо учитывать, что высокие значения производных напряжения, которые могут достигать несколько тысяч вольт в микросекунду при высоких частотах коммутации ключей инвертора, способны причинить повреждения изоляции двигателей вследствие емкостных токов и вызывать повышенные радиочастотные шумы от соединений между инвертором и двигателем [4].

При ШИМ регулировании растут потери и в трансформаторном оборудовании (на 20—30%) в зависимости от типа модуляции [5].

Повышенные требования, предъявляемые к исполнительным двигателям ЭП переменного тока, обусловили необходимость разработки и организации производства новых серий асинхронных и вентильных двигателей. Такие работы в стране ведутся

ОАО "НИПТИЭМ" и рядом других предприятий [6]. Ярославский завод ОАО "ELDIN" с соисполнителями разработал и организовал производство асинхронных двигателей серии RA [7].

Совершенствование технологии и применение новых типов обмоток позволили на 30—60% снизить дифференциальное рассеяние, магнитные шумы, вибрации и потери в стали.

Ведутся работы по использованию новых изоляционных материалов сталей, облегченных конструктивных сплавов. Так, применение стали с ориентированной структурой позволило уменьшить потери до 1,3 Вт/кг (2—4 Вт/кг в случае обычной стали) и обеспечить индукцию 1,7 Тл (1,5 Тл у обычной стали).

ЧЭАЗ разработана перспективная серия вентильных двигателей с использованием высокоэнергетических магнитов Nd-Fe-B с изоляцией класса F. Двигатели укомплектованы датчиками положения ротора, температуры и бесконтактными тахогенераторами. Уровень шума не превышает 82 дБ [8].

Выбор типа исполнительного двигателя во многом определяет способ выполнения комплектного ЭП.

Основные принципы построения современных ЭП изложены в [9]. Варианты компоновки объектно-ориентированных ЭП показаны на рис.2. Выбор вариантов определяется требованиями к ЭП и наличием соответствующих комплектующих.

При проектировании объектно-ориентированных ЭП должен быть принят комплексный подход, учитывающий взаимодействие механизмов, связанных технологий.

Основой для построения систем управления современными объектно-ориентированными ЭП служат микропроцессорные элементы или специализированные ЭВМ, а алгоритмы управления чаще всего опираются на использование принципов подчиненного регулирования параметров привода. Теория такого управления достаточно разработана для приводов постоянного тока.

Управление координатами ЭП переменного тока значительно сложнее, чем постоянного, так как асин-

хронные и синхронные двигатели являются нелинейными многомерными объектами, характеризующимися нелинейными зависимостями и перекрестными связями между регулируемыми параметрами.

При относительно невысоких требованиях к динамике привода, диапазону регулирования частоты вращения двигателя и стабильности поддержания заданных параметров, целесообразно применить простые, так называемые разомкнутые системы управления, обеспечивающие постоянство отношения напряжения питания двигателя к частоте (закон М.П.Костенко). Разновидностей таких систем много. Применяются они в случае использования инверторов напряжения, в том числе с ШИМ. Такие системы обеспечивают диапазон регулирования при неизменном моменте сопротивления не хуже (3—5):1.

При более высоких требованиях к диапазону регулирования частоты вращения (до 100:1) могут быть применены так называемые частотно-токовые системы или системы с ориентированным по полю или векторным управлением, обеспечивающим и высокие динамические характеристики.

Такие, более сложные системы выполняются замкнутыми с использованием принципов подчиненного регулирования параметров и требуют контроля основных координат привода (ток статора, ток возбуждения, частота вращения, положения ротора). Управление может выполняться как в аналоговой, так и в цифровой форме [10, 11].

Освоение промышленного производства новой элементной базы в стране, прежде всего микропроцессорных средств, открыло возможности перспективных разработок.

Металлургическая, горнодобывающая отрасли, энергетика и транспорт определяют наиболее жесткие требования к ЭП. Так, металлургическая и гор-

нодобывающая отрасли обусловили необходимость создания регулируемых ЭП мощностью до 30 МВт как тихоходных для размольных установок и прокатных станов, так и быстроходных для газоперекачки и ряда приводов металлургии. При этом, несмотря на достигнутые успехи с приводами постоянного тока прокатных станов, выявилась тенденция к переходу и в металлургии к приводу переменного тока с преобразователями с непосредственной связью для тихоходных ЭП обжимных станов.

Энергетика нуждается в обеспечении регулируемым мощным высоковольтным приводом переменного тока для механизмов собственных нужд электростанций, в том числе АЭС, гидроаккумулирующих станций, а также в создании мощных тиристорных источников питания кратковременного действия для термоядерных реакторов. Суммарная импульсная мощность источников питания реактора равна 3600 МВт. Наиболее мощные источники питания 25 кА, 10000 В.

Широкий спектр требований предъявляется к ЭП транспорта. Электродвижение судов требует создания приводов переменного тока с синхронными двигателями гребных установок мощностью до 20 МВт (ледокол). Привод электровозов ориентирован на применение частотно-регулируемых систем с двигателями мощностью до 1 МВт.

Большую значимость приобретают разработки регулируемых мощных быстроходных ЭП нефте- и газоперекачки. Внедрение регулируемого ЭП позволит экономить около 20% попутного газа. Потребность в регулируемых приводах газоперекачивающих агрегатов на десятилетие оценивается в 3—3,5 млн. кВт, в том числе мощностью 2,5; 6,3; 25 МВт.

Особое внимание должно быть уделено разработке и организации производства регулируемых ЭП механизмов с вентиляторной нагрузкой. Это объясняется

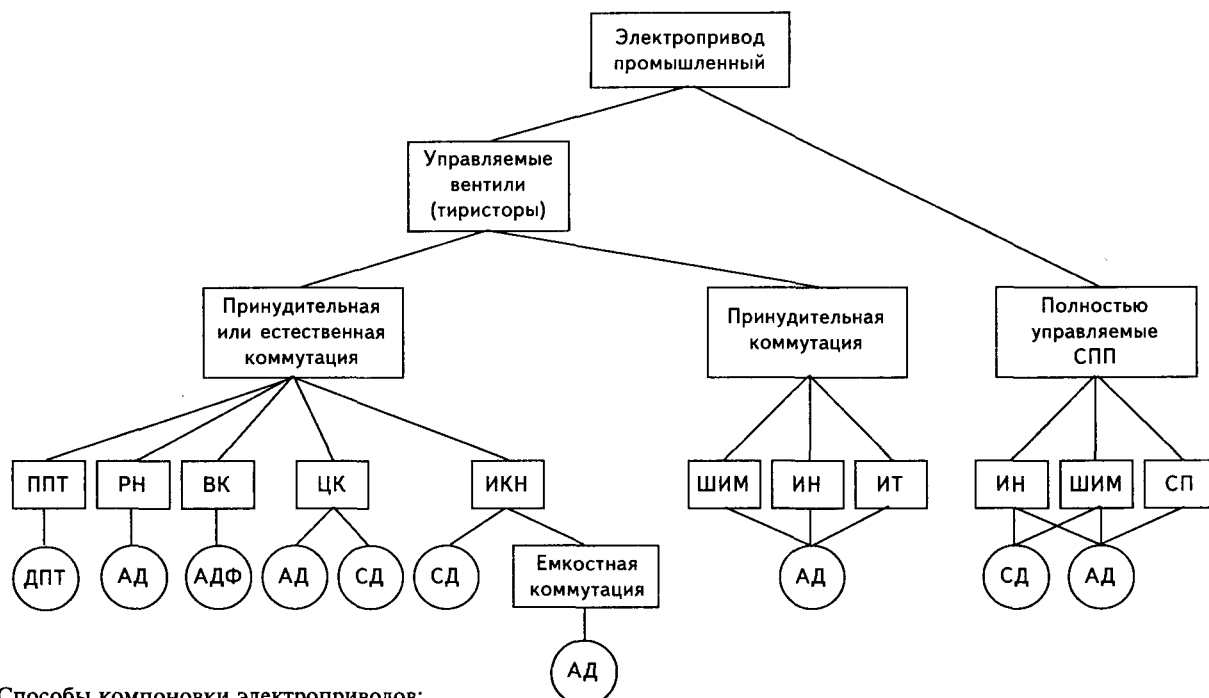


Рис.2. Способы компоновки электроприводов:

ППТ — преобразователь постоянного тока; РН — регулятор напряжения; ВК — вентильный каскад; ЦК — циклоконвертор; ИКН — инвертор коммутируемый напряжением или с естественной коммутацией; ШИМ — преобразователь с широтно-импульсной модуляцией; ИН — инвертор напряжения; ИТ — инвертор тока; СП — специальный преобразователь; ДПТ — двигатель постоянного тока; АД — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; АДФ — асинхронный двигатель с фазным ротором; СД — синхронный двигатель

тем, что на долю таких механизмов приходится около 60% установленной мощности двигателей, а также выявленной эффективностью регулирования производительности изменением частоты вращения двигателя (экономия около 25% электроэнергии).

Агропромышленный комплекс, легкая и химическая промышленность являются потребителями массовых ЭП малой и средних мощностей и относительно невысокими требованиями к диапазону регулирования и динамики.

В станкостроении ЭП переменного тока с синхронными двигателями для механизмов подачи и асинхронными для механизмов главного движения позволил в 2—3 раза увеличить скорость механизмов главного движения (до 6000—12000 об/мин), в 1,5—2 раза повысить скорость подачи и ускорение, сократить время поиска неисправностей, облегчить обслуживание и в 1,5—2 раза повысить точность обработки.

В создание комплексных систем объектно-ориентированного ЭП существенный вклад вносит ОАО "Электропривод". Последние разработки ОАО "Электропривод" отражены в данном номере журнала.

В статье "Частотно-регулируемые электроприводы на базе высоковольтных преобразователей" изложены принципы построения ЭП мощностью от 400 до 2150 кВт на напряжение питания 6, 10, 15, 75 кВ. Исполнительные двигатели синхронные. Основное назначение — компрессорные станции, насосы, вентиляторы. Разработка выполнена в содружестве ОАО "Электропривод", ЦАГИ, АООТ "ЭНИН", ОАО "Электровыпрямитель".

Коллективом сотрудников ОАО "Электропривод", ООО "Мострангаз", "Чешский технический университет" и ЧКД "Промышленная электроника" представлена статья "К вопросу применения быстроходных частотно-регулируемых электроприводов". Предусматривается кооперированная поставка с Чехией. Исполнительные двигатели синхронные.

Сотрудниками ОАО "Электропривод" и ВЗБТ подготовлена статья "Современное и перспективное электрооборудование установок для бурения скважин глубиной до 3900 м". Описан положительный опыт эксплуатации установок для бурения скважин глубиной до 2500 м.

В кооперации с Московской государственной геологоразведочной академией представлена статья "Методы выбора параметров фильтро-компенсирующих устройств ступенчатого типа для тиристорных электроприводов в системах соизмеримой мощности". Методика демонстрируется на примере, связанном с нефтебурением.

Сотрудниками ОАО "Электропривод" подготовлены статьи, посвященные электроприводам экскаваторов — перспективам совершенствования, методам исследования и модернизации. Показано, что с 60-х годов разработки ведутся в тесном сотрудничестве с машиностроительными и электромашиностроительными заводами. Ближайшие поставки ориентированы на системы Г-Д для главных приводов. В перспективе по мере совершенствования СПП предусмотрен переход к приводам с полупроводниковыми преобразователями.

В статье "Электрооборудование лифтов, перспективы развития и применения" показано, что в настоящее время ОАО "Электропривод" ориентируется на широкую кооперацию с фирмой АВВ в части электроприводов, а технологическую автоматизацию выполняет на программируемых контроллерах. Это позволило организовать массовое производство пассажирских лифтов, удовлетворяющих современным требованиям.

В статье "Технологические особенности применения тиристорного электропривода шахтных подъемных машин" ОАО "Электропривод" предложены схемотехнические дополнения к САУ, обеспечивающие выполнение необходимых режимов по условиям технологии (в случае тиристорного электропривода с реверсом возбуждения).

Статья "Электроприводы мощных конвейерных линий" отражает достигнутые ОАО "Электропривод" успехи в разработке и организации производства электроприводов мощностью 200—1600 кВт с асинхронными двигателями с фазовым ротором (ток ротора до 1000 А, напряжение до 1600 В). Длина линии до 10—20 км, угол наклона до 16°.

В статье "Энергосбережение средствами электропривода в коммунальном хозяйстве города" приводятся примеры эффективности применения регулируемого электропривода в насосных установках различного назначения. Отмечено, что эффективность от внедрения САУ насосных установок возможна лишь в том случае, когда реализация технических решений осуществляется комплексно, захватывая составные части установок. При этом функции силовой основы выполняются регулируемым электроприводом.

Статья "Новая серия командоаппаратов", представленная ОАО "Электропривод", знакомит читателя с серией командоаппаратов датчиков, задающих устройств, пригодных для работы в тяжелых условиях эксплуатации.

В статье "Унифицированная серия тиристорных бесконтактных пускателей типов ПБР, ПБН, ПБМ", представленной сотрудниками ОАО "Электропривод" и Ульяновским машиностроительным заводом, показаны способы включения устройств, в том числе для обеспечения регулируемого пуска асинхронных двигателей. Обеспечивается коммутация токов от 0,5 до 630 А и ряд защитных функций.

В статье "Некоторые вопросы защиты асинхронных электродвигателей (ОАО "Электропривод") дан обзор средств температурной защиты и отражены их особенности.

В статье "Особенности сертификации инженерных комплексов устройств" отражен опыт работы ОАО "Электропривод" в этой области.

География применения разработок ОАО "Электропривод" продемонстрирована на третьей и четвертой страницах обложки журнала. Этот материал свидетельствует о масштабности работ и широких возможностях внедрения новых разработок.

Представленные статьи являются плодом успешной кооперации различных фирм в разработке перспективных систем электропривода, а также свидетельствуют о готовности к кооперированной поставкам комплексного объектно-ориентированного электропривода.

Список литературы

1. Слежановский О.В. Перспективы развития общепромышленного электропривода и его элементной базы//Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1990. С.367—371.
2. Слежановский О.В. Реверсивный электропривод постоянного тока. М.: Металлургия, 1967.
3. Иванов-Смоленский А.В., Копылов И.П., Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А., Сентюрихин Н.И. Перспективы развития электромеханики в XX веке//Электротехника. 2000. № 8.
4. Беспалов В.Я., Зверев К.Н. Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ преобразователей//Электротехника. 1999. № 9.

5. Зборовский И.А. Трансформаторы для преобразователей частоты//Электротехника. 1999. № 7.
6. Новиков В.К. Исследование, разработка и производство низковольтных электродвигателей//Электротехника. 1999. № 9.
7. Ахунов Т.А., Макаров Л.Н., Попов В.И. Особенности построения новой серии RA асинхронных машин//Электротехника. 1999. № 9.
8. Жуков В.П., Нестерин В.А. Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5ДВМ//Электротехника. 2000. № 6.
9. Розанов Ю.К., Флоренцев С.Н. Электропривод и силовая электроника//Электротехника. 1997. № 11. С. 7—12.
10. Терехов В.М. Современные способы управления и их применение в электроприводе//Электротехника. 2000. № 2.
11. Слежановский О.В. Непосредственное цифровое управление электроприводами//Автоматизированный электропривод. Силовые полупроводниковые приборы, преобразовательная техника. М.: Энергоатомиздат. 1983. С. 18—25.

Частотно-управляемые электроприводы на базе высоковольтных преобразователей

АБРАМОВ Б.И., ДРОЖЖИН А.С.,
ДРОНОВ А.С., КОЛОКОЛКИН А.М., КУЗНЕЦОВ Г.Д.

Разработаны и исследованы комплектные высоковольтные преобразователи частоты для плавного пуска и регулирования частоты вращения синхронных электродвигателей мощностью от 400 до 21500 кВт·А на напряжение питания 6; 10; 15; 75 кВ.

Эксплуатация разработанных комплектных преобразователей частоты позволила улучшить технико-экономические и технологические параметры насосной и компрессорной станций, повысить надежность оборудования и аппаратуры агрегатов, уменьшить производительные расходы.

ОАО "Электропривод", АООТ "ЭНИН им. Г.Н. Кржижановского" совместно с ОАО "Электровыпрямитель" (г.Саранск) была поставлена задача по разработке в течение 1995—1998 гг. для насосов, вентиляторов, компрессоров и других механизмов регулируемых электроприводов на базе высоковольтных комплектных тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) и синхронных электродвигателей (СД) на номинальные напряжения 6; 10; 15,75 кВ и номинальные токи от 50 до 800 А, а также освоить их производство.

В процессе разработки регулируемых электроприводов необходимо было провести анализ особенностей электромагнитных процессов, протекающих в системе "питающая сеть — мощный высоковольтный ТПЧ — СД", а также разработать саму систему управления, автоматического регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА) электропривода.

Функциональная схема системы автоматического регулирования (САР) разработанного электропривода по схеме "вентильного двигателя" для управления частотой вращения СД насосов, вентиляторов, компрессоров представлена на рис.1. САР электропривода для указанных механизмов построена без датчика положения на валу электродвигателя и без датчика состояния тиристоров. Особенностью САР является параллельное включение регуляторов тока (РТ) и напряжения (РН) системы управления выпрямителем, реализовать которую позволила разработанная система импульсно-фазового управления (СИФУ), построенная по одноканальному асинхронно-синхронному принципу. СИФУ имеет два основных канала формирования угла управления тиристорами (регуляторы напряжения и тока) и два вспомогательных канала, которые формируют граничные углы управления (α_{\min} (β_{\max}), α_{\max} (β_{\min})). Каждый канал содержит тактируемый интегратор и пороговый элемент, образующие задающий генератор (ЗГ) с регулируемой частотой выходных импульсов. Выходные сигналы пороговых элементов логически суммируются на входе однови-

ратора, который формирует тактирующий импульс для интеграторов и общего для СИФУ кольцевого распределителя на шесть импульсов (по числу ВТВ в ТПЧ).

В САР предусмотрена компенсация противоЭДС реактора в переходных режимах работы. Регулирование магнитного потока возбуждения СД для частотноуправляемых электроприводов осуществляется пропорционально току статора в функции $u/f = \text{const}$.

Формирование выходной частоты вращения ротора и угла управления тиристорами инвертора осуществляется СИФУ инвертора по напряжению на его входе. Это обеспечивает связанное регулирование напряжения цепи постоянного тока и угла опережения управления тиристорами инвертора β , а также пуск СД в условиях синхронизма с пусковых частот, равных 0,05—0,5 Гц в заданном направлении вращения без датчика положения ротора на валу СД. Определение начального положения ротора осуществляется по знаку трансформаторной ЭДС, наводимой в обмотках статора СД, при подаче тока в обмотку возбуждения.

В результате проведенных работ была разработана новая серия регулируемых электроприводов на базе комплектных тиристорных преобразователей частоты типа ПЧ-ТПП [1] и СД.

Конструкция шкафов ТПЧ на напряжение 6; 10 кВ для одностороннего обслуживания позволяет на уже эксплуатируемых объектах решать вопрос размещения оборудования на имеющихся площадях.

Разработанные комплектные высоковольтные преобразователи частоты обеспечивают прямое преобразование напряжения питающей сети 6; 10; 15, 75 кВ частотой 50 Гц в напряжение регулируемых частоты и значения, что обеспечивает плавный пуск электродвигателя и экономичные режимы работы механизмов. Основные технические характеристики разработанных преобразователей частоты приведены в таблице.

Первый промышленный образец электропривода на базе преобразователя частоты типа ПЧ-ТПП на на-

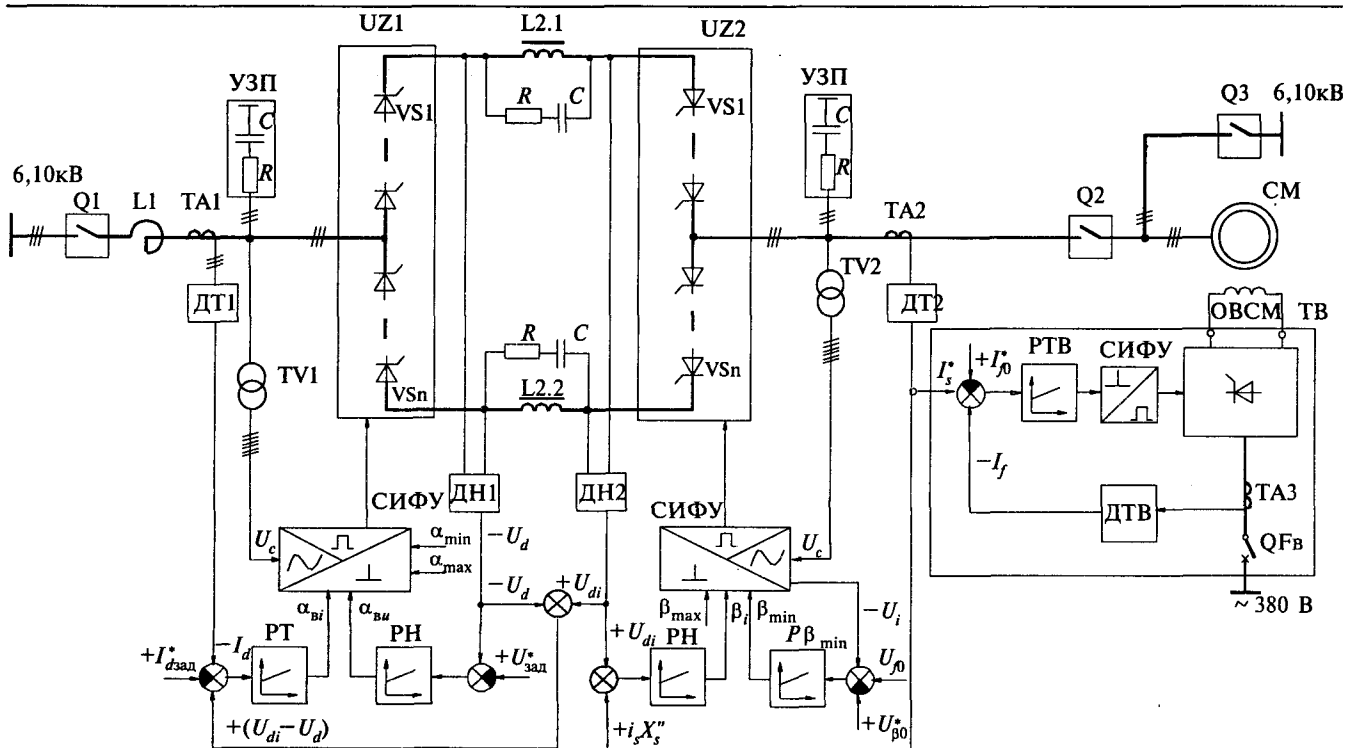


Рис. 1

Наименование параметра	ПЧ-ТТП-100 6кВ/10кВ	ПЧ-ТТП-200 6кВ/10кВ	ПЧ-ТТП-500 6кВ/10кВ	ПЧ-ТТП-800 15,75кВ	ПЧ-ТТП-2000 0,4-0,95кВ	ПТУ-50-6,3к	ПТУ-400-380-50
Номинальное входное и выходное напряжение тиристорной (силовой) части преобразователя, В	6000/10000 I*	6000/10000 I	6000/10000 I	15750 I	380-950 II*	6300 I	380-400 III***
Номинальный выходной ток, А	100	200	500	800	3000-1000	50	400
Перегрузки по току, А в течение 5 мин $1,2 I_n$ в течение 40 с $1,5 I_n$	120 150	240 300	600 750	960 1200	3600-1200 4500-1500	100 400	800 1600
Максимальный выходной ток при работе в качестве пускового устройства в повторно-кратковременном режиме, А	200	400	1000	1500	В зависимости от типа применяемого тиристора 4500-1500	В зависимости от типа применяемого тиристора 100-400	В зависимости от типа применяемого тиристора 1200-2000
Габариты блока силового, мм: высота ширина глубина	Одностороннее обслуживание 2200 2000 600	Одностороннее обслуживание 2200 2400 600	Одностороннее обслуживание 2400 3400 650	Двухстороннее обслуживание 2200 6000 1200	Двухстороннее обслуживание 2200-1800 1200-800 1200-800	Одностороннее обслуживание 2200+450 1200 600	Одностороннее обслуживание 790 500 350
Время пуска двигателя в зависимости от момента инерции и нагрузки	Не более 5 мин при естественном охлаждении	Не более 5 мин при естественном охлаждении	Не более 5 мин при естественном охлаждении	Не более 5 мин при естественном охлаждении	Не более 5 мин при естественном охлаждении	Не более 30 с	Не более 35 с
Количество пусков в час	Не ограничено	Не ограничено	Не ограничено	Не ограничено	Не ограничено	Не более 5	Не более 5
Режим работы для пусковых преобразователей	Отключен или в горячем состоянии	Отключен или в горячем состоянии	Отключен или в горячем состоянии	Отключен или в горячем состоянии	Отключен или в горячем состоянии	Отключен	Отключен

* Высоковольтный вариант
** Трансформаторный вариант
*** Низковольтный вариант

пряжение питания 10 кВ и ток 200 А сдан в эксплуатацию в 1998 г. на Восточной водопроводной станции (Москва). Первый опытный образец электропривода с трансформаторным вариантом пускового тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ), выполненного на напряжение 0,4 кВ, сдан в эксплуатацию на МАПО МИГ в 1999 г. Внедрение регулируемых электроприводов на базе ТПЧ для пуска и регулирования частоты вращения агрегатов с мощными СД позволяет решить следующие технико-экономические задачи:

- плавный пуск синхронного электродвигателя с ограничением пускового тока в заданном направлении вращения;
- плавное регулирование частоты вращения СД в диапазоне (3–5)–60 Гц;
- стационарный режим точной синхронизации частоты и фазы напряжения СД с частотой и фазой напряжения сети с автоматическим переключением СД, получающего питание от ТПЧ, на прямое питание от сети или наоборот;
- рекуперативное торможение СД с любой частоты вращения с заданным темпом, в том числе и торможение из режима питания от сети;
- автоматическое переключение СД от питающей сети на питание от ТПЧ для регулирования частоты вращения СД в диапазоне 60–3 Гц.

Замена нерегулируемого электропривода регулируемым обеспечивает получение новых возможностей для управления технологическими параметрами, экономии электроэнергии до 15–30% для насосных, компрессорных, вентиляторных агрегатов.

Основными показателями, определяющими технико-экономическую эффективность внедрения регулируемых электроприводов на базе ТПЧ, являются его собственная стоимость, надежность работы, простота обслуживания, стоимость работ по внедрению (проектирование, монтаж, привязка к существующей системе управления и автоматизации технологических процессов). Далее с этих позиций будут рассмотрены три основные схемы регулируемых электроприводов на базе ТПЧ, представленные на рис.2–4.

На рис.2 приведена наиболее дешевая и простая схема трансформаторного варианта пускового ТПЧ для высоковольтных СД малой и средней мощности (до 4,5 МВ·А), реализованная на МАПО МИГ и Нарофоминском шелковом комбинате. Она используется для поочередного пуска трех турбокомпрессоров мощностью 1600 кВ·А. Габариты силовой части преобразователя, включая дроссель звена постоянного тока, 1000×1000×2200 мм. В качестве распределительного ус-

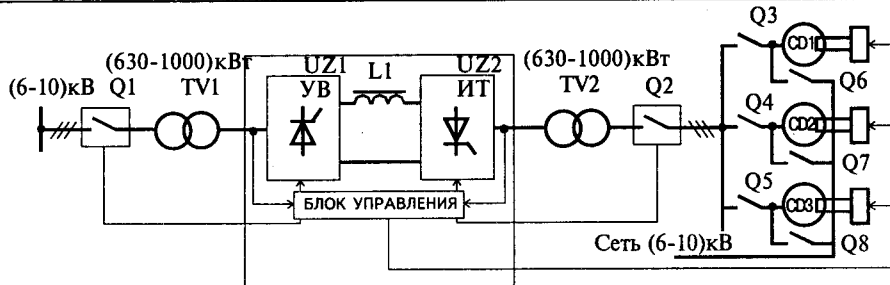


Рис.2

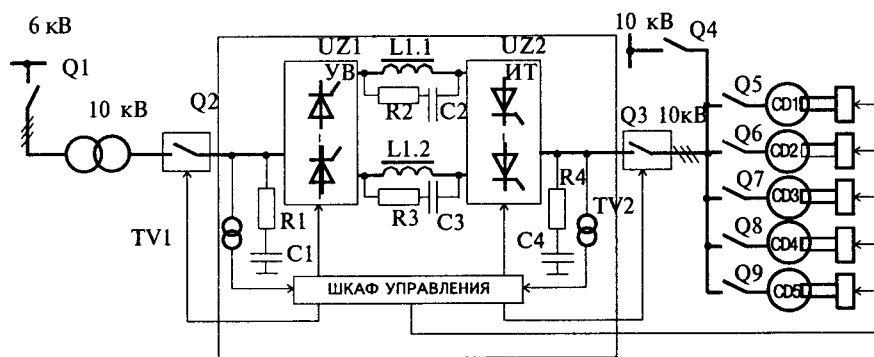


Рис.3

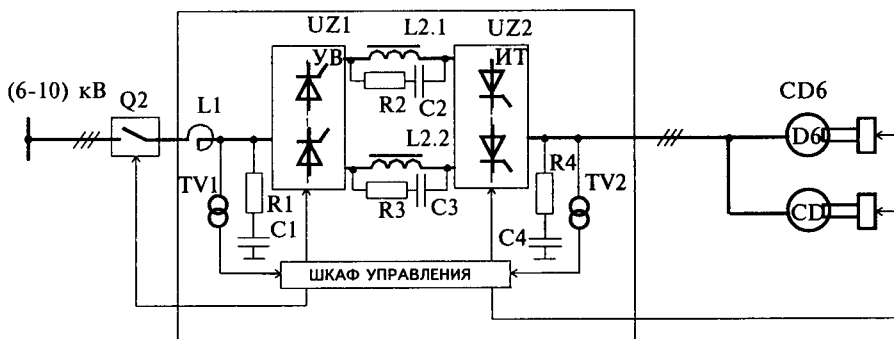


Рис.4

тройства переменной частоты (РУ–ПЧ, выключатели Q1–Q3) использованы малогабаритные вакуумные выключатели фирмы "Таврида-Электрик". Режим работы ТПЧ повторно-кратковременный, охлаждение тиристоров — естественное, воздушное. Такой вариант выполнения ТПЧ для высоковольтного СД целесообразно использовать и для систем частотно-регулируемых электроприводов мощностью до 1600 кВт.

На рис.3 представлена структурная схема системы частотно-регулируемых электроприводов станции второго подъема Восточной водопроводной станции (ВВС) Москвы. Система обеспечивает одновременный частотный пуск, групповое регулирование частоты вращения и переключение на питание от сети любых трех насосных агрегатов из пяти. Выключатели Q1, Q2 и Q4–Q8 — штатные. Разделительный трансформатор на входе ТПЧ уменьшает влияние работы ТПЧ на сеть и снижает перенапряжения относительно земли на статорных обмотках СД.

На рис.4 представлена структурная схема индивидуального частотно-регулируемого электропривода на ВВС (насосного агрегата №6), не требующая дополнительной коммутационной аппаратуры и разделительного трансформатора. В этом случае электродвигатель

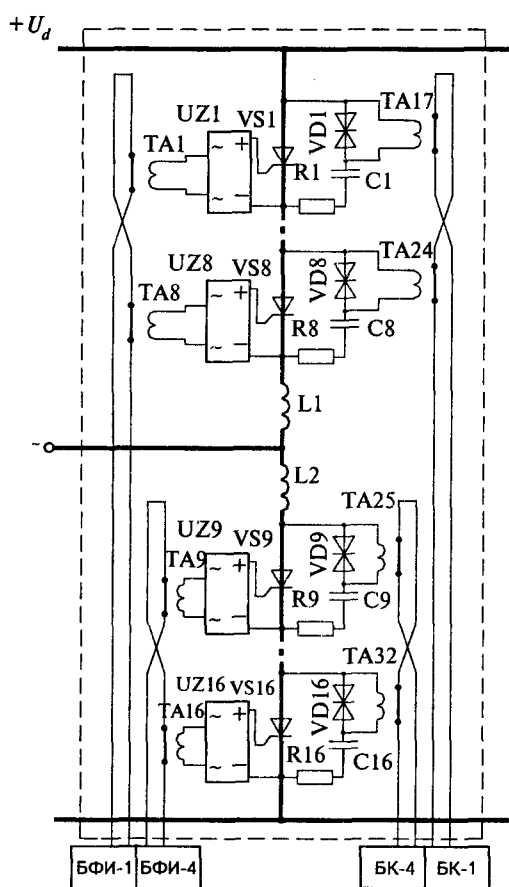


Рис.5

агрегата подключается непосредственно к выходу ТПЧ, а в качестве выключателя на входе ТПЧ используется штатный выключатель. Ограничение токов и уменьшение влияния работы ТПЧ на сеть обеспечивает токоограничивающий реактор на входе ТПЧ.

Сглаживающий реактор звена постоянного тока выполнен с двумя симметричными обмотками, расположенными на разомкнутом железном сердечнике.

Основным элементом силовой части ТПЧ является высоковольтный тиристорный вентиль (ВТВ), схема которого представлена на рис.5. В рассматриваемых ТПЧ ВТВ состоит из последовательно соединенных тиристоров, каждый из которых шунтирован лавинным ограничителем и сравнительно маломощной RC цепью. Ограничение скорости нарастания тока при включении ВТВ осуществляется общим дросселем ($L1$, $L2$) насыщения, включенным последовательно с ВТВ. Время перемагничивания дросселя несколько больше паспортного значения времени задержки включения применяемых тиристоров, которые должны иметь одинаковые классификационные группы. Количество соединенных последовательно тиристоров выбрано таким, что при пробое двух тиристоров ВТВ сохраняет свою работоспособность.

Управление последовательно соединенными тиристорами ВТВ осуществляется по трансформаторно-кабельной цепи. Импульсы управления тиристорами — широкие с длительностью в 120° , с частотой заполнения $50\text{--}100$ кГц.

Надежная работа формирователей импульсов позволила отказаться от системы контроля параметров формируемого импульса управления.

Для контроля пробоя тиристоров в ВТВ используются дополнительные импульсные трансформаторы, вторичные обмотки которых включены в разрыв RC-цепей, подключенных параллельно тиристорам, а первичные (один-два витка) соединяются последовательно [2]. Контроль за состоянием тиристоров осуществляется в безтоковую паузу по уровню напряжения на входе генератора, настроенного в резонанс и подключенного последовательно первичным обмоткам трансформаторов $TA17\text{--}TA32$.

Такая схема обеспечивает контроль состояния тиристоров как до подачи силового напряжения, так и при работе ТПЧ.

Одной из особенностей высоковольтных ТПЧ является высокая добротность LC-контура, образуемого дросселем звена постоянного тока и емкостями относительно земли силового трансформаторно-кабельного оборудования и собственно СД. Возникающие в указанном контуре при коммутациях высокочастотные колебания частотой в $1\text{--}3$ кГц увеличивают уровень напряжения относительно "земли" на входе и выходе ТПЧ.

Наиболее эффективное техническое решение по демпфированию высокочастотных колебаний — включение параллельно обмоткам дросселя звена постоянного тока RC-цепей. В такой схеме тепловые потери в RC-цепях при заданном уровне демпфирования получаются минимальными. Наиболее эффективное уменьшение потерь в демпфирующих RC-цепях и перераспределение напряжений относительно "земли" на входе и выходе ТПЧ обеспечивает включение на входе ТПЧ разделительного трансформатора, что приводит к увеличению стоимости комплектного электропривода.

Эксплуатация полностью подтвердила высокую надежность выбранных технических решений. Незначительный выход из строя тиристоров и лавинных ограничителей происходит, как правило, в процессе пуска наладочных работ.

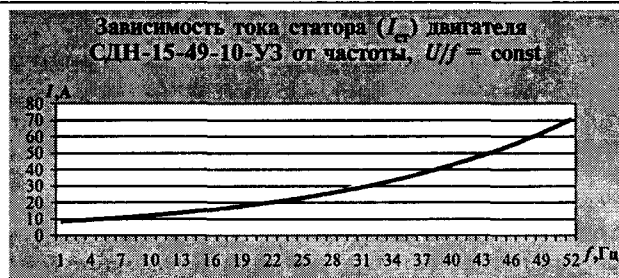
Наработка на отказ электропривода на базе преобразователя частоты ПЧ-ТПП-200-10к-50, введенного в эксплуатацию в 1998 г., уже составила более 9000 ч.

СИФУ [3] ТПЧ электропривода обеспечило высокую помехоустойчивость (ни одного случая сбоя СИФУ, в том числе и для ТПЧ на напряжении $15,75$ кВ мощностью 25000 кВ·А) и симметрию выходных импульсов, а также возможность устанавливать заданные значения угла управления до подачи силового напряжения.

Пуск от одного ТПЧ сразу трех насосных агрегатов в заданном направлении вращения осуществляется по тому же алгоритму, что и при пуске одного агрегата. При этом на первом этапе пуска (до 10 тактов работы СИФУ с пусковой частотой) могут наблюдаться качения роторов и их незначительный поворот в разных направлениях вращения. Дальнейший пуск и регулирование частоты вращения проходят при практически одинаковых значениях статорных токов СД, составляющих одну треть выходного тока ТПЧ.

Для пусковых ТПЧ ток возбуждения СД поддерживается, как правило, неизменным. Включение и выключение системы возбуждения СД, а также изменение тока возбуждения осуществляются по командам из шкафа управления ТПЧ.

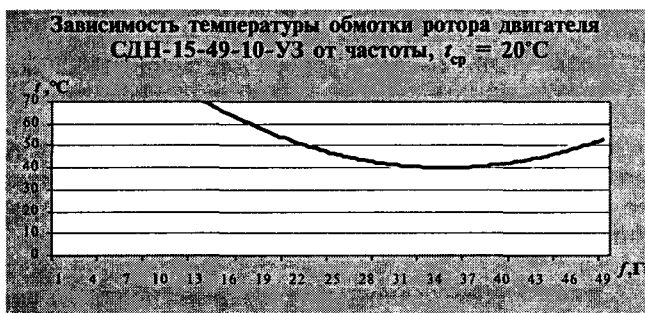
Все электроприводы имеют встроенную систему защит, обеспечивающую отключение ТПЧ, в следующих случаях: при снижении напряжения питания



а)



б)



в)



г)

Рис.6

(380 В) собственных нужд ниже допустимого значения; при снижении напряжения питающей сети на входе ТПЧ ниже допустимого значения; при повышении напряжения на выходе ТПЧ выше $1,1U_{ном}$ СД; при появлении перенапряжений относительно "земли" на входе ТПЧ выше допустимого значения; при появлении перенапряжений относительно "земли" на выходе ТПЧ выше допустимого значения; при замыкании силовых цепей и цепей управления на "землю"; при повышении тока СД выше допустимого значения; при опрокидывании выпрямителя или инвертора (дифференциальная токовая защита); при про-

бое тиристора в силовом блоке; при неисправности в системе управления и регулирования.

Выводы

1. Опыт промышленной эксплуатации частотно-управляемых электроприводов по схеме "вентильного двигателя" на базе высоковольтных преобразователей частоты показал, что наибольшее количество несанкционированных отключений ТПЧ происходит от снижения напряжения силового питания ниже допустимого значения. Так для группового частотно-регулируемого электропривода (рис.3) за пять месяцев 1999 г. (с 01.01 по 25.05) зафиксировано 4 отключения вследствие пропадания питающего напряжения или снижения его уровня ниже допустимого значения.

Такие аварийные отключения наиболее не предсказуемы по последствиям, так как при этом нарушается синхронизация СИФУ выпрямителем. Далее идут отказы системы возбуждения и коммутационной аппаратуры (два отказа системы возбуждения, один отказ выключателя на входе ТПЧ).

2. Случаев пробоя тиристоров или лавинных ограничителей при несанкционированных отключениях ТПЧ не зафиксировано, что подтверждает высокую эффективность разработанной системы управления, защиты и автоматики.

3. Тепловые испытания при длительной работе частотно-регулируемых электроприводов с синхронными электродвигателями с явно выраженными полюсами типа СДН и ВДС с шихтованным ротором насосных агрегатов показали, что температура нагрева стали, обмотки статора и ротора не превышает допустимых значений в диапазоне регулирования частоты вращения от 15 до 47–50 Гц (рис.6). Поэтому работа СД указанных типов насосных агрегатов в составе частотно-регулируемых электроприводов тепловыми режимами не ограничивается. Уровень дополнительных потерь существенно зависит от конструктивных параметров синхронной машины, в частности от типа ротора (кованный или шихтованный). Опыт эксплуатации пусковых ТПЧ показал, что независимо от типа двигателя нет никаких ограничений по числу и частоте пусков электродвигателей, в том числе и из горячего состояния.

4. Экономия электроэнергии за пять месяцев эксплуатации регулируемых электроприводов на ВВС составила 2 000 000 кВт·ч, удельные затраты на подачу 1000 м³ воды сократились почти на 30%, а срок окупаемости группового частотно-регулируемого электропривода составил менее 1 года.

5. В процессе промышленной эксплуатации частотно-управляемых электроприводов по схеме "вентильного двигателя" на базе высоковольтных преобразователей частоты типа ПЧ-ТПП и мощных синхронных электродвигателей было установлено:

— разработанные математические модели системы "тиристорный преобразователь частоты на основе инвертора тока — синхронная машина" позволяют с достаточной точностью определить статические и динамические характеристики синхронного электропривода при различных системах автоматического регулирования;

— разработанная система автоматического регулирования электропривода на базе СМ с управлением выходной частотой инвертора, пропорциональной его

противоЭДС, для турбомеханизмов (насосов, вентиляторов, компрессоров) позволяет отказаться от установки датчика положение ротора, так как обеспечивает частотный пуск СД в условиях синхронизма, начиная с первого такта работы системы управления;

— разработанная унифицированная одноканальная система управления выпрямителем и инвертором ТПЧ обладает высокой помехоустойчивостью и обеспечивает совместно с системой регулирования близкие к оптимальным характеристики электропривода.

Список литературы

1. А.с. 10301 РФ, МКИ H02P1/50. Электропривод переменного тока/Б.И.Абрамов, А.М.Колоколкин, А.С. Дрожжин и др.// Открытия. Изобретения. 1999. №6.

2. А.с. 9100 РФ, МКИ H02H7/12. Устройство для контроля пробоя последовательно соединенных тиристоров // А.М.Колоколкин, А.С.Дрожжин, А.С.Дронов //Открытия. Изобретения. 1999. №1.

3. А.с. 9103 РФ, МКИ H02P13/00. Устройство для формирования предельных углов импульсно-фазового управления// А.М.Колоколкин, А.С.Дрожжин, А.С.Дронов//Открытия. Изобретения. 1999. №1.

Современное и перспективное электрооборудование установок для бурения скважин глубиной до 3900 м

АБРАМОВ Б.И., АВДИЙСКИЙ Е.И., КОГАН А.И., КОЖАКОВ О.И.,
МОЦОХЕЙН Б.И., ПАРФЕНОВ Б.М.

ОАО “Электропривод” работает в области создания и производства электрооборудования для буровых установок более 40 лет. За этот период сложились следующие характерные особенности его деятельности:

— комплексная разработка систем электропривода, от исходных технических требований до рабочей технической документации, изготовления комплектов устройств управления, объединения усилий электротехнических предприятий по созданию электротехнических комплексов, комплектной поставки электрооборудования;

— ориентация в основном на отечественное электрооборудование; в исключительных случаях привлечение ведущих иностранных фирм к совместному производству на взаимовыгодных условиях;

— полные заводские испытания электроприводов в сборе на специально созданных стендах;

— ответственное участие во внедрении (наладка и сдача в эксплуатацию первых образцов новых установок, гарантийное обслуживание);

— составление подробных инструкций по наладке и эксплуатации нового электрооборудования, обучение электротехнического персонала, разработка и поставка специализированных диагностических средств; поставка запасных частей;

— индивидуальная работа с каждым заказчиком, выполнение необходимых модификаций систем по мощности, способам управления и т.п.

Перечисленные методы работы — это не декларация, а отработанные методы действия предприятия в течение многих лет.

Проводится постоянная работа по анализу зарубежных систем электропривода и электрооборудования буровых установок, аналитические данные используются в текущей работе, а также периодически публикуются.

Электропривод и электрооборудование главных механизмов являются важнейшей составной частью буровых установок (БУ) и во многом определяют технические показатели установок в целом.

Отечественные буровые установки оснащаются пре-

имущественно электроприводами переменного и постоянного тока с питанием от сети. В последнее десятилетие доля установок с электроприводом в России и странах бывшего СССР оценивалась приблизительно в 65—70%. По Российской Федерации в 1996 г. эта доля составила 64,3%. Преимущественная распространенность электропривода нашла отражение и в номенклатуре изготавливаемых на отечественных предприятиях буровых установок. Так, ОАО “Уралмаш” представляет 13 типоразмеров буровых установок для бурения на суше и кустового бурения с допустимой нагрузкой на крюке от 1600 до 4500 кН, из которых 8 — с электроприводом (их них 6 — на постоянном токе). Из 5 комплектов бурового оборудования для бурения на море 4 комплекта с электроприводом. ОАО “Волгоградский завод буровой техники” (ОАО ВЗБТ) предлагает 10 типоразмеров буровых установок для бурения на суше и кустового бурения с допустимой нагрузкой на крюке от 1000 до 2500 кН, из которых 9 — с электроприводом (их них 6 — на постоянном токе).

Распространенность установок с питанием от сети объясняется сложившимися традициями развития государственных энергосистем при незначительной стоимости электроэнергии. В этом заключается принципиальное отличие от ситуации, сложившейся за рубежом, где в условиях высокой стоимости электроэнергии и особенно строительства линий электропередачи преимущественное распространение получило автономное электроснабжение. В настоящее время в США, на долю которых приходится свыше 40% общего парка буровых установок мира (за исключением России и других стран бывшего СССР), число установок с электрическим приводом превысило 30% и возросло за последнее десятилетие в полтора раза. Наибольшее распространение электрический привод за рубежом получил на установках, осуществляющих глубокое эксплуатационное и разведочное бурение в странах Западной Европы (свыше 45%) и на Ближнем Востоке (свыше 52%). В морском бурении доля установок с электроприводом уже давно превысила 90%.

Производство отечественных буровых установок с электрическим и дизель-электрическим приводом осуществляется фирмой «Уралмаш — буровое оборудование» и ОАО «Волгоградский завод буровой техники». Старейшим изготовителем комплектных буровых установок — Уралмашзаводом — создано более 60 типов буровых установок, ряд которых был уникальным как по своим техническим параметрам, так и по конструктивному исполнению, в том числе уникальные установки для сверхглубокого бурения на суше и ряд комплектов оборудования для всех известных видов морского бурения — стационарных, самоподъемных, полупогружных платформ и бурового судна для глубин моря до 200 м. Создание уникальных установок для бурения на суше и море, начатое в тесном сотрудничестве с ОАО «Электропривод», способствовало развитию принципиально нового направления в приводе постоянного тока основных исполнительных механизмов буровых установок — использованию приводных электродвигателей в режиме торможения при спуске буровых колонн, а позднее и для автоматической подачи долота на забой. Важное место в разработке новых видов оборудования занимает совершенствование систем управления буровой установки, создающее предпосылки для внедрения систем управления на основе микропроцессорной техники.

Наметившаяся тенденция к оздоровлению экономики России, рост активности в освоении новых месторождений нефти и газа способствуют росту спроса на буровое оборудование. Основные объемы бурения в стране приходится на установки для бурения скважин глубиной до 3900 м. ОАО «Волгоградский завод буровой техники» к рассмотрению электропривода которых мы и перейдем.

Электрооборудование установок с глубиной бурения до 2500 м. Буровые установки класса БУ-2500 с электроприводом постоянного тока типа БУ-2500 ЭП (электрическая) и БУ-2500 ДЭП (дизель-электрическая) выпускались с 1985 по 1995 гг. Комплекс электрооборудования разработан ВНИИЭлектропривод (ныне ОАО «Электропривод») совместно с ОАО «ВЗБТ», поставку электрооборудования обеспечивали Московский Опытный завод НИИЭлектропривод, Гайский завод «Электропреобразователь», ОАО «Электросила» и др.

В этих установках по сравнению с предшествующими моделями были приняты принципиально новые для данного класса буровых установок технические решения:

- регулируемый неререверсивный тиристорный двухзонный электропривод постоянного тока, обеспечивающий возможность совершенствования технологического процесса бурения за счет оперативного изменения параметров режима;
- применение новой двухскоростной лебедки (взамен многоскоростной);
- повышение монтажеспособности и транспортабельности буровых установок за счет применения блочно-модульной конструкции оборудования;
- практически полная унификация комплекта электрооборудования главных механизмов (различия имеются только в системах электроснабжения — от централизованных электрических сетей или от автономных дизель-электростанций (ДЭС));
- для дизель-электрических буровых установок — свобода выбора типа электростанций, т.е. возможность

применения наилучших моделей дизель-электрических агрегатов;

- для электрических буровых установок — возможность питания от относительно длинных электрических линий — до 12 — 14 км (за счет снижения пусковых токов в 3 — 4 раза по сравнению с нерегулируемым приводом переменного тока).

Тиристорные преобразователи, примененные на этих буровых установках, разработаны специально для тяжелых условий эксплуатации:

- широкий диапазон температур окружающей среды (от — 45 до + 40°C);
- повышенный уровень вибрации при работе, удары при транспортировке, соответствующие группе механических условий эксплуатации М18;
- удаленность от баз обслуживания;
- возможность работы при питании от источников ограниченной мощности за счет снижения пусковых токов и использования фильтро-компенсирующих устройств, входящих в комплект поставки.

Для облегчения наладки, проверки и безаварийной эксплуатации электрооборудования преобразователи имеют развитую систему диагностики цепей питания и управления.

Все примененное оборудование — только Российского производства, однако основные технические решения соответствуют направлениям, принятым в зарубежной буровой технике.

Во внедрении первых образцов и их доработке большое участие приняли работники Управления главного энергетика и Управления бурения Миннефтепрома, буровых предприятий Бузулука и Самары, ВНИИБТ. Результаты работы установок оценены высоко. За истекший период выпущено и внедрено более 160 установок указанных типов, что значительно превышает количество всех остальных отечественных БУ с аналогичным электроприводом, вместе взятых.

Десятилетний период — хороший срок для выпуска буровых установок одной модели. Но, естественно, назрела целесообразность их модернизации, появились некоторые новые требования и ряд более совершенных технических решений.

Электрооборудование установок БУ-2900. Эволюционной новой разработкой являются комплексы электрооборудования для буровых установок БУ-2900/200 ЭПКБМ (1996—1997 гг.) и БУ-2900/175 ДЭП (1998—1999 гг.) производства ОАО ВЗБТ. Разработчики и изготовители основного электрооборудования — ОАО «Электропривод» и ОАО «Электросила». Типовая однолинейная схема основного электрооборудования представлена на рис. 1.

При сохранении основных принципиальных решений, принятых для установок класса БУ-2500 и рассмотренных выше, выполнены значительные усовершенствования системы электропривода:

- упрощены схемы силовых цепей за счет более совершенной компоновки электрооборудования и основных распределительных устройств;
- упрощены цепи управления благодаря применению современных микроэлектронных аналоговых систем управления;
- увеличена единичная мощность электроприводов лебедки и буровых насосов с 500 до 560 кВт;
- повышены степени комплектности и насыщенности комплектных устройств управления, сокращены количества шкафов и других устройств;

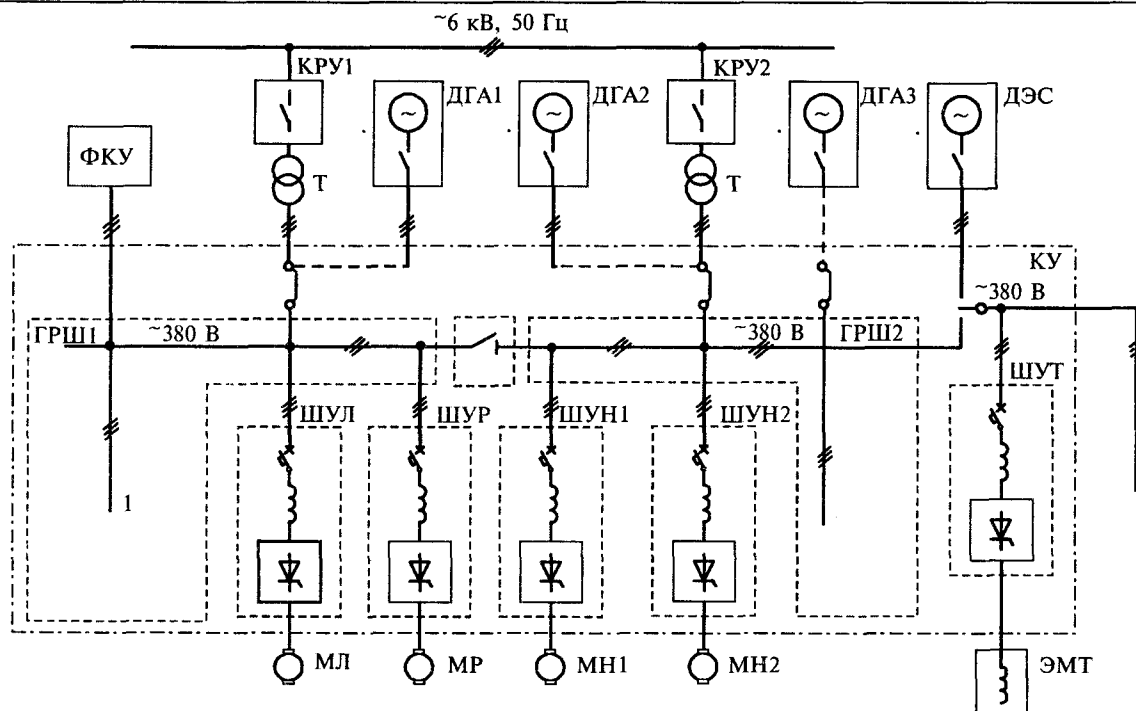


Рис.1. Однолинейная схема электроснабжения буровой установки БУ 2900/200 ЭПК БМ:

КРУ1, 2 — комплектное распределительное устройство; ДГА1, 2, 3 — дизель-генераторный агрегат 1000 кВт·А, 400 В, 50 Гц; ДЭС — аварийная дизель-электрическая станция 200 кВт, 400 В, 50 Гц; Т — силовой трансформатор 1600 кВт·А; КУ — комплектное распределительное устройство КУ БУ 2900/200; ГРШ1, 2 — групповой распределительный шкаф; ФКУ — фильтро-компенсирующее устройство; ШУЛ — шкаф управления лебедкой; ШУР — шкаф управления ротором; ШУН1, 2 — шкафы управления насосом; ШУТ — шкаф управления электромагнитным тормозом; ЭМТ — ферромагнитный электромагнитный тормоз; МЛ — электродвигатель привода лебедки, 560 кВт, 440 В; МР — электродвигатель привода ротора, 160 кВт, 440 В; МН1, 2 — электродвигатель привода насоса, 560 кВт, 440 В

- сокращены габариты, а соответственно и массы комплектных устройств главных электроприводов на 29%;
- сокращены количества и массы кабелей главных электроприводов на 37%.

Соответственно, обеспечено значительное улучшение монтажно-транспортных характеристик оборудования буровых установок в целом.

Тиристорные шкафы и электрические распределительные устройства располагаются в закрытом контейнере с автономной системой вентиляции и обогрева. Контейнерное исполнение устройств управления обеспечивает повышенную заводскую готовность, надежность и монтажеспособность. Электродвигатели постоянного тока также имеют специальную усиленную конструкцию для тяжелых условий эксплуатации.

В пуске и доработке электрооборудования большая роль принадлежит энергетикам ОАО «Сургутнефтегаз». На действующих буровых установках БУ-2900/200 ЭПКБМ полностью выполнены доработки по замечаниям заказчика. В эксплуатацию введено более 20 установок БУ-2900/175 ДЭП и БУ-2900/200 ЭПК БМ.

В настоящее время установки указанных типов следует считать лучшими отечественными установками в данном классе буровых установок.

Электрооборудование установок БУ-3900. В связи с увеличением глубин бурения возникла необходимость повышения мощности главных электроприводов. Однако для принятого в настоящее время уровня напряжения питания 380 В (выпрямленное напряжение постоянного тока 440 В) предельная мощность электродвигателей постоянного тока, выпускаемых российской промышленностью, составляет не более 600 кВт.

Для дальнейшего увеличения мощности приводных электродвигателей потребовался переход на повышенное напряжение питания 660 В (выпрямленное напряжение 800 В). На базе электрооборудования для буровых установок, созданного ранее ОАО «Электропривод» и ОАО «Электросила», был разработан и изготовлен комплект электрооборудования новой установки с питанием от электрической сети БУ-3900/225 ЭПКБМ. Однолинейная схема электрооборудования с питанием главных электроприводов повышенным напряжением показана на рис.2.

Для всех главных механизмов используется унифицированный электродвигатель постоянного тока мощностью 750 кВт, выбор которого произведен на основе тщательного технико-экономического анализа. Повышение напряжения позволило повысить мощность главных электроприводов с сохранением и даже некоторым уменьшением габаритов и массы комплектных устройств, а также количества и массы кабелей.

Несмотря на существенные отличия этой новой установки от установок класса БУ-2900, при ее разработке удалось достигнуть высокой степени унификации схемотехнических решений, а также конструкции устройств управления, что облегчает их освоение электротехническим персоналом заказчиков.

В процессе разработки был использован ряд оригинальных технических решений по отдельным системам и некоторые методы проектирования, позволяющие получить повышенные технические и энергетические характеристики систем электропривода. Основой явилось рациональное использование зоны регулирования скорости от номинальной до макси-

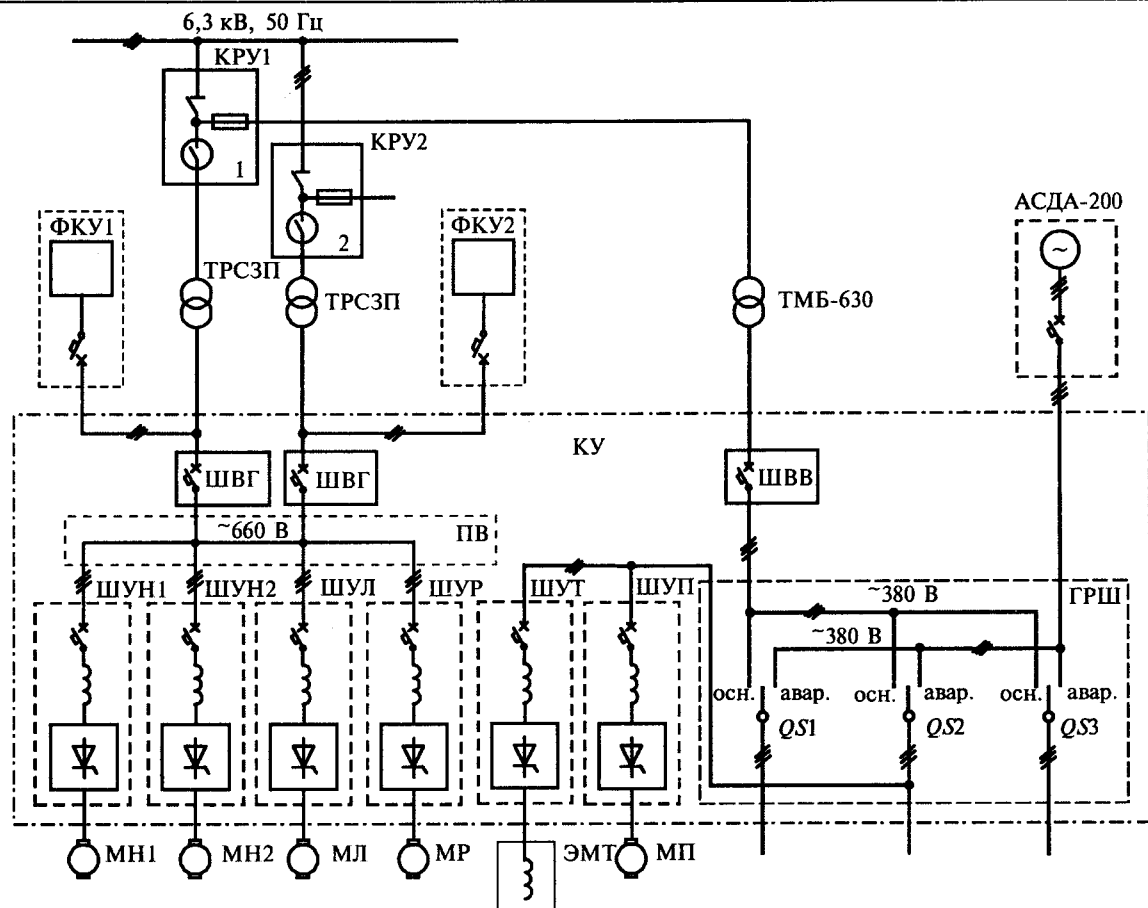


Рис.2. Однолинейная схема электроснабжения буровой установки БУ 3900/225 ЭПК БМ:

КРУ1, 2 — комплектное распределительное устройство КРУЭ-6(10)У2В; АСДА — дизель-электрическая станция для питания вспомогательных приводов АСДА-200, 200 кВт, 400 В, 50 Гц; ФКУ1, 2 — фильтро-компенсирующее устройство; ТРСЗП — силовой трансформатор 1600 кВА, 6/0,69 кВ; ТМБ-630 — силовой трансформатор ТМБ-630, 630 кВА, 6/0,4 кВ; ШВГ1, 2 — шкаф ввода питающего напряжения (главный); ШВВ — шкаф ввода питающего напряжения (вспомогательный); ПВ — панель ввода переменного тока; КУ — комплектное устройство КУ БУ 3900/225; ГРШ — групповой распределительный шкаф; ШУЛ — шкаф управления лебедкой; ШУР — шкаф управления ротором; ШУН1, 2 — шкафы управления насосом; ШУТ — шкаф управления электромагнитным тормозом; ШУП — шкаф управления регулятором подачи долота; ЭМТ — индукционный электромагнитный тормоз; МЛ — электродвигатель привода лебедки, 750 кВт, 800 В; МР — электродвигатель привода ротора, 630 кВт, 800 В; МН1, 2 — электродвигатель привода насоса, 750 кВт, 800 В; МП — электродвигатель привода подачи долота, 65 кВт, 440 В

мальной с помощью уменьшения тока и потока возбуждения электродвигателя при номинальном напряжении на якоре, позволяющее наиболее эффективно использовать энергетические параметры электродвигателя во всех точках его механической характеристики.

В частности, в соответствии со специальными методами расчетов, разработанными ОАО «Электропривод» и ОАО «ВЗБТ», передаточные отношения коробки передач лебедки и характеристики электропривода рассчитаны таким образом, что в общей характеристике лебедки не имеется «провалов», а в точке наибольшей рабочей нагрузки электродвигатель и тиристорный преобразователь работают на своем номинальном напряжении. Аналогичные методы используются также при проектировании приводов буровых насосов и ротора. Правильный выбор указанных параметров чрезвычайно важен для получения наилучших энергетических показателей электропривода и наивысшего КПД, а кроме того позволяет минимизировать массо-габаритные данные фильтро-компенсирующих устройств (на электрических БУ) или обеспечить оптимальные режимы работы дизель-электростанций (на автономных БУ).

Типовая схема, представленная на рис.1, наглядно показывает, что на электрических и дизель-электрических буровых установках может быть использовано одинаковое электрооборудование всех буровых механизмов; различие состоит лишь в том, что в первом случае используются понижающие трансформаторы и соответствующие комплектные распределительные устройства, а во втором — автономные дизель-электростанции.

Проведенными исследованиями доказано, что дизель-электростанции следует выбирать на напряжение 660 В (а не на 6 кВ, как это предлагается некоторыми другими организациями).

Для буровой лебедки применен новый электромагнитный тормоз индукционного типа ТЭИ-710-45, имеющий более высокую теплоотводящую способность, чем применявшийся ранее ферропорошковый тормоз ТЭП-45, и позволяющий соответственно повысить скорость спуска буровой колонны.

На установке применен регулятор подачи долота (РПДЭ) «активного» типа с тиристорным электроприводом постоянного тока, обеспечивающий повышенную точность автоматического поддержания нагрузки на долото.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что принципиальные технические решения электропривода отечественных буровых установок полностью соответствуют зарубежным решениям. Из анализа мирового опыта видно, что стремление к максимальному повышению производительности и качества произведенной продукции приводит к интенсивному внедрению регулируемых электроприводов, компьютерных средств оптимизации и автоматизации, а также информационных и диагностических средств. Помимо традиционных применений регулируемые электроприводы выступают в виде средств регулирования технологических переменных, базы для построения систем локальной автоматики и пр. Развитые современные системы управления регулируемыми приводами позволяют расширять диагностические и информационные системы.

В последние годы непрерывно происходят изменения как в технологическом процессе бурения, так и в применяемом для его реализации оборудовании. Бурение наклонно-направленных и особенно горизонтальных скважин, бурение с отрицательным дифференциальным давлением, использование новых видов гидравлических забойных двигателей, внедрение силовых вертлюгов и др., а также ужесточившиеся требования к защите окружающей среды при ведении буровых работ обусловили значительные изменения технических требований к буровым установкам. Широкие возможности регулируемого электропривода позволяют успешно преодолевать разрыв между непрерывно растущими технологическими потребностями и способностью их реализовать.

Некоторые тенденции дальнейшего развития электроприводов БУ. Существенное повышение технического уровня электропривода обеспечивает переход от аналоговых систем управления к цифровым на микропроцессорной базе. НИОКР в этом направлении активно ведет ОАО «Электропривод», предполагающее опробовать такую систему на одной из новых буровых установок.

Основными направлениями совершенствования бурового электропривода по системе ТП-Д на современном этапе следует считать:

- повышение напряжения питающей сети (до 660 В переменного тока) с соответствующим повышением напряжения электродвигателей постоянного тока (до 800 В);
- применение более совершенных силовых приборов для увеличения единичной мощности в тех же габаритах, а также повышения надежности;
- внедрение систем цифрового управления;
- внедрение информационных систем и систем диагностики;
- повышение уровня локальной автоматизации;
- замена релейных систем бесконтактными системами повышенной надежности.

Некоторые из указанных направлений, как показано в статье, уже реализуются в новых моделях электротехнических комплексов буровых установок, другие являются объектом интенсивных научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок.

Известно, что электропривод по системе ТП-Д обладает низким собственным коэффициентом мощности, что вынуждает применять регулируемые фильтрокомпенсирующие устройства, из-за чего увеличиваются габариты и стоимость системы. Улучшение ка-

чества электроэнергии в питающей сети и компенсация потребляемой реактивной мощности в системе ТП-Д существенно затруднены широким диапазоном изменения коэффициента несинусоидальности (от 0 до 8%) при регулировании скорости электропривода. Поэтому общепризнанной тенденцией совершенствования электроприводов является создание частотно-регулируемых электроприводов переменного тока, которые потенциально имеют весьма значительные преимущества. Для буровых установок эта проблема затрудняется необходимостью специального исполнения сложного электрооборудования относительно большой мощности для тяжелых условий эксплуатации.

Тем не менее, ведущие зарубежные электротехнические фирмы приступили к созданию таких буровых электроприводов. Наряду с широким использованием электроприводов постоянного тока (система ТП-Д), начато производство отдельных узлов и установок в целом с электроприводом переменного тока по системе ПЧ-АД, лидерами в этом направлении являются компании АВВ и «Сименс». Следует констатировать, что за рубежом до настоящего времени не принято однозначного направления в выборе систем электропривода, что объясняется указанными выше причинами. Действительно, с одной стороны, основные механизмы электротехнического комплекса буровой установки предъявляют к статическим характеристикам и динамическим свойствам электроприводов разнообразные требования, определившие еще на начальном этапе развития стремление к использованию самых совершенных из имеющихся в наличии систем. С другой стороны, электроприводы многих нефтепромысловых механизмов работают в исключительно трудных условиях — при изменении в широком диапазоне температуры окружающей среды, в запыленной (а иногда и взрывоопасной) среде, при питании от слабых нефтепромысловых сетей, в удаленных от базы полевых условиях без постоянного квалифицированного технического ухода.

ОАО «Электропривод» ведет в данном направлении научно-исследовательские работы и эскизные проработки, а также отработывает организационные формы сотрудничества с известными иностранными фирмами в части наиболее сложных «активных» электротехнических компонентов — силовых тиристорных и транзисторных модулей и микропроцессорных систем. Таким образом, применение частотного электропривода для главных механизмов буровых установок является вопросом ближайшего будущего.

Для сравнительно небольших мощностей (до 50 кВт) частотный электропривод общепромышленного исполнения уже широко используется. Так, ОАО «Электропривод» уже внедрено более 1000 комплектов в городском коммунальном хозяйстве (в основном для насосов и вентиляторов). На этом основании предлагается в экспериментальном порядке опробовать частотные электроприводы на нескольких вспомогательных буровых механизмах. Наибольшей готовностью для использования регулируемых электроприводов переменного тока на наземных установках отличаются такие вспомогательные механизмы, как подпорные насосы, регулятор подачи долота, вспомогательная лебедка, механизмы АСП. Что касается устройств плавного пуска электроприводов переменного тока, то они могут быть уже сейчас рекомендованы практически для всех вспомогательных механизмов.

Изменение энергетической политики в России на современном этапе обуславливает все большую целесообразность автономного энергоснабжения многих производственных механизмов и, в первую очередь, буровых установок не только в разведочном, но в некоторых случаях и в эксплуатационном бурении.

Переход к автономному энергоснабжению позволяет:

- исключить зависимость освоения нефте- и газоперспективных регионов от наличия разветвленной энергосистемы;
- решить проблему энергоснабжения удаленных от базы буровых установок (проблема “слабых сетей”);
- решить проблему повышения установленной мощности главных и вспомогательных приводов на буровых установках в соответствии с требованиями совершенствующейся технологии бурения (в настоящее время существующие сети ограничивают возможности модернизации электроприводов, установок дополнительного энергоемкого оборудования типа силовых вертлюгов, дополнительных буровых насосов и т.п.);
- исключить зависимость себестоимости продукции от постоянно растущих тарифов на электроэнергию; наладить использование местных энергетических ресурсов;
- обеспечить расширенное применение регулируемых электроприводов, а соответственно, и повышение производительности буровых установок, оптимизацию их работы, совершенствование технологических процессов.

Перечисленные особенности объясняют тенденции, проявившиеся в расширении номенклатуры и объемов производства буровых установок с дизель-электрическим приводом.

Состав оборудования на буровой установке складывался десятилетиями, тем не менее именно в последние годы на установках появляются новые механизмы, оснащенные электроприводом. Наибольший интерес представляет верхний привод бурильной колонны (силовой вертлюг) на основе электродвигателя вертикального исполнения, получивший широкое распространение. В настоящее время силовые вертлюги осваиваются отечественными предприятиями.

Размещение силового вертлюга в пространстве буровой вышки осложняет использование традиционных систем свинчивания, развинчивания и расстановки бурильных труб с расположением механизмов на уровне полатей. Следует приступить к созданию отечественных манипуляторов для работы с бурильными трубами при наличии верхнего привода.

Регулируемый электропривод, и, особенно, электропривод с цифровыми системами управления на микропроцессорной базе, предоставляет широкие возможности для качественного совершенствования систем управления, реализации ими новых функций. Отметим наиболее интересные системы, реализуемые зарубежными компаниями:

- регулятор подачи с цифровым управлением, обладающий высокой точностью поддержания заданных параметров; регулятор может быть настроен на поддержание заданных значений нагрузки на долото, механической скорости бурения или перепада давления на забое (последнее — при использовании гидравлических забойных двигателей);
- система плавного управления крутящим моментом, устраняющая вибрацию бурильной колонны;
- система управления скоростью перемещения и положением талевого блока в пределах безопасных значений;
- синхронизатор буровых насосов, обеспечивающий снижение пульсации давления в нагнетательном манифольде и увеличение срока службы узлов циркуляционной системы;
- регулятор возврата бурильной трубы в исходное положение при роторном бурении.

Все перечисленные узлы характеризуются наличием информационных систем с повышенной точностью измерения параметров, предупредительной аварийной сигнализацией, использованием сенсорных дисплеев для ввода параметров и уставок.

Автономное энергоснабжение буровых установок позволяет достаточно просто осуществить соответствующее увеличение мощности силового блока за счет установки дополнительных дизель-электрических агрегатов. Системы управления агрегатами рассчитаны на повышение мощности (универсальные шкафы управления допускают перенастройку на увеличенную мощность силового блока только за счет изменения уставок). Разумеется, при централизованном энергоснабжении, когда приходится учитывать мощность и протяженность сетей, осуществлять модернизацию действующих установок с увеличением мощности весьма сложно.

Переход к регулируемому электроприводу создал предпосылки для развития систем автоматического управления и оптимизации технологических процессов, что не замедлило сказаться на реализации таких систем, в первую очередь, в виде систем локальной автоматики. Переход к цифровому управлению позволяет оснастить буровые установки развитыми информационно-измерительными системами и системами диагностирования, а систему планово-предупредительных ремонтов переориентировать на прогностическое обслуживание, позволяющее предупреждать возникновение отказов за счет своевременных профилактических мер.

Известно, что разведанные запасы нефти и газа в последние годы снижаются, однако это не может продолжаться до бесконечности. В ближайший период следует ожидать роста объемов бурения и повышения спроса на буровые установки, а электротехнические предприятия должны быть готовы обеспечить новые буровые современными системами электропривода.

К вопросу применения быстроходных частотно-регулируемых электроприводов для турбокомпрессоров магистральных газопроводов

ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., КУЗНЕЦОВ И.С., РОГОВОЙ В.И., ШНЫРЕНКОВ А.А.,
ПАВЛОВ В.И., ПАВЕЛКА И., ПАВЕЛКА П.

Рассмотрены некоторые аспекты применения различных вариантов приводов для быстроходных турбокомпрессоров магистральных газопроводов. Приведены основные параметры частотно-регулируемых электроприводов по схеме вентильного двигателя мощностью 25МВт, 3700 об/мин, введенных в эксплуатацию на Путьтинской компрессорной станции. Рассмотрены вопросы повышения надежности этих электроприводов. Приведена функциональная схема синхронного электропривода по схеме вентильного двигателя. Описана работа микропроцессорных систем регулирования, управления и защиты электропривода, предназначенных для модернизации электроприводов.

Режимы работы турбокомпрессоров (ТК) компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов являются переменными, что, в основном, обусловлено суточной неравномерностью газоподдачи, увеличением газоподдачи при изменении температуры окружающего воздуха, сезонными изменениями газоподдачи, подключением дополнительных потребителей и др. Известно, что неравномерность газопередачи может колебаться в пределах от 75 до 100% от номинальной производительности газопровода. Для регулирования производительности КС применяют дросселирование газа на выходе ТК, пропуск газа по байпасу, используют направляющие аппараты, закручивающие поток газа на входе в ТК, или изменяют частоту вращения ТК.

Естественно, в случае неопределенности параметров этих условий выбрать однозначно наиболее рациональный вариант привода для ТК невозможно. Помимо перечисленных условий на выбор оптимального варианта привода существенное влияние оказывают следующие показатели:

- стоимость электроэнергии, отпускаемой с шин электроэнергетической системы;
- стоимость газа;
- КПД газовой турбины и изменения его при изменении частоты вращения;
- КПД частотно-регулируемого электропривода и изменения его при изменении частоты вращения;
- КПД электропередачи от шин электроэнергетической системы до КС.

К тому же ТК являются быстроходными рабочими механизмами, частота вращения которых превышает 3000 об/мин, что также оказывает существенное влияние на выбор предпочтительного варианта привода компрессоров.

Поэтому задача выбора оптимального варианта привода ТК в каждом конкретном случае является многокритериальной задачей принятия решений с векторным критерием эффективности, компоненты которого являются скалярами и имеют различные единицы измерения.

Дискуссии о выборе оптимального варианта привода ТК длятся уже не одно десятилетие, однако, по нашему мнению, однозначного решения эта задача не может иметь. Это обусловлено влиянием научно-технического прогресса в машиностроительной, электротехнической и электронной отраслях промышлен-

ности на показатели, входящие в векторный критерий эффективности, т.е. в конце концов, принятие решения об оптимальности того или иного типа привода в каждом конкретном применении зависит от этапа научно-технического прогресса в соответствующих отраслях промышленности.

В последние 10—15 лет в качестве опорных вариантов при выборе типа привода ТК рассматриваются три типа приводов:

- газотурбинный привод;
- частотно-регулируемый электропривод с быстроходным электродвигателем (ЭД) переменного тока;
- частотно-регулируемый электропривод на основе электродвигателя с частотой вращения не выше 3000 об/мин и повышающим редуктором.

Ведущие электротехнические фирмы используют три типа быстроходных частотно-регулируемых электроприводов переменного тока для нагнетателей магистральных газопроводов [1]:

1. Частотно-регулируемый электропривод с преобразователем частоты (ПЧ) на основе автономного инвертора тока (АИТ) и с быстроходным асинхронным двигателем (АД).
2. Частотно-регулируемый электропривод с преобразователем частоты на основе автономного инвертора напряжения (АИН) и с быстроходным асинхронным двигателем.
3. Частотно-регулируемый электропривод по схеме "вентильного двигателя" с быстроходным синхронным двигателем (СД).

В табл.1 приведены данные о некоторых основных показателях эффективности указанных вариантов приводов, причем для определенности в качестве первых двух электроприводов рассматривались электроприводы по схеме вентильного двигателя.

В последние 10—20 лет задача выбора приемлемого частотно-регулируемого электропривода при сравнении вариантов формулируется следующим образом: вариант выбирается из условия максимального критерия эффективности при минимальных капитальных затратах и минимальном сроке окупаемости, причем срок окупаемости переведен в разряд ограничения. В настоящее время такой подход начал тормозить дальнейший прогресс в развитии подсистем электропривода, а значит, и всего электропривода. Например, улучшение качества материалов, из которых изготавливается электродвигатель, улучшает его статические

Показатель эффективности	Тип электропривода		Газотурбинный привод	Примечание
	С быстроходным ЭД	ЭД с редуктором		
Условия энерго-снабжения	Имеет большое преимущество в тех местах, где можно получать дешевую электроэнергию от АЭС, ГЭС или ТЭЦ		Имеет преимущество в местах, где существует дефицит электроэнергии, т.е. в местах добычи и переработки газа	
Категория электроприемников	Относится к электроприемникам, для которых необходимо принятие специальных мер с целью обеспечения электроэнергией от двух независимых взаиморезервирующих источников питания		Практически исключается необходимость в подаче электроэнергии, благодаря использованию газа, транспортируемого по магистральному газопроводу	
КПД по использованию энергоресурсов	Общий КПД, включая электростанцию, систему передачи и преобразования электроэнергии, равен 36–37%	Потери в редукторе снижают общий КПД электропривода примерно на 2% по сравнению с электроприводом на основе быстроходного электродвигателя	КПД равен 26–28% (КПД порядка 32% имеют турбины самолетов)	Общий КПД по использованию энергоресурсов для электропривода с быстроходным электродвигателем примерно на 30% выше, чем для газотурбинного привода
Расход транспортируемого газа	Отсутствует, что позволяет беречь полезный и ценный природный продукт		Расходуется в качестве топлива газ, транспортируемый по магистральному газопроводу, что приводит к необходимости использования дополнительных ГПА для подачи заданного количества газа потребителю	
Первоначальная стоимость	—	100%	145%	Экспертная оценка
Показатели надежности	Средняя наработка на отказ 25–27 тыс. ч	Средняя наработка на отказ 25–27 тыс. ч без учета редуктора	Из-за относительно низкой надежности по сравнению с электроприводом может быть необходимо предусмотреть большее число резервных ГПА	По экспертным оценкам интенсивность отказов газовой турбины примерно в 2,2 раза выше, чем электропривода
Срок службы привода	15–20 лет	15–20 лет без учета редуктора	10 лет	Меньший срок службы газотурбинного привода обусловлен воздействием на последний высоких температур и высокой частоты вращения
Затраты на техобслуживание и текущий ремонт	Газотурбинный привод требует существенно больших затрат на техобслуживание и ремонт по сравнению с электроприводом из-за необходимости частой смены ухудшенных или разрушенных двигателей. Например, камера сгорания должна сменяться как минимум раз в году			По экспертным оценкам затраты до капитального ремонта газовых турбин примерно в 10 раз больше, чем для электроприводов
Трудоемкость в эксплуатации	Количество эксплуатационного персонала при использовании электроприводов примерно на 25% меньше, чем аналогичного персонала при использовании газовых турбин			Экспертная оценка

и динамические характеристики, в том числе и КПД. Однако при этом возрастает стоимость электродвигателя и при существующем подходе к выбору варианта электропривода вариант электропривода с таким двигателем будет отвергнут по показателям "капитальные затраты" и "срок окупаемости". Эта же ситуация возникает и при совершенствовании другого силового оборудования электропривода (ПЧ, силовой трансформатор, дроссели). Для определенности рассмотрим случай улучшения КПД электропривода. Один из возможных путей решения возникшей проблемы — введение дополнительного специального показателя в критерий

эффективности. Значение специального показателя может быть связано со стоимостью 1 кВт потерь в электроприводе в течение срока службы [3]. Для заказчика эта стоимость составляет от 2500 до 4000 дол. США (цифра нижней части диапазона по данным фирмы «Siemens»), цифры, относящиеся к верхней части диапазона, по данным некоторых фирм США и Англии). Впрочем, если рассматривается этот специальный показатель, то он может быть каким-то образом учтен и в стоимости электропривода. Однако его введение требует проведения крупномасштабных организационно-технических мероприятий, связанных с раз-

работкой и согласованием нормативных документов по выполнению изготовителями электроприводов соответствующих замеров или расчетов с заданной точностью, по изготовлению и сертификации специального оборудования и т.д. Очевидно, выполнение этой работы под силу только международным организациям типа МЭК. Изложенное является попыткой привлечь внимание читателей — поставщиков и заказчиков электроприводов к решению возникшей проблемы. Тем более, что анализ накопленного 15—20-летнего опыта эксплуатации мощных высоковольтных электроприводов по схеме вентильного двигателя показывает, что основными затратами являются затраты на потребляемую электроэнергию, а расходы на покупку, ввод в эксплуатацию, техническое обслуживание и ППР частотно-регулируемого электропривода составляют незначительную часть расходов последнего этапа жизненного цикла электропривода (эксплуатация электропривода в составе системы ТК — трубопровод). Например, на рис.1 представлено по данным АВВ типичное распределение затрат на мощный высоковольтный электропривод по схеме вентильного двигателя в процессе эксплуатации.

В настоящее время нет общепринятой методики, позволяющей оценить предпочтительность и экономичность того или иного варианта привода быстроходного ТК. Наиболее часто используют одну из двух методик. Одна из них основана на использовании КПД газовой турбины и электропривода в качестве параметров, а переменными являются стоимости газа и электроэнергии. Применительно к частотно-регулируемому электроприводу такой подход имеет определенные основания, исходя из анализа распределения затрат, приведенного на рис.1. На рис.2 приведена типичная кривая, разделяющая плоскость в координатах стоимость электроэнергии и газа на две зоны: зона предпочтительного применения газовых турбин с определенным КПД и зона предпочтительного применения электроприводов с определенным КПД в зависимости от соотношения стоимостей газа и электроэнергии (данные фирмы «Mitsubishi Heavy Industries»). Множество таких кривых определяется множеством сочетаний КПД газовой турбины и электропривода. Нахождение точки на кривой означает, что по показателям стоимости электроэнергии и газа варианты использования электропривода и газовой



Рис.1. Типичное распределение затрат на мощный высоковольтный электропривод по схеме вентильного двигателя в процессе эксплуатации

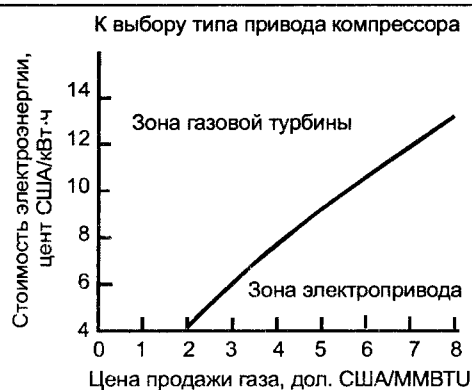


Рис.2. Области предпочтительного использования газовых турбин и электроприводов для турбокомпрессоров (аббревиатура ВТУ по оси абсцисс означает «британская единица теплоты» (1 ВТУ = 1,055 кДж))

турбины для привода компрессора равнозначны и для принятия решения о выборе предпочтительного варианта следует использовать другие показатели. Вторая методика основана на оценке приведенных расчетных затрат, т.е. с учетом первоначальных капиталовложений, текущих затрат и срока службы привода. Годовые затраты, отнесенные к единице мощности, на техническое обслуживание и планово-предупредительные ремонты (ППР) для приводов компрессоров мощностью порядка 16—20 МВт с газовой турбиной составляют 30—40 дол. США/л.с., а для аналогичных компрессоров с электроприводом 710 дол. США/л.с. Данные относятся к рынку и условиям эксплуатации в США и были представлены нам специалистами фирмы АВВ. Следует отметить, что в настоящее время абсолютные значения вышеприведенных годовых затрат на техническое обслуживание и ППР в России будут ниже из-за существенного различия в оплате труда эксплуатационного персонала России и США, однако в относительных единицах это различие сохранится, т.е. годовые затраты на техническое обслуживание и ППР быстроходного электропривода переменного тока компрессора примерно в 4 раза меньше, чем аналогичные затраты на привод компрессора с газовой турбиной. Экономичность того или иного варианта привода быстроходного компрессора должна оцениваться с учетом первоначальных капиталовложений и текущих затрат. Капиталовложения в частотно-регулируемый быстроходный электропривод и связанное с ним электрооборудование и запчасти, как правило, ниже, чем капиталовложения в привод с газовой турбиной и связанное с ней оборудование и запчасти. Однако для упрощения получения экономических оценок сделаем предположение, что капиталовложения равны. Тогда с учетом данных табл.1, приведенных данных о годовых затратах на техобслуживание и ППР и сделанного предположения о капиталовложениях качественная оценка значения отношения приведенных годовых расчетных затрат при использовании для компрессора привода с газовой турбиной и быстроходного регулируемого электропривода может быть получена из следующего выражения:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\frac{K_1}{T_1} + C_1}{\frac{K_2}{T_2} + C_2} = (1,5 \div 2,0) \left[1 + \frac{(20 \div 25) C_2}{K_2 + (15 \div 20) C_2} \right], \quad (1)$$

где Z_1 , K_1 , C_1 и T_1 — соответственно приведенные годовые затраты, первоначальная стоимость, годовые эксплуатационные расходы и срок службы привода с газовой турбиной для компрессора; Z_2 , K_2 , C_2 и T_2 — соответственно приведенные годовые затраты, первоначальная стоимость, годовые эксплуатационные расходы и срок службы регулируемого электропривода компрессора.

Как видно из выражения (1), приведенные годовые расчетные затраты на привод с газовой турбиной как минимум в 1,5–2 раза выше, чем аналогичные затраты на регулируемый электропривод компрессора. Рассмотренные методики пока несколько далеки от методики, основанной на сравнении векторных критериев эффективности, при которой каждый вариант привода оценивается своим векторным критерием, включающим в себя определенный набор показателей со своими весовыми коэффициентами, а затем сравниваются полученные векторные критерии разных вариантов приводов. Однако они являются определенным шагом к выработке такой методики [4].

В некоторых применениях, несмотря на полученную оценку соотношения приведенных годовых расчетных затрат, газовые турбины для привода ТК имеют определенное преимущество перед быстроходным электроприводом, что связано с ограничениями на максимальную номинальную мощность быстроходных электродвигателей в зависимости от скорости. На рис.3 приведены предельные кривые зависимости максимальных номинальных мощностей электродвигателей производства фирмы «Siemens» [3] от частоты вращения. Кривые 1 и 2 относятся к электроприводам, выполненным по схеме вентильного двигателя с СД с шихтованными роторами (кривая 1) и с массивными обмотанными роторами (кривая 2), оба исполнения с воздушным охлаждением. Кривая 3 относится к АД с массивными обмотанными роторами. Аналогичные кривые у различных фирм несколько отличаются друг от друга. Различия в основном определяются следующими факторами: принятой конструкцией основных узлов двигателей; используемыми материалами и возможностями технологии изготовления (особенно ротора); типом и конструкцией подшипниковых узлов; принятой системой возбуждения и некоторыми другими особенностями.

Ограничения обусловлены в основном большими механическими нагрузками, которые несут роторы быстроходных электродвигателей. Ввиду больших центробежных сил, действующих на ротор, его диаметр ограничивают при заданной номинальной частоте вращения до такого значения, чтобы окружная скорость не превышала 270–300 м/с. Вибрации ротора, связанные с критическими скоростями, обуславливают ограничения на выбор длины ротора при заданной частоте вращения. Известно, что при принятой системе охлаждения ротора электрическая мощность, которая может быть преобразована в механическую мощность двигателем, прямо пропорциональна объему ротора, т.е. прямо пропорциональна произведению диаметра и длины ротора. При увеличении номинальной частоты вращения двигателя с учетом этого ограничения на значение окружной скорости приходится уменьшать диаметр ротора, что в свою очередь приводит к увеличению вибраций и, как следствие, к необходимости уменьшения длины ротора, т.е. объем ротора уменьшается по нелинейной

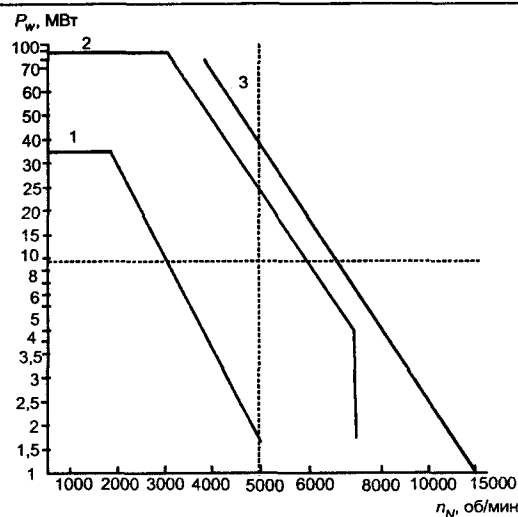


Рис.3. Предельные зависимости номинальных мощностей электродвигателей производства фирмы «Siemens» от частоты вращения:

1 — синхронные двигатели с шихтованным ротором; 2 — синхронные двигатели с массивным обмотанным ротором; 3 — асинхронные двигатели с массивным обмотанным ротором

зависимости от номинальной частоты вращения двигателя. Механическая конструкция роторов выполняется таким образом, чтобы в регулируемом быстроходном электроприводе первая критическая скорость лежала ниже 40–70% номинальной скорости, а вторая критическая скорость была на 20–25% выше номинальной скорости. Регулятор скорости электропривода должен предотвращать любую длительную работу при пуске на первой критической скорости.

Показатель «удельная стоимость, руб/кВт (дол. США/кВт)» быстроходных СД особенно при приближении к граничной кривой 2 существенно выше, чем аналогичный показатель для СД с турборотором или с явно выраженными полюсами с частотой вращения до 3000 об/мин, что обусловлено в основном следующими факторами:

- повышенными затратами при разработке и производстве;
- роторы изготавливаются из поковок специальной высококачественной легированной стали с высоким пределом текучести и достаточно высокими уровнями пластичности и вязкости;
- отношение массы активных материалов, которые реально участвуют в формировании электромагнитного момента двигателя, к полной массе материалов, которые используются при конструировании быстроходного двигателя, существенно меньше, чем у электродвигателей с частотой вращения до 3000 об/мин.

Это приводит к повышению показателя «удельная стоимость руб/кВт (дол.США/кВт)» быстроходных электроприводов в целом.

Таким образом, часть плоскости на рис.3, ограниченная кривой 2 и осями абсцисс и ординат, а также прямой 3 и теми же осями является областью применения для ТК быстроходных частотно-регулируемых электроприводов, а часть плоскости, расположенная вне указанных областей и ограниченная осями абсцисс и ординат, является областью предпочтительного применения для ТК газовых турбин.

В 1985–1989 гг. ЧКД «Электротехника» осуществил ряд поставок быстроходных электроприводов по

схеме вентильного двигателя мощностью 25 МВт для ТК магистральных газопроводов. В табл.2 приведены данные об этих поставках.

Таблица 2

Место назначения	Государство	Напряжение сети, кВ	Число, шт.	Год поставки
КС «Капушаны»	Словакия	110	3	1985/1986
КС «Барская»	Украина	110	3	1987
КС «Богородчанская»	Украина	110	3	1987
КС «Яблонь»	Словакия	110	3	1988
КС «Павелецкая»	Россия	220	3	1988
КС «Путятинская»	Россия	220	3	1988
КС «В.Зливце»	Словакия	110	3	1989

Как видно из табл.2, на каждой станции установлено по три электропривода (два рабочих и один резервный). Далее рассмотрение ведется применительно к КС-26 Путятинского УМГ.

Электропривод 25 МВт предназначен для привода газового компрессора ЭПГА-25, с которым соединен с помощью зубчатой муфты с торсионом.

На рис.4 приведена структурная схема частотно-регулируемого синхронного электропривода компрессора в однолинейном изображении. Синхронный электропривод выполнен по схеме вентильного двигателя на основе преобразователя частоты со звеном постоянного тока. Преобразователь частоты в данном электроприводе состоит из двух идентичных модулей, каждый из которых по входу подключен к соответствующей трехфазной вентильной обмотке преобразователь-

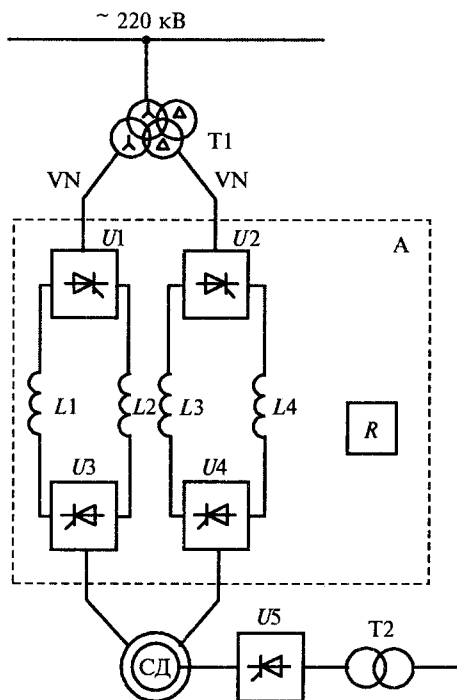


Рис.4. Структурная схема электропривода по схеме вентильного двигателя мощностью 25 МВт, 3700 об/мин:

A — преобразователь частоты электропривода; R — система управления, регулирования и защиты электропривода; T1 — входной трансформатор электропривода; U1—U4 — трехфазные мостовые тиристорные преобразователи; L1—L4 — сглаживающие дроссели преобразователя частоты; СД — синхронный двигатель; T2, U5 — соответственно трансформатор и выпрямитель системы возбуждения

ного трансформатора T1, а по выходу к соответствующей трехфазной статорной обмотке синхронного двигателя СД. Каждый модуль выполнен из двух трехфазных тиристорных мостов соответственно U1 (U2) и U3 (U4). Два трехфазных моста в модуле U1 (U2) и U3 (U4) соединены друг с другом по постоянному току через два реактора L1, L2 (L3, L4), включенные в оба полюса. Использование трансформатора T1 на рис.4 с двумя трехфазными вентильными обмотками, одна из которых соединена в звезду, а другая — в треугольник и к которым подключены соответственно трехфазные тиристорные мостовые выпрямители U1 (U2), позволило выполнить электропривод относительно питающей сети по эквивалентной двенадцатипульсовой схеме. Тем не менее, для решения проблемы электромагнитной совместимости электропривода с питающей энергосистемой пришлось использовать ФКУ. Трехфазное ФКУ с фильтрами 5, 7, 13 и 20-й гармоник подключено к третьей вторичной обмотке трансформатора T1. Компенсирующая мощность ФКУ равна 12000 квар.

В номинальном режиме электропривод обеспечивает следующие выходные параметры [5]:

Номинальная мощность, кВт 25000
 Номинальная частота вращения, об/мин 3700
 Номинальный момент, Н·м 64599
 Привод позволяет регулировать частоту вращения в рабочем и регулируемом диапазоне, об/мин 2600—3900

Номинальные выходные параметры и допустимая перегрузка гарантируется при соблюдении следующих входных параметров:

Напряжение питающей сети, кВ 220±10%
 Частота сети, Гц 50±1
 Температура окружающей среды наружной, °С 35(max)
 Температура окружающей среды внутр., °С 40(max)
 Температура хладагента (антифриза) для охлаждения двигателя, °С 45(max)
 Температура охлаждающего трансформаторного масла для охлаждения преобразователей, °С 50(max)

При номинальной нагрузке электропривод работает с коэффициентом мощности 0,85 (без компенсации) и с КПД не менее 0,935, потребляет из сети 220 кВ, эффективный ток не более 90 А. При подключении фильтрокомпенсирующего устройства с компенсирующей мощностью 12000 квар и соответствующей нагрузке электропривод работает в диапазоне рабочих частот вращения 3300—3900 об/мин с коэффициентом мощности не менее 0,98 и в диапазоне рабочих частот вращения 2600—3300 об/мин с коэффициентом мощности не менее 0,94. При этом КПД составляет не менее 0,935.

Электропривод также:

- поддерживает заданную частоту вращения двигателя без учета нагрузки с точностью не менее ±2% без корректировки от вышестоящей системы;
- разгоняется с нагрузкой автоматически от нулевого до минимальной рабочей частоты вращения 2600 об/мин с током, меньшим, чем номинальное значение;

— при номинальном токе в сеть 220 кВ без фильтранно-компенсирующего устройства электропривод генерирует следующие токи высших гармонических:

- 1 гармоническая < 85 А;
- 5 гармоническая < 3,4 А;
- 7 гармоническая < 2,5 А;
- 11 гармоническая < 7,6 А;
- 13 гармоническая < 6,8 А;
- 17 гармоническая < 1 А;
- 19 гармоническая < 1 А;
- 23 гармоническая < 3,7 А;
- 25 гармоническая < 3,5 А.

Трехфазный выпрямительный четырехобмоточный трансформатор *Т1* с масляным охлаждением специального исполнения предназначен для наружной установки. Трансформатор был спроектирован с учетом его специального применения для мощного электропривода по схеме вентильного двигателя.

Основные технические данные входного четырехобмоточного трансформатора

Номинальная мощность, кВ·А	40000/20000/20000/20000
Номинальное напряжение, кВ	220±8×1,3%/2×10,5/10,5
Номинальная частота, Гц	50
Схема и группа соединений обмоток	YN _y O _d I _y O
Общие потери, кВт	270+10% допуска
Напряжение КЗ (отнесено к мощности 20 МВ·А)	ОВН-ВН 10,5кВ=14%±15%допуска
	ОВН-ВН 10,5кВ=5%±15%допуска (для компенсационной обмотки)
Габаритные размеры (без расширительного бака), мм	7410×5300×7330
Общая масса (с маслом), кг	122000

В трансформатор вмонтированы два трехфазных переключателя ответвлений с 19 ступенями. Оба переключателя механически сопряжены и управляются одним приводным двигателем.

Силовая часть преобразователя частоты состоит из четырех преобразовательных агрегатов *U1—U4*, каждый из которых выполнен по трехфазной мостовой схеме. Каждое плечо моста содержит 14 последовательно включенных тиристоров, равномерное распределение обратного и прямого напряжений при последовательном соединении тиристоров обеспечивается *R*- и *RC*-цепочками, которые шунтируют каждый тиристор. Сигнал на включение тиристора и о его состоянии подается на высокий потенциал и с высокого на низкий потенциал с помощью оптоволоконных линий. Питание устройств управления тиристоров на высоком потенциале осуществляется напряжением, снимаемым с цепи анод-катод тиристоров в непроходящую часть периода.

Основные технические данные преобразовательного агрегата U1 (U2—U4)

Номинальное питающее напряжение, кВ	3×10,5
Частота питающего напряжения, Гц:	
от трансформатора	50±2%
от двигателя	0—65
Номинальный переменный ток, А	3×1000
Номинальный постоянный ток, А	1224
Охлаждение	Масляное, прямое
Температура масла на входе, °С	Не более 50

Температура окружающей среды, °С	+5+40
Рабочая среда	Закрытое отопляемое и проветриваемое пространство без опасности взрыва
Степень защиты	IP00
Габаритные размеры, мм	3400×1200×2800
Масса, кг	2000

Дроссели *L1—L4* однофазные, без железного сердечника, с естественным воздушным охлаждением. Сконструированы для специального использования в звене постоянного тока электропривода по схеме вентильного двигателя.

Основные технические данные дросселя

Номинальный ток, А	1200
Индуктивность, мГн	20
Напряжение пробоя изоляции, кВ	12 (10,5)
Класс изоляции	F
Устойчивость против КЗ, А	12000
Масса, кг	3000

Синхронный двигатель горизонтального цельносварного исполнения. Несущий намотанный статорный пакет представляет собой одно отдельное съемное целое. Ротор установлен в двух отдельных стойках подшипников скольжения.

Основные технические данные СД

Номинальная мощность, кВт	25000
Номинальное напряжение, В	2×10000 (линейное одной системы)
Номинальная частота, Гц	61,7
Номинальная частота вращения, об/мин	3700
Номинальный коэффициент мощности опережающий	0,85
Номинальный КПД	0,963
Номинальный ток фазы статора, А	
первая гармоника	876
эффективное значение	925
Схема статорной обмотки	Двойная звезда со сдвигом друг относительно друга на 30°

Номинальный ток возбуждения, А	418
Номинальное напряжение возбуждения, В	215
Ток возбуждения холостого хода, А	232
Напряжение возбуждения холостого хода, В	75
Класс изоляции	F
Исполнение по способу установки	IM7213
Степень защиты	IP44
Охлаждение двигателя	ICW37A71
Габаритные размеры, мм	
длина	7215
ширина	3965
высота	4100
Общая масса двигателя, кг	84000
Момент инерции турборотора <i>J</i> , кг·м ²	750
Критические скорости турборотора, об/мин:	
первая критическая скорость	1900
вторая критическая скорость	5500
Системы управления, регулирования и защиты электропривода по схеме вентильного двигателя мощностью 25 МВт (на рис.4 обозначены блоком <i>R</i>) выполнены на аналоговых средствах с использованием элементной базы середины 80-х годов.	

Система автоматизированного управления КС-26 с тремя электроприводами мощностью 25 МВт выполнена с использованием комплекса МАРК, разработанного предприятием ЧКД «Полуводичи» в середине 80-х годов. Основой элементной базы комплекса МАРК являются микропроцессоры первого поколения типа ZILOG-80. В настоящее время комплекс МАРК не производится.

В настоящее время накоплен богатый уникальный опыт эксплуатации. Сформирован высококвалифицированный опытный стабильный эксплуатационный персонал, который поддерживает в рабочем состоянии КС-26, при котором значения всех параметров, характеризующих способность станции выполнять заданные функции, в основном соответствуют требованиям нормативнотехнической документации. Тем не менее, в настоящее время по экспертным оценкам остаточный ресурс электроприводов, т.е. от настоящего времени до перехода в предельное состояние, когда дальнейшая эксплуатация электроприводов и восстановление их работоспособного состояния нецелесообразны, составляет 4—5 лет. Системами, определяющими вышеуказанный остаточный срок службы электропривода, по экспертным оценкам являются системы управления, регулирования и защиты электроприводов, а также системы автоматизированного управления КС, которые выполнены на морально устаревшей элементной базе и оборудовании. Более того, опыт эксплуатации показал, что качество информации, в том числе и в части информативности о внутренних состояниях частотно-регулируемых электроприводов, которое представляется дежурному персоналу КС-26 при возникновении нештатных и аварийных ситуаций, не вполне достаточно для выполнения однозначных и адекватных действий по восстановлению работоспособного состояния электрооборудования в течение нормативного времени восстановления.

Учитывая изложенное, заказчик принял решение о необходимости модернизации оборудования станции. В объем модернизации входят системы управления, регулирования и защиты частотно-регулируемых электроприводов, выполненных на аналоговых элементах; системы автоматизированного управления КС-26, выполненные на базе комплекса МАРК; системы электроснабжения собственных нужд и некоторые датчики электрических величин. Цель модернизации:

1. Полностью обновить оборудование, т.е. увеличить срок морального и физического износа оборудования систем. Оборудование выбирается таким образом, чтобы в ближайшие 10 лет после модернизации проблемы ремонта не возникали, в том числе за счет повышения надежности и помехоустойчивости.

2. Усовершенствовать программную обработку нештатных и аварийных ситуаций, в том числе добавить получение «посмертной маски» и возможность ее анализа при отказах систем.

3. Улучшить эргономику отображения информации для дежурного персонала и увеличить возможности по сбору данных и диагностике работы частотно-регулируемых электроприводов, что существенно облегчит обслуживание систем.

4. Создать возможность сопряжения системы управления КС с системами верхнего уровня (с центром управления газопроводом).

При модернизации существующая система управ-

ления, регулирования и защиты каждого частотно-регулируемого электропривода заменяется системой типа EMADYN, которая выполнена на базе микропроцессорного набора INTEL 196. В системе реализовано прямое цифровое регулирование. Преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму выполняется непосредственно в микропроцессоре, который содержит преобразователь аналог-код (АЦП).

Новая система обеспечивает все функции, которые имела прежняя аналоговая система и, кроме того, позволяет оптимизировать переходные характеристики электропривода и эксплуатировать электропривод при кратковременном отключении синхронизации регулятора, имеет функции памяти «постморт» с графическим выводом на печатающее устройство и/или монитор подсоединенного компьютера. Микропроцессорный регулятор позволяет реализовать альтернативное управление электроприводом с помощью компьютера верхнего уровня по последовательному интерфейсу RS485. При модернизации сохраняется идеология управления электроприводом и эксплуатация систем для обслуживающего персонала.

При модернизации систему автоматизированного управления КС планируется сделать двухуровневой. На нижнем уровне осуществляется сбор данных и локальное управление в каждой из подсистем. Таких подсистем пять: три на каждый из газоперекачивающих агрегатов, одна для управления общестанционным трубопроводным хозяйством и еще одна для управления энергетическим хозяйством. Подсистемы локального уровня должны быть выполнены на программируемых контроллерах GE — Fanuc Automation. Каждая из подсистем имеет местный пульт управления с жидкокристаллическим дисплеем и клавиатурой, с которой можно контролировать состояние технологического оборудования и при необходимости управлять данным агрегатом в ручном режиме.

При такой модернизации полностью сохраняется география расположения электронного оборудования, что существенно экономит средства и сокращает сроки модернизации. Для размещения нового периферийного оборудования используются имеющиеся блок-боксы. Их расположение и подходящие к ним соединительные кабели остаются практически без изменений. Дополнительно лишь должна быть проложена оптоволоконная линия связи сопряжения контроллеров с верхним уровнем по стандартному протоколу INDUSTRIAL ETHERNET.

Система управления верхнего уровня реализуется на персональных ЭВМ со стандартной операционной системой (Windows NT), что также позволит избежать проблем с обслуживанием.

Связь между подсистемами реализуется в виде локальной сети с оптоволоконной линией связи.

Модернизация будет производиться в два этапа. В первую очередь заменяются системы управления, регулирования и защиты, выполненные на аналоговых элементах, трех частотно-регулируемых электроприводах системами EMADYN, а также системы электроснабжения собственных нужд и некоторые датчики электрических величин.

Работы по модернизации сложны не только тем, что подлежат модернизации мощные высоковольтные электропривода, но и тем, что:

- работы должны выполняться на действующей КС-26;
- любые перемены в работе КС по вине электро-

привода приводят к существенным материальным потерям;

- наладочные работы на таком электроприводе достаточно дорогостоящи, например, стоимость одного часа таких работ эквивалентна стоимости 20000—25000 кВт·ч, не считая стоимости работ наладочного персонала.

Поэтому заказчик и предприятия, которые участвуют в работах по модернизации, приняли решение о создании физической модели частотно-регулируемого электропривода по схеме вентильного двигателя, на которой:

- должны быть отработаны на функционирование системы управления, регулирования и защиты, выполненные на системе типа EMADYN, с реальными значениями входных и выходных сигналов в реальном времени;

- должно быть проведено предварительное обучение эксплуатационного персонала.

Функциональная схема физической модели системы электропривода по схеме вентильного двигателя приведена на рис.5. На схеме система приведена в упрощенном виде и показаны основные контуры, объясняющие принципы построения и реализации системы.

В систему типа EMADYN поступают:

- входные аналоговые сигналы, преобразованные с помощью встроенного А/Ц преобразователя в 16-разрядные цифровые переменные;

- специальный логический входной сигнал — синхронизация;

- "логические входные сигналы" (битовые переменные) функционального блока управляющей логики;

- "входные сигналы" из двухпортовой памяти (взаимодействие между сетевым процессором и процессором двигателя).

Выходами системы типа EMADYN являются:

- выходные логические сигналы, соответствующие импульсам управления тиристорами преобразователей сети, двигателя и возбуждения;

- «логические сигналы» (битовые переменные), составляющие входные сигналы функционального блока управляющей логики;

- 16-разрядные цифровые переменные, преобразованные потом с помощью Ц/А преобразователей в выходные аналоговые сигналы внешней системы;

- «входные сигналы» двухпортовой памяти (взаимодействие между сетевым процессором и процессором двигателя).

Система управления, регулирования и защиты типа EMADYN обеспечивает на физической модели электропривода следующие рабочие режимы:

1. **Пуск** — после получения команды «Технологический пуск» регулятор проведет все необходимые действия (возбуждение, определение положения ротора, разгон привода в режиме принудительной коммутации до частоты вращения 0,1—0,15 от номинальной, и далее работа в режиме естественной коммутации).

2. **Работа** — привод работает с заданной скоростью, которую регулятор поддерживает с точностью 1%; изменение требуемой скорости проводится при местном управлении посредством сигналов «увеличение оборотов» или «понижение оборотов»; скорость регулирования только в рабочем диапазоне скоростей 65—100% номинальной (по требованию заказчика возможно расширение диапазона регулирования скорости до 25—100% номинальной); регулятор оснащен ограничением по току, которое не допускает перегрузки при-

вода выше установленного значения; с помощью внешних сигналов можно изменить угол управления преобразователя двигателя и достигнуть таким образом увеличения или уменьшения реактивной мощности, потребляемой из сети.

3. **Выбег** — после получения сигнала «Стоп» регулятор проводит уменьшение токов до нуля, а привод переводится в режим торможения на выбеге.

4. **Торможение** — после получения команды «Быстродействующий тормоз» регулятор уменьшит токи двигателя до нуля, переведет сетевой преобразователь в инверторный режим, а моторный преобразователь в выпрямительный. Осуществляется торможение электропривода с отдачей энергии в сеть до скорости 0,1—0,15 от номинальной в режиме естественной коммутации, а далее в режиме принудительной коммутации. При достижении нулевой скорости отключается контактор питающей сети, а затем и контактор возбуждения.

5. **Повторный старт** — если привод находится на выбеге или происходит электрическое торможение, а его скорость не уменьшилась ниже 10% от номинальной, возможно выполнение повторного пуска на рабочую скорость.

6. **Авария** — остановка электропривода с анализом необходимого режима торможения.

Работа системы регулирования, управления и защиты на рис.5 осуществляется следующим образом. Регулирование скорости электропривода выполняется регулятором частоты вращения R_{ω} , имеющим ПИ-характеристику. Заданное значение частоты вращения ω^* поступает на вход регулятора через устройство задания из панели управления и сигнализации или компьютера, подключенного к блоку EMADYN. Сигнал обратной связи на вход R_{ω} — поступает от датчика частоты вращения. В качестве датчика частоты вращения используется преобразователь частоты напряжения инвертора в сигнал, пропорциональный частоте. Поскольку двигатель синхронный, частота импульсов (частота инвертора) строго пропорциональна частоте вращения двигателя. Частота вращения регулируется изменением значения момента, возникающего от взаимодействия потока возбуждения и тока статора двигателя. Регулирование момента осуществляется за счет изменения амплитуды тока статора. Ток статора двигателя регулируется пропорционально заданию момента с выхода регулятора частоты вращения R_{ω} через две системы управления выпрямителя GU и инвертора GS . При изменении задания момента по знаку переключается режим работы электропривода (двигательный или тормозной) путем скачкообразного изменения фазы тока относительно ЭДС двигателя, и таким образом изменяется знак момента. Переход электропривода из двигательного режима в тормозной осуществляется переводом преобразователя сети (выпрямителя) в инверторный режим, а преобразователя двигателя (инвертора) в выпрямительный. Этот переход осуществляется после того, когда выпрямительный ток будет равен нулю.

Регулятор потокосцепления двигателя R_{ψ} имеет пропорционально-интегральную характеристику. Требуемое постоянное значение потока СД ψ^* задается устройством задания, а действительное значение потока вычисляется в преобразователе P_{ψ} из значений фазных потокосцеплений, полученных после интегрирования фазных напряжений двигателя. Мгновен-

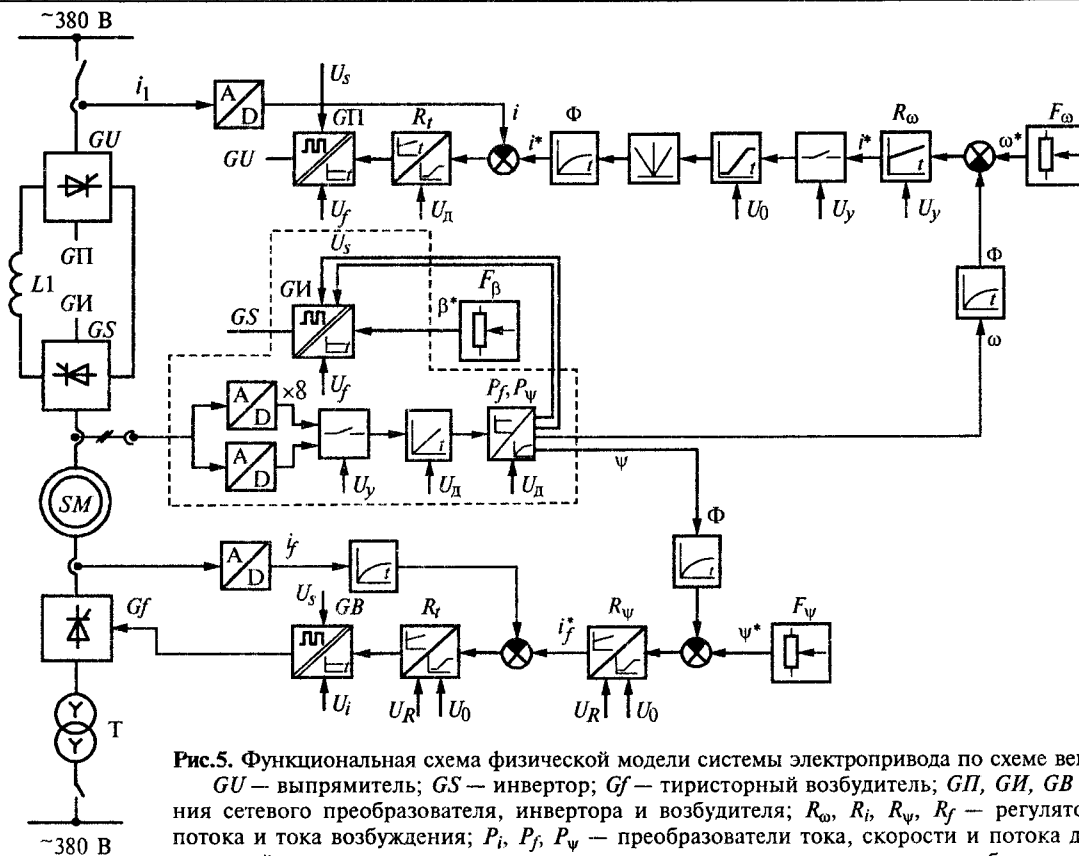


Рис.5. Функциональная схема физической модели системы электропривода по схеме вентильного двигателя: *GU* — выпрямитель; *GS* — инвертор; *Gf* — тиристорный возбудитель; *ГП, ГИ, GB* — системы управления сетевого преобразователя, инвертора и возбудителя; *R_ω, R_f, R_ψ, R_f* — регуляторы скорости, тока, потока и тока возбуждения; *P_i, P_f, P_ψ* — преобразователи тока, скорости и потока двигателя; *F_ω, F_ψ, F_β* — устройства задания скорости, потокосцепления и угла управления преобразователя двигателя; *Φ* — фильтр; *i₁* — ток сетевого выпрямителя; *ω, i_f, ψ* — частота вращения, ток возбуждения и поток двигателя; *U_s* — сигнал синхронизации; *U_R, U_i* — сигнал управления регулятором и системой СИФУ; *U_y* — сигнал управления бесконтактным ключом; *U₀* — сигнал ограничения переменной; *i*, ψ*, ω*, β** — заданные значения уставок координат электропривода

ные значения фазных напряжений двигателя поступают на интеграторы с аналого-цифровых преобразователей по двум цепям:

1) с «единичным» (нормальным) коэффициентом усиления, соответствующим диапазону изменения напряжения двигателя;

2) с усилением в 8 раз большим для возможности более точных вычислений при начальном возбуждении двигателя и при его пуске.

Задание на регулятор тока возбуждения *R_f* поступает от регулятора потока и этим обеспечивается постоянство потокосцепления двигателя. Регулятор тока возбуждения *R_f* выполнен интегрально-пропорциональным. Сигнал обратной связи по току возбуждения *i_f* на регулятор *R_f* поступает через АЦП.

В цепях обратных связей по частоте вращения *ω*, потокосцеплению *ψ* и току возбуждения *i_f* установлены апериодические звенья, выполняющие фильтрацию сигналов.

Синхронизация систем управления тиристорами (СИФУ) выполняется сигналами:

а) для сетевого выпрямителя и тиристорного возбудителя специальным логическим сигналом *U_s* (синхронизация); этот сигнал формируется из напряжения сети;

б) для выпрямителя двигателя (инвертора) сигналами *U_{s1}* и *U_{s2}*, которые формируются из значений фазных потокосцеплений двигателя, полученных после интегрирования фазных напряжений двигателя.

Система позволяет с помощью пульта управления

МРА1 или компьютера изменять параметры функциональных узлов (постоянных времени, коэффициентов усиления, величин ограничения переменных) производить наладку электропривода и оптимизацию контуров регулирования.

Включение функциональных узлов выполняется сигналами (*U_R, U_y*), поступающими из системы управления.

Заданные величины для регуляторов координат электропривода (*ω*, ψ*, β**) поступают в систему регулирования из устройств задания в зависимости от режима работы: пуск, работа на установившейся частоте вращения, торможение и т.д.

В системах управления и регулирования вентильного электропривода выполняется анализ нарушений и аварийных ситуаций в работе электропривода или его составляющих и, в зависимости от вида нарушения, принимаются решения, которые могут быть разделены на группы: *A* — аварийное отключение; *P* — предупредительная сигнализация.

Внутри групп сигналы также разделяются: *A1* — требуется немедленная остановка электропривода с отключением всех силовых аппаратов; *A2* — остановка электропривода с электрическим торможением; *P1* — аварийный вывод на пультовое устройство и действия эксплуатационного персонала; *P2* — нормальный вывод на пультовое устройство и действия эксплуатационного персонала; *P3* — сообщение принимается к сведению.

После отработки локальных подсистем управления

типа EMADYN замена оборудования будет производиться на каждом из трех электроприводов поочередно без остановки остальных.

К настоящему времени в Словакии на двух КС по табл.2 проведена модернизация трех частотно-регулируемых электроприводов в объеме, который соответствует вышеуказанной I-й очереди. Модернизация одного электропривода на КС «В. Злиевце» была закончена в октябре 1998 г. Благодаря высокому уровню подготовительных проектных и организационно-технических работ модернизация электропривода (включая демонтаж старых систем, монтаж и подключение новых систем регулирования, управления и защиты, а также их наладку и пуск в эксплуатацию) была осуществлена в течение 14 дней. Результаты промышленных испытаний и почти годичной эксплуатации модернизированных систем электропривода на КС «В. Злиевце» показали целесообразность проведения модернизации остальных электроприводов.

В октябре 1999г. была проведена модернизация одного электропривода на КС «Яблонь» в указанном объеме. Работы были выполнены в течение 10 дней. В ноябре 1999 г. была проведена модернизация второго электропривода на КС «В. Злиевце», причем накопленный опыт при модернизациях позволил выполнить весь вышеуказанный объем работ за 8 дней.

Выводы

1. При наличии мощных электроэнергетических систем, по информации ведущих электротехнических фирм, по показателям «капитальные вложения» и «эксплуатационные расходы» для быстроходных турбокомпрессоров магистральных трубопроводов следует отдавать предпочтение быстроходным частотно-регулируемым электроприводам переменного тока.

2. Современное состояние развития силовых полупроводниковых приборов (тиристоров, ГТО-тиристоров, IGBT-тиристоров и IGBT-транзисторов) и микроэлектроники (микропроцессорные устройства и дру-

гие сопутствующие элементы микроэлектроники), а также современное состояние электромашиностроения (в части разработок и изготовления быстроходных синхронных и асинхронных двигателей) позволяет реализовать высокоэффективные и надежные частотно-регулируемые электроприводы переменного тока для быстроходных турбокомпрессоров.

3. Выбор типа быстроходного электропривода (на основе быстроходного синхронного или асинхронного двигателя) для турбокомпрессоров магистральных газопроводов определяется в основном требованиями заказчика и технологическими возможностями поставщика в части производства того или иного типа электропривода и преобразователя частоты.

4. Опыт эксплуатации ООО «Мострансгаз» частотно-регулируемых электроприводов мощностью 2500 МВт, 3700 об/мин по схеме вентильного двигателя, а также анализ опыта эксплуатации подобных электроприводов ведущих электротехнических фирм показывает, что срок службы 15—20 лет таких электроприводов — вполне реальные цифры.

Список литературы

1. Дацковский Л.Х., Иванов Г.М., Роговой В.И. Состояние проблемы создания на базе российской технологии высокоскоростного регулируемого электропривода нагнетателя магистрального газопровода: Аналитич. обзор. АООТ «Электропривод». 122 ЕИЛА. 29—96.
2. Михайлов В.В. Тарифы и режимы электропотребления. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Variable Speed Drives for Large Turbomachines. Siemens. Order № A19100-E314-A308-X-7600.
4. Кочетков В.Д., Дацковский Л.Х., Роговой В.И., Павелка И. Некоторые аспекты проблем внедрения мощных частотно-регулируемых электроприводов//Труды конференции с международным участием «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Крым. Алушта, 15—20 сентября 1997. С. 7—8.
5. Инструкция по эксплуатации привода 25 МВт. ЧКД-Прага завод «Электротехника» EES 7.2—107.

Направления совершенствования электрооборудования одноковшовых экскаваторов

АБРАМОВ Б.И., КОГАН А.И., ПАРФЕНОВ Б.М., ПОРТНОЙ Т.З.

ОАО "Электропривод"

Электрооборудование одноковшовых экскаваторов входит в состав электротехнического комплекса, который решает все задачи, обеспечивающие технологический процесс экскавации в сложных условиях эксплуатации.

На рисунке представлена однолинейная схема электротехнического комплекса одноковшового экскаватора, из которой видны его составляющие.

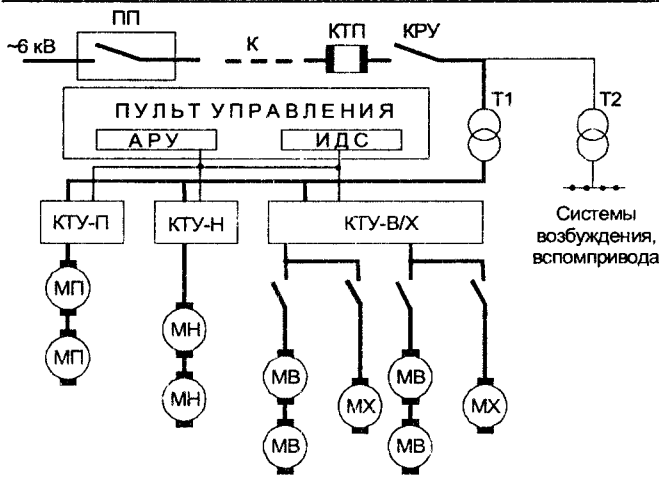
Эти составляющие целесообразно рассматривать по следующим группам:

- высоковольтное оборудование, расположенное на открытом воздухе (ПП и КТП);
- высоковольтное и трансформаторное оборудование, расположенное внутри экскаватора (КРУ, Т1, Т2);
- электромашинный преобразовательный агрегат

или статические преобразовательные агрегаты (КТУ-П, КТУ-Н, КТУ-В);

- электродвигатели главных механизмов (МП, МН, МВ, МХ);
- электродвигатели вспомогательных механизмов;
- системы возбуждения электродвигателей;
- системы управления, информации и диагностики (АРУ, ИДС).

До 1990 г. электрооборудование одноковшовых экскаваторов разрабатывалось и изготавливалось предприятиями электротехнической промышленности согласно сложившейся специализации. Эта специализация отражала особые условия эксплуатации электрооборудования экскаваторов, связанные с экстремальными климатическими и механическими воздействиями, удаленностью ремонтных баз, отсутствием



Однолинейная схема электротехнического комплекса экскаватора ЭКГ-20А

ПП — пункт подключения; К — кабель гибкий; КТП — кольцевой токоприемник; КРУ — комплектное распределительное устройство; Т1, Т2 — главный и вспомогательный трансформаторы; КТУ-П, КТУ-Н — комплектные тиристорные устройства электроприводов подъема и напора; КТУ-В/Н — комплектное тиристорное устройство электроприводов поворота/хода; МП, МН, МВ, МХ — электродвигатели подъема, напора, поворота и хода; АРУ — аппаратура ручного управления; ИДС — информационно-диагностическая система

квалифицированных электриков в обслуживающем персонале.

Такие условия потребовали создания определенного вида электрооборудования — «экскаваторного», которое могло разрабатываться и изготавливаться на предприятиях, выпускающих специальную продукцию («Электросила», ХЭМЗ, «Уралэлектротяжмаш» и др.);

— региональные связи с экскаваторостроительными заводами («Электросила» — Ижорский завод; ХЭМЗ — Новокраматорский завод; «Уралэлектротяжмаш» — «Уралмашзавод»);

— многолетний опыт работы по разработке, изготовлению и наладке электротехнических комплексов экскаваторов (ОАО «Электропривод» — бывший ВНИИэлектропривод);

— монопольное положение в изготовлении средств управления для электротехнических комплексов экскаваторов (Александровский электроаппаратный завод).

Прошедшие 10 лет (1989—1999 г.) характеризуются многократным снижением объема открытых горных работ и соответствующим уменьшением производства технологического оборудования для этих целей.

В настоящее время ряд предприятий электротехнической промышленности, изготовлявших электрооборудование для экскаваторов, по разным причинам не могут рассматриваться в качестве поставщиков этого электрооборудования (ХЭМЗ, АЭМЗ, Запорожский электроаппаратный завод, Бакинский завод высоковольтного оборудования, Минский трансформаторный завод, Калининский электроаппаратный завод, Гайский завод и др.).

Вместе с этим, для поддержания работоспособности части экскаваторов, находящихся в эксплуатации, проводилась их модернизация, потребовавшая поставок нового электрооборудования. На основании этой потребности проводилась частичная модернизация

электрооборудования, изготавливаемого предприятиями электротехнической промышленности (Карпинский электромашиностроительный завод, ОАО «Электросила», ОАО «Электропривод», Баранчинский электромашиностроительный завод), а также разработка и производство новых видов электрооборудования на горнорудных предприятиях («Рудоавтоматика» г. Железногорск, «Юрэль» г. Качканар, «Объединенная энергия» г. Москва).

В табл.1 отражены некоторые изменения в предприятиях-изготовителях «экскаваторного» электрооборудования. Однако ни по техническому уровню, ни по технологическому оснащению производства выпускаемое в настоящее время электрооборудование не удовлетворяет потребности нового этапа восстановления производства и повышения технического уровня экскаваторов на ОАО «УЗТМ» и ОАО «Ижорские заводы».

В существующих условиях, когда большинство экскаваторов, находящихся в эксплуатации, оснащены изношенным и морально устаревшим электрооборудованием, а восстановление производства не всегда связывается с возможностями современных электротехнических комплексов, важно определить первоочередные задачи по созданию современной номенклатуры «экскаваторного электрооборудования». Эти задачи сформулированы в «Концепции развития работ по созданию современных электротехнических комплексов для горной техники».

Таблица 1

Предприятия — изготовители экскаваторного электрооборудования

Виды электрооборудования	Предприятия-изготовители	
	До 1990 г.	К 2000 г.
Высоковольтное оборудование	Нижне-Туринский электроаппаратный завод; Запорожский трансформаторный завод; Бакинский завод высоковольтной аппаратуры; НПО «Электрофизика» (г. Санкт-Петербург)	Нижне-Туринский электроаппаратный завод; НПО «Электрофизика» (г. Санкт-Петербург)
Трансформаторы	«Уралэлектротяжмаш»; Запорожский трансформаторный завод; Минский электротехнический завод им. Козлова	«Уралэлектротяжмаш»; Минский электротехнический завод им. Козлова
Генераторы и двигатели постоянного тока	ОАО «Электросила»; ХЭМЗ; Карпинский элмашзавод; «Динамо»; Завод «Памяти революции 1905 г.»; Лысьвенский турбогенераторный завод	ОАО «Электросила»; Карпинский элмашзавод
Статические преобразователи для главных электроприводов	НПО «Электропривод»; Запорожский электроаппаратный завод	ОАО «Электропривод»
Системы управления	Александровский электро-механический завод; ОАО «Электросила»; НПО «Электропривод»; «Электропреобразователь» (г. Гай)	«Рудоавтоматика» (г. Железногорск); ОАО «Электросила»; ОАО «Электропривод»

Указанная концепция разработана ОАО "Электропривод" в конце 1999 г. по заданию Инженерного центра холдинга "Уралмаш—Заводы", объединяющего основные заводы — изготовители экскаваторов (ОАО "Ижорские заводы" и ОАО "УЗТМ").

На современном этапе восстановления и развития производства одноковшовых экскаваторов требуется:

- модернизация выпускаемого электрооборудования с целью повышения его надежности и удобства эксплуатации;

- разработка и освоение производства новых типов электрооборудования по сложившейся номенклатуре с целью его унификации и использования современных комплектующих и материалов;

- расширение функций электротехнического комплекса в направлении единообразных систем управления, информатики и диагностики;

- создание регулируемых электроприводов переменного тока вместе с совершенствованием электроприводов ТП-Д и Г-Д на единой элементной базе и определение оптимальных областей их применения;

- повышение уровня автоматизации технологического процесса экскавации;

- координация работ в области электротехнических комплексов экскаваторов.

Естественно, что указанные работы должны выполняться с учетом опыта и последних достижений передовых зарубежных экскаваторных и электротехнических фирм, а также отечественных предприятий.

Анализ этого опыта позволяет определить следующие направления совершенствования электротехнических комплексов для экскаваторов:

- изменение структуры электротехнического комплекса;

- расширение области применения электропривода с преобразователем на основе СПП;

- применение микропроцессоров для выполнения всех функций управления главными и вспомогательными электроприводами, а также для диагностики и информатики;

- повышение надежности и ремонтоспособности электрических машин;

- увеличение степени унификации электрооборудования и сокращение его номенклатуры;

- программное управление главными электроприводами с целью автоматизации отдельных технологических процессов.

Рассмотрим состояние работ в этих направлениях.

Микропроцессорная техника обеспечила возможность расширения функций систем управления, а также применения ее в целях диагностики, информатики и автоматизации технологических процессов. Теперь микропроцессорная техника занимает ведущее положение в электротехническом комплексе.

Габариты комплектных устройств с микропроцессорной техникой позволили расположить их значительную часть в кабине машиниста, что обеспечивает новые возможности управления и соответствующее повышение производительности экскаватора. Теперь кабину управления можно рассматривать как низковольтное комплектное устройство (НКУ) с расположением панелей, блоков и отдельных аппаратов в нетрадиционном для НКУ виде.

Следует ожидать дальнейшее увеличение роли систем управления в электротехническом комплексе и

совершенствования кабинного модуля экскаватора, как нового вида комплектного устройства управления.

Технический прогресс в силовой полупроводниковой технике определил общую тенденцию замены электромашинных преобразовательных агрегатов на статические, обладающие известными преимуществами перед первыми.

Применительно к экскаваторам эти преимущества обеспечивают: повышение производительности на 5—7% и ограничение динамических усилий благодаря быстрдействию систем ТП-Д и ПЧ-АД; экономию расхода электроэнергии на 20—25%; уменьшение затрат на монтаж и эксплуатацию преобразовательных агрегатов на 10—15%; улучшение условий эксплуатации.

Фирма "Харнишфегер" начала применять электропривод ТП-Д для главных механизмов карьерных экскаваторов с середины 70-х годов. К настоящему времени эта фирма изготавливает преобразователи мощностью от 250 до 1650 кВт для всех типов экскаваторов.

"Уралмашзавод" в конце 70-х годов применил этот вид привода на карьерных экскаваторах ЭКГ-20, эксплуатирующихся в наиболее суровых природных условиях Нерюнгринского угольного разреза ПО "Якутуголь", а также на угольном разрезе "Междуреченский" в угольной компании "Южный Кузбасс". Большая часть этих экскаваторов, изготовленных в 1980 г., работает до сих пор.

В настоящее время "Уралмашзавод" проводит подготовку к производству нового поколения ЭКГ-20; соответствующие работы по электротехническому комплексу этого экскаватора выполняет ОАО "Электропривод". Естественно, что в этих работах учитывается опыт эксплуатации экскаваторов ЭКГ-20, а также последние достижения в преобразовательной технике.

В схемах главных приводов предусматривается:

- исключение параллельного соединения тиристоров, что оказалось возможным благодаря применению тиристоров на ток до 1600 А и блоков на их основе, прошедших успешные промышленные испытания в электроприводах буровых установок такой же мощности, что и у ЭКГ-20;

- применение микропроцессорной техники для цифровых систем управления, диагностики и информатики;

- полностью реверсивный привод подъема в отличие от одноконтурного реверсивного, когда опускание ковша происходит под действием собственного веса, что приводит к некоторой потере времени;

- замена автоматов постоянного тока предохранителями.

В схемах вспомогательных электроприводов предусмотрено применение микропроцессорного логического контроллера для стыковки с шиной Profibus, что позволит исключить индивидуальные монтажные соединения и повысить надежность работы всех систем управления.

Применение нового поколения электропривода ТП-Д на экскаваторе ЭКГ-20А обеспечит:

- наработку на отказ 8000 ч вместо 500 ч, что имеет место на ЭКГ-20;

- сокращение продолжительности цикла.

Общие тенденции развития электропривода указывают на перспективность использования регулируемого электропривода переменного тока. Его достоинства основываются, прежде всего, на известных преимуществе

Сравнительные данные показателей энергоснабжения у систем электропривода ТП-Д и ПЧ-АД

ществах асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (меньшие масса, габариты, момент инерции; высокая надежность и пр.).

Известны различные схемы преобразования напряжения питающей сети в напряжение с регулируемой частотой. В электроприводе экскаваторов применение нашли два вида схем: преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока и управляемыми инверторами и широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения (ПЧ-АД с ШИМ) и непосредственные преобразователи частоты.

Фирма "Бюсайрус" начала применять регулируемые электроприводы переменного тока с 1980 г. и к настоящему времени применяет третье поколение этого привода, который получил название Акутрол в производстве фирмы "Сименс". К настоящему времени в эксплуатации находятся более 100 экскаваторов фирмы "Бюсайрус" с электроприводами переменного тока мощностью до 2000 кВт.

В России электропривод переменного тока нашел свое применение в схеме непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) на экскаваторе ЭШ 20/90 производства "Уралмашзавода" (введен в эксплуатацию на разрезе ПО "Востоксибуголь" в 1989 г.).

Преимущества системы ПЧ-АД с ШИМ в полной мере проявляются у быстроходных двигателей с повышенным напряжением (более 1000 В).

Преимущества системы НПЧ в большей степени реализуются в тихоходных электроприводах.

Естественно, что при разработке новых исполнений и новых типов экскаваторов с электроприводом переменного тока будут учитываться эти обстоятельства.

Основные препятствия более широкого применения электропривода переменного тока:

- большая стоимость по сравнению с электроприводами Г-Д и ТП-Д (сравнительные расчеты стоимости были проведены фирмой "Сименс" и ОАО "Электропривод" для электропривода экскаватора ЭКГ-20; если принять стоимость комплекта для электроприводов постоянного тока за 100%, то стоимость будет составлять 160—170%. При этом стоимости комплектов электрических машин мало отличаются друг от друга, а стоимость преобразовательной части для электропривода переменного тока выше в 2,5—2,7 раза стоимости преобразователей для электропривода постоянного тока);

- трудности обеспечения тормозных режимов в системах ПЧ-АД со звеном постоянного тока;

- плохая совместимость преобразователей с системой электроснабжения.

Последнее обстоятельство также относится и к электроприводу ТП-Д, что иллюстрирует табл.2. Этим, в частности, объясняются планы фирм "Дженерал Электрик" и "Сименс" начать массовое применение электроприводов переменного тока только с 2005 г., когда указанные недостатки в электроприводе переменного тока будут преодолены.

В России, кроме совершенствования схем преобразователей частоты в указанных направлениях, предстоит разработать и освоить производство специальных исполнений асинхронных электродвигателей при их питании от преобразователей частоты. В этих исполнениях следует предусмотреть: увеличение воздушного зазора для обеспечения надежной работы электродвигателя в режиме тряски и вибраций; установку датчика скорости на валу электродвигателя; повыше-

Показатели	с ПЧ-АД		с ТП-Д	
	"Дженерал Электрик" ¹	Сименс ¹	без ФКУ	с ФКУ
Стоимость электроэнергии, %	95	95	100	100
Дополнительная стоимость системы электроснабжения разреза, %	100	100	106	100
Дополнительная стоимость компенсирующих устройств для системы с равными показателями, % стоимости электрооборудования экскаватора	4,3	0	0	7,5
Увеличение эксплуатационных расходов из-за выхода из строя комплектующих изделий при отключении напряжений в год, % стоимости электрооборудования	0	0	0,3	0,3
Средний коэффициент мощности за цикл	0,95	0,9 (0,4-0,5 без компенсации)	0,25-0,35	0,85
Максимальное значение снижения питающего напряжения, %	30	30	20	20

¹ Фирма "Сименс" применяет схему с инверторами напряжения; фирма "Дженерал Электрик" — схему с инверторами тока. Показатели схемы НПЧ такие же, как и у ТП-Д. Экономия стоимости электроэнергии достигается за счет повышения коэффициента мощности.

ние механической прочности вала электродвигателя, связанное с повторно-кратковременным режимом с перегрузками; усиление изоляции, необходимое для обеспечения длительного срока службы электродвигателей, которые питаются от инверторов тока, где имеют место циклические коммутационные перенапряжения, которые могут вызвать ускоренное старение применяемых в настоящее время изоляционных материалов.

Несмотря на имеющийся длительный опыт эксплуатации электроприводов ПЧ-АД и ТП-Д, их сравнительный анализ не позволяет пока отдать предпочтение какому-то виду электропривода.

Электропривод Г-Д остается наиболее отработанным и привычным для эксплуатации, хорошо совместимым с системой электроснабжения.

Электропривод ТП-Д проходит систематическую модернизацию, связанную с прогрессом в полупроводниковой технике и совершенствованием ФКУ.

Электропривод ПЧ-АД проходит период радикального преодоления принципиальных недостатков, рассмотренных выше. Поэтому следует предполагать, что в ближайшие 10—15 лет все три вида электропривода будут совершенствоваться и применяться на экскаваторах.

В этих условиях целесообразно определить такие изделия, которые будут необходимы в любом виде электропривода, и сосредоточить особые усилия на их создании, имея в виду применение этих изделий при

изготовлении новых и модернизации действующих экскаваторов.

В настоящее время, когда рост производства экскаваторов ограничен, а изношенность оборудования достигает 50—70% действующего парка, значительно возросла потребность в электрооборудовании для модернизации экскаваторов.

Эта потребность удовлетворяется как серийно выпускаемым электрооборудованием, так и электрооборудованием, приспособленным для этих целей. Весьма эффективными работами по модернизации систем управления главными электроприводами являются работы МЭИ и ОАО "Электропривод".

С середины 70-х годов МЭИ, а затем и "Рудоавтоматика" по разработкам МЭИ, производят преобразователи типа ПТЭМ в моноблочном исполнении, пригодном для систем Г-Д, ТП-Д, и НПЧ-АД. Основной идеей этой разработки является создание серии моноблоков, не подлежащих ремонту на экскаваторе, а приспособленных для оперативной замены на другой моноблок, имеющийся для этой цели в комплектном устройстве. Это позволило применить в моноблоках современную элементную базу (модули на оптронах МТОТО, тиристорные модули МТТ, транзисторные модули IGBT и др.).

ОАО "Электропривод" с 80-х годов проводит поставку комплектных тиристорных устройств (КТУ) для модернизации систем Г-Д действующих экскаваторов, а также для новых экскаваторов и буровых установок. Основной идеей этой разработки является применение современных средств микроэлектроники в сочетании с миниатюрными магнитными элементами, в том числе специальные, не имеющие аналогов, что позволило создать простые, надежные и помехоустойчивые КТУ, пригодные как для модернизации действующих, так и для применения на новых экскаваторах с любым видом электропривода.

Помимо комплектных тиристорных устройств уп-

Прогноз применения различных видов электропривода в одноковшовых экскаваторах

Тип экскаватора, изготовитель	Вид электропривода	
	Существующий	Предполагаемый к 2003 г.
ЭКГ-5, ОАО "УЗТМ"	Г-Д	Г-Д
ЭКГ-10, ОАО "ИЗ"	Г-Д	Г-Д, ПЧ-АД
ЭКГ-12, ОАО "УЗТМ"	Г-Д	Г-Д, ТП-Д
ЭКГ-15, ОАО "ИЗ"	Г-Д	Г-Д, ПЧ-АД
ЭКГ-20, ОАО "УЗТМ"	ТП-Д	ТП-Д
ЭШ11/75, ОАО "УЗТМ"	Г-Д	Г-Д, ТП-Д
ЭШ20/90, ОАО "УЗТМ"	Г-Д	Г-Д, ТП-Д

равления ОАО "Электропривод" разработал и начал производство новых бесконтактных одно- и двухкоординатных командоаппаратов, которые являются обязательными и весьма ответственным элементом управления электроприводами экскаваторов.

Теперь, когда определены планы воспроизводства одноковшовых экскаваторов и технические требования к модернизации выпускаемого электрооборудования, возникла целесообразность составления координационного плана работ по электротехническим комплексам одноковшовых экскаваторов на ближайшие годы.

ОАО "Электропривод" по поручению Инженерного центра холдинга ОАО "Уралмаш-Заводы" разрабатывает координационный план на 2001—2003 гг. Основой такого плана является:

- прогноз применения различных видов электропривода в одноковшовых экскаваторах (табл.3);
- предложения заводов-изготовителей экскаваторов и предприятий-изготовителей экскаваторного электрооборудования;
- предложения служб эксплуатации.

Новые разработки для модернизации электроприводов мощных экскаваторов

РЕЙНГОЛЬД Ю.Р.

Рассмотрены системы управления действующего парка мощных экскаваторов и обоснована концепция его модернизации на основе трех новых базовых функционально законченных КТУ, разработанных с использованием в них технических средств микроэлектроники в сочетании с миниатюрными магнитными элементами, в том числе специальными. Приведены результаты стендовых испытаний КТУ в системе Г-Д применительно к экскаваторам ЭШ-10/60 и ЭШ-10/70А. Предложены варианты модификаций КТУ для экскаваторов ЭШ-15/90, ЭШ-15/90А и других типов.

Действующий парк экскаваторов и концепция его модернизации. Разработка и производство мощных вскрышных и карьерных одноковшовых экскаваторов начались с конца 40-х годов одновременно на двух заводах тяжелого машиностроения: УЗТМ (РСФСР) и НКМЗ (Украина).

Разработчиком и поставщиком электрооборудования для вспомогательных и главных электроприводов Г-Д экскаваторов УЗТМ всех типов вплоть до уникальных драглайнов с объемом ковша до 100 м³ стал

ОАО "Электропривод" (ранее ЦКБ, ВНИИ и НПО "Электропривод").

На пути развития экскаваторного электрооборудования можно выделить три основных этапа совершенствования систем управления главными электроприводами, обусловленные новыми общими технологиями в области средств автоматики и регулирования, а также разработками специальных устройств на их основе.

На первых серийных экскаваторах УЗТМ в схемах управления использовались электромашинные усили-

тели (ЭМУ). Суммирование всех сигналов управления осуществлялось непосредственно на его входе или через промежуточный магнитный усилитель (ЭМУ+ПМУ). Такая схема управления с одним регулятором для тока и напряжения привода является наиболее простой, но имеет принципиальные недостатки. Динамические характеристики привода в ней существенно отличаются от статических, стопорный ток при изменении положения командоконтроллера (КК) не остается постоянным, а крутизна отсечки тока, близкая к вертикальной и желательная, например, для электропривода подъема дроглайнов, не может быть достигнута по условиям устойчивости. С 1949 по 1963 гг. с ЭМУ были изготовлены 52 экскаватора различных типов с объемом ковша от 10 до 20 м³, в том числе 25 машин новой серии ЭШ-15/90 и один экскаватор ЭШ-25/100.

В начале 60-х годов ВНИИэлектропривод разработал однокаскадный реверсивный блок силовых магнитных усилителей (СМУ) мощностью 1,5 кВт — блок ПДД-1,5 В и мостовую схему [1] возбуждения генераторов с балластными сопротивлениями для карьерных экскаваторов ЭКГ-4 УЗТМ, которая позволила внедрить СМУ на вновь изготавливаемых экскаваторах и всех машинах, находившихся в эксплуатации, оборудованных трехобмоточными генераторами. При этом обмотки главных полюсов сохранялись неизменными. Благодаря высокой надежности СМУ все серийные экскаваторы УЗТМ этого класса до сих пор выпускаются с СМУ.

Положительный опыт эксплуатации карьерных экскаваторов с СМУ стимулировал их внедрение на мощных шагающих экскаваторах. С середины 60-х годов экскаваторы УЗТМ ЭШ-15/90А стали оснащаться электроприводами с двухкаскадными магнитными системами управления: трехфазными СМУ и однофазными суммирующими блоками БД с частотой питания 50 или 400 Гц. Для уменьшения требуемой мощности СМУ генераторы на этих экскаваторах выполняются с двумя обмотками возбуждения: шунтовой и независимой.

Внедрение системы СМУ+ПМУ для управления возбуждением генераторов позволило повысить надежность электропривода, снизить расходы на обслуживание и в известной степени обеспечить большой запас устойчивости контура отсечки.

К ее недостаткам относятся: громоздкость (три шкафа возбуждения имеют габаритные размеры 900×800×2400 мм каждый), низкий КПД, ограниченная форсировка по напряжению и, как следствие, невысокие динамические характеристики привода. С 1963 до 1976 гг. с «магнитной» системой возбуждения выпущено 83 экскаватора ЭШ-15/90А.

Перевод шагающих экскаваторов ЭШ-15/90А на тиристорное возбуждение был в основном осуществлен в 1976 г. Для серийного производства принята система управления, в которой используются: трехфазные тиристорные возбудители с линейным совместным управлением вентильными группами [2], специально разработанная магнитно-транзисторная СИФУ [3] и двухконтурная САР с регуляторами напряжения и тока, выполненными на двухтактных блоках магнитных усилителей БД с частотой питания 50 Гц.

СИФУ действует на «горизонтальном» принципе. В блок регулятора фазы (БФР) входят три индуктивно-емкостных моста, состоящих из дроссельного магнитного усилителя (МУ) без обратной связи, преци-

зионных конденсаторов и балластных резисторов. Выходное напряжение моста каждой фазы СИФУ, близкое к синусоидальному, подается на пик-дроссель и затем на транзисторы блока БФИ для формирования мощных управляющих импульсов. Регулирование фазы осуществляется с помощью обмоток управления МУ.

Реверсивный тиристорный возбудитель (РТВЭ) с магнитно-транзисторной СИФУ и совместным управлением наиболее полно соответствует специфическим требованиям и особо тяжелым условиям эксплуатации экскаваторных электроприводов. При этом, являясь практически безынерционным устройством с линейными безлюфтовыми регулировочными характеристиками, РТВЭ обеспечивает значительно большую форсировку возбуждения генератора, а по своей надежности, помехозащищенности и сроку службы не уступает силовым магнитным усилителям.

Благодаря высокому КПД РТВЭ расход электроэнергии на возбуждение генератора по сравнению с магнитными усилителями уменьшается примерно вчетверо.

Тиристорное возбуждение с РТВЭ по сравнению с СМУ по данным промышленных испытаний драглайнов ЭШ-15/90А позволило сократить время переходных процессов копающих механизмов в среднем в 2 раза и уменьшить экстремальные динамические нагрузки в стопорных режимах. В целом внедрение тиристорного возбуждения, как отмечается в [4], явилось существенным вкладом в совершенствование электроприводов крупных экскаваторов.

И все же использование в двухконтурной структуре САР в качестве регуляторов достаточно мощных и инерционных двухтактных магнитных блоков с низкими коэффициентами усиления не позволило в полной мере использовать преимущества тиристорного возбуждения, чтобы реализовать оптимальные статические характеристики для каждого механизма экскаватора, приблизить к ним динамические характеристики электроприводов и тем самым обеспечить полное использование установленной мощности электрических машин.

Эта задача решается в новых разработках.

К настоящему времени с РТВЭ и магнитными двухтактными блоками БД САР находятся в эксплуатации 34 экскаватора ЭШ-15/90А, 24 машины ЭШ-20/90, такие гиганты, как ЭШ-100/100, ЭШ-40/85 (две машины), ЭШ-25/100 (одна машина) и, кроме того, примерно 100 карьерных экскаваторов ЭКГ-12,5 Ижорского завода тяжелого машиностроения.

В общей сложности с рассматриваемой тиристорной системой возбуждения эксплуатируются почти 160 экскаваторов.

Всего же за 50 лет с начала производства выпущено порядка 500 мощных шагающих и карьерных экскаваторов, системы управления которых устарели и вследствие отмеченных недостатков не обеспечивают номинальной производительности. Кроме того, входящие в них многие силовые элементы (ЭМУ, СМУ и блоки управления) сняты с серийного производства, и поставка ЗИПа с каждым годом становится все более затруднительной. В действующий парк крупных экскаваторов с устаревшими системами управления входят также два наиболее массовых типа драглайнов НКМЗ: ЭШ-10/60 с электромашинными и ЭШ-10/70А с силовыми магнитными усилителями.

Для модернизации этого парка мощных экскава-

торов, большая часть которого эксплуатируется до сих пор, ОАО «Электропривод» разработало и освоило производство трех базовых функционально законченных и автономных комплектных тиристорных устройств: возбуждения генераторов главных электроприводов (КТУВГЭ), возбуждения двигателей постоянного тока и СД (КТУВДЭ) и разгона главного преобразовательного агрегата перед включением синхронного двигателя в сеть (КТУРАЭ).

Использование новых разработок обеспечивает возможность как полной замены существующих систем управления экскаваторов, так и частичной замены входящего в нее электрооборудования.

Габаритные размеры и конструкция новых шкафов управления позволяет устанавливать их на монтажных площадках снятого оборудования при сохранении внешних кабельных подводок. При необходимости КТУ могут быть собраны в щит.

Все разработки выполнены в первую очередь применительно к модернизации экскаваторов ЭШ-10/60 и ЭШ-10/70А по поступившим заявкам от конкретных заказчиков и на их средства. При частичной модернизации других типов экскаваторов они могут использоваться непосредственно, а при полной — как базовые изделия с небольшой доработкой.

Концептуальным отличием разработок является использование в них технических средств микроэлектроники в сочетании с миниатюрными магнитными элементами управления, в том числе специальными, не имеющими аналогов, и единых, в своей основе, технических решений при создании СИФУ и САР. Оптимальное сочетание двух технологий позволило создать простые, надежные и помехоустойчивые КТУ, обладающие в то же время высокими динамическими характеристиками и широкими возможностями формирования оптимальных статических характеристик электроприводов для каждого данного механизма экскаватора.

По экономическим соображениям в новых разработках использованы зарекомендовавшие себя технические решения, конструктивы и узлы, освоенные производством существующих тиристорных систем возбуждения экскаваторов, о которых говорилось выше.

Комплектное тиристорное устройство возбуждения генераторов КТУВГЭ¹ разработано для модернизации главных электроприводов ЭШ-10/60, ЭШ-10/70А, ЭШ-15/90, ЭШ-15/90А, ЭШ-20/90 и ЭКГ-12,5.

Модернизация предусматривает замену шкафов с электромашинными и магнитными системами управления, а также шкафов тиристорных возбуждателей с магнитно-транзисторной системой управления СИФУ (блоки БФР, БФИ) и низкочастотными магнитными усилителями в качестве регуляторов (блоки БД и БДК) одним двухсекционным шкафом КТУВГЭ с общими габаритными размерами 1400×800×2200 мм. Все остальное электрооборудование экскаватора и внешний монтаж к шкафу сохраняются прежними.

Шкаф КТУВГЭ содержит три трехфазных реверсивных возбуждателя с разработанными на новой основе блоками импульсно-фазового управления тиристорами и регулирования, выполненными в виде двух стандартных кассет БУК МЭК.

¹ В разработке комплектных тиристорных устройств участвовали А.А.Бенедиктов, Т.С.Кленчева, Е.И.Морозов.

В левой секции шкафа размещены возбуждатели электроприводов подъема и тяги (или напора), в правой — один возбуждатель электропривода поворота.

Часть секции электропривода поворота свободна для установки дополнительного оборудования (по согласованию с заказчиком), если это целесообразно для конкретного типа экскаватора.

На рис.1 для всех типов экскаваторов, указанных выше, установлены тиристорная панель однофазного возбуждателя, блок СИФУ возбуждателя и дифференцирующие электронные ячейки САР генератора поворота.

Модернизация на основе КТУВГЭ — это новое качество электропривода:

— полное использование установленной мощности электрических машин;

— рациональные статические характеристики электроприводов для каждого механизма и максимальное приближение к ним динамических характеристик;

— простота и надежность силовой схемы реверсивного возбуждателя, систем управления тиристорами и регулирования;

— простота наладки и формирования внешних характеристик;

— работоспособность и стабильность рабочих характеристик при глубоких просадках (до 30% $U_{с.ном}$) и искажениях напряжения карьерной сети;

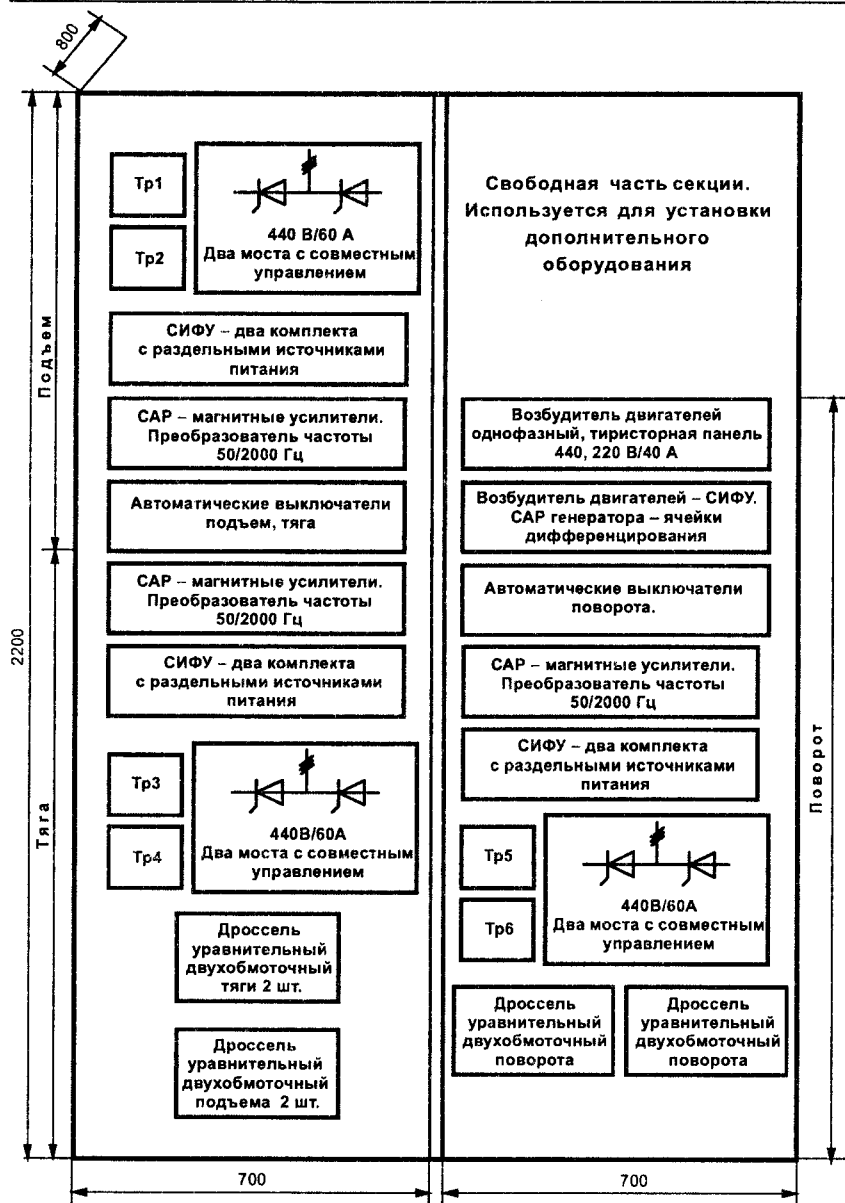
— полная заводская готовность, минимальные затраты на монтаж и наладку (каждое КТУВГЭ проходит предварительную наладку и испытание на стенде в схеме электропривода Г-Д);

— сокращение состава существующего оборудования, экономия электроэнергии и упрощение монтажа.

Силовая тиристорная часть у КТУВГЭ и возбуждателя РТВЭ экскаваторов, находящихся в эксплуатации, по принципиальной схеме, способу управления и конструкции выполнены одинаково. Уравнивающие дроссели КТУВГЭ разработаны с учетом ПВ экскаваторных электроприводов, имеют меньшие габаритные размеры, что позволило разместить их в самом тиристорном шкафу.

Одноканальная СИФУ трехфазного возбуждателя. В новых разработках используется одноканальная СИФУ, действующая на том же «горизонтальном» принципе. В ней вместо громоздких трёх индуктивно-емкостных фазорегуляторов магнитно-транзисторной СИФУ для управления трехфазным преобразователем используется всего один миниатюрный магнитный элемент — трансфазовращатель ТФ.

ТФ [5] представляет собой магнитный мост с разветвленным магнитопроводом из пермаллоя, на определенных участках которого размещены обмотки: входная, выходная, две управляющие и две обмотки, шунтированные резисторами, значение которых выбирается при заводской настройке. К входной обмотке подводится напряжение одной из фаз сети. При подмагничивании характер магнитных сопротивлений участков цепи изменяется, в результате чего напряжение выходной обмотки сдвигается по фазе, оставаясь при этом синусоидальным. Для управления однофазным преобразователем это напряжение с помощью двух компараторов преобразуется в две последовательности сигналов прямоугольной формы, из которых формируются управляющие импульсы нужной длительности.



Следует отметить, что СИФУ с тремя однофазными ячейками на базе трансфазовращателей впервые была успешно применена в трехфазных КТУ постоянного тока мощностью 1320 кВт электроприводов морских буровых установок СПБУ-600/100, ППБУ-6000/300, бурового судна [6], а также ряда других объектов, в том числе и КТУ реверсивных электроприводов опытного экскаватора ЭКГ-4,6 с системой ТП-Д [7].

В одноканальной СИФУ [8] для управления трехфазным преобразователем в две ее фазы вместо трансфазовращателей включены два фильтра RC в противофазе к выходной обмотке ТФ, нагруженной на резистивный делитель. Цепочки RC и резистивный делитель со средней точкой образуют два мостовых фазосмещателя, выходное напряжение которых сдвигается относительно напряжения выходной обмотки ТФ строго на угол +120° и -120°. Из полученного таким образом регулируемого по фазе трехфазного напряжения формируются управляющие импульсы длительностью 120°.

Конструктивно одноканальная СИФУ выполнена всего в двух стандартных ячейках с односторонним печатным монтажом: ЯФУ — ячейке фазового управления и ЯФИ — ячейке формирования трехфазного напряжения и управляющих импульсов. Ячейка фазового управления ЯФУ (рис.2) содержит трансфазовращатель в виде отдельного залитого в корпус блока управления фазой БУФ.

Как показал опыт эксплуатации КТУ на объектах, работающих в условиях искажения и глубоких провалов напряжения питающей сети, СИФУ на базе трансфазовращателей

обладает высокой надежностью, повышенной помехозащищенностью и стабильностью регулировочных характеристик при колебаниях напряжения сети по самому принципу действия ТФ (магнитный мост). В ней отсутствуют элементы, требующие в процессе эксплуатации подрегулировки. Для питания СИФУ не нужны прецизионные источники. Одноканальная СИФУ обеспечивает более высокую точность управления тиристорным преобразователем — разброс характеристик по фазам в рабочем диапазоне не более ±(1-2)°. Устройство более удобно в эксплуатации — фазировка управляющих импульсов с сетью производится одним фазосмещателем сразу для всех трех фаз преобразователя. В производстве СИФУ значительно проще, имеет меньшие габаритные размеры и стоимость.

Система автоматического регулирования (САР) выполнена по двухконтурной схеме с регуляторами напряжения генератора и тока на миниатюрных магнитных усилителях с питанием стабилизированным напряжением частотой 2000 Гц. Высокое быстродействие, малая мощность управления и абсолютная помехоза-

Рис.1. Комплексное тиристорное устройство возбуждения (КТУВГЭ) для управления электроприводами подъема и тяги (секция слева) и поворота (секция справа):

Tr1, 2 — трансформаторы собственных нужд

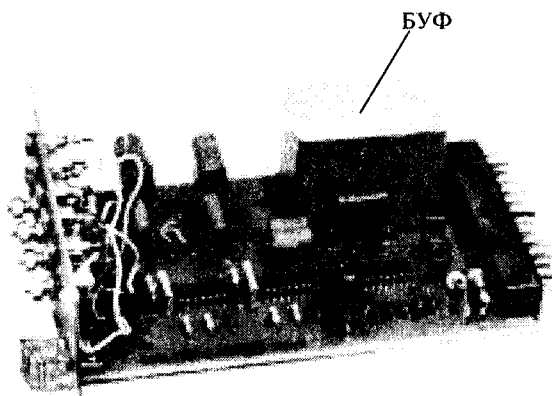


Рис.2. Ячейка фазового управления: БУФ — блок управления фазой (трансфазовращатель)

щищенность регуляторов снимают проблемы, связанные с устойчивостью электроприводов и обеспечением надежной гальванической развязки сигналов обратных связей по напряжению генератора и току главной цепи.

Блоки регулирования всех трех электроприводов практически одинаковы и содержат статический преобразователь частоты 50/2000 Гц и два регулятора, питающихся от него. Регуляторы выполнены на двух однотактных магнитных усилителях, включенных по простейшей схеме с дифференциальными балластными сопротивлениями на грузки для получения реверсивного выхода. Каждый регулятор размещается в заливом компаундом пластмассовом контейнере с габаритными размерами 88×37×54 мм. Будучи надежными и помехозащищенными устройствами, магнитные усилители при частоте питания 2000 Гц являются практически безынерционными устройствами.

Структурные схемы электроприводов подъема и тяги с КТУВГЭ приведены на рис.3 и в главном выполнены одинаково для обоих приводов. Контур тока РТ выполняет задачу ограничения стопорного тока. Его выходное напряжение подается на вход СИФУ. Регулятор РН контура напряжения генератора, — скорости двигателя, — имеет регулировочную характеристику с четким ограничением выходного напряжения. Максимальное напряжение регулятора РН задает стопорный ток привода. Линейная обратная связь по току снимается с компенсационных обмоток и обмоток дополнительных полюсов двигателя и генератора. При сильной обратной связи по напряжению РН всегда входит в ограничение, и стопорный ток для приво-

дов подъема и тяги остается неизменным независимо от задания скорости (положения КК — командоконтроллера). Две свободные обмотки управления регуляторов используются для формирования оптимальных статических характеристик данного привода путем введения обратной связи по напряжению на вход РТ и обратной связи по току на вход РН.

Структурная схема управления электроприводом поворота выполнена таким образом, что одновременно с заданием скорости для каждой ступени КК задается соответствующий ей стопорный ток двигателя. Возможно задание тока и скорости как с равномерной, так и неравномерной разбивкой по ступеням.

Таким образом, система управления электроприводом поворота обеспечивает в переходных режимах для каждой ступени КК поддержание заданного вращающего момента — небольшого для первой и увеличения его по ступеням до стопорного значения. При этом обеспечивается снижение ударных нагрузок в зубчатых передачах и плавное изменение скорости при пуске, реверсе и торможении поворотного механизма.

Изменение стопорного тока по ступеням кулачковых КК экскаваторов ЭШ-10/60 и ЭШ-10/70А осуществляется с помощью трех герконовых реле, подключенных к соответствующим клеммам контроллера. Суммарное сопротивление задающей обмотки РТ в схеме поворота состоит из нескольких последовательных резисторов МЛТ-2. При переключении КК контакт соответствующего реле шунтирует один из резисторов, увеличивая ток в задающей обмотке РТ и, следовательно, стопорный ток двигателя этой ступени.

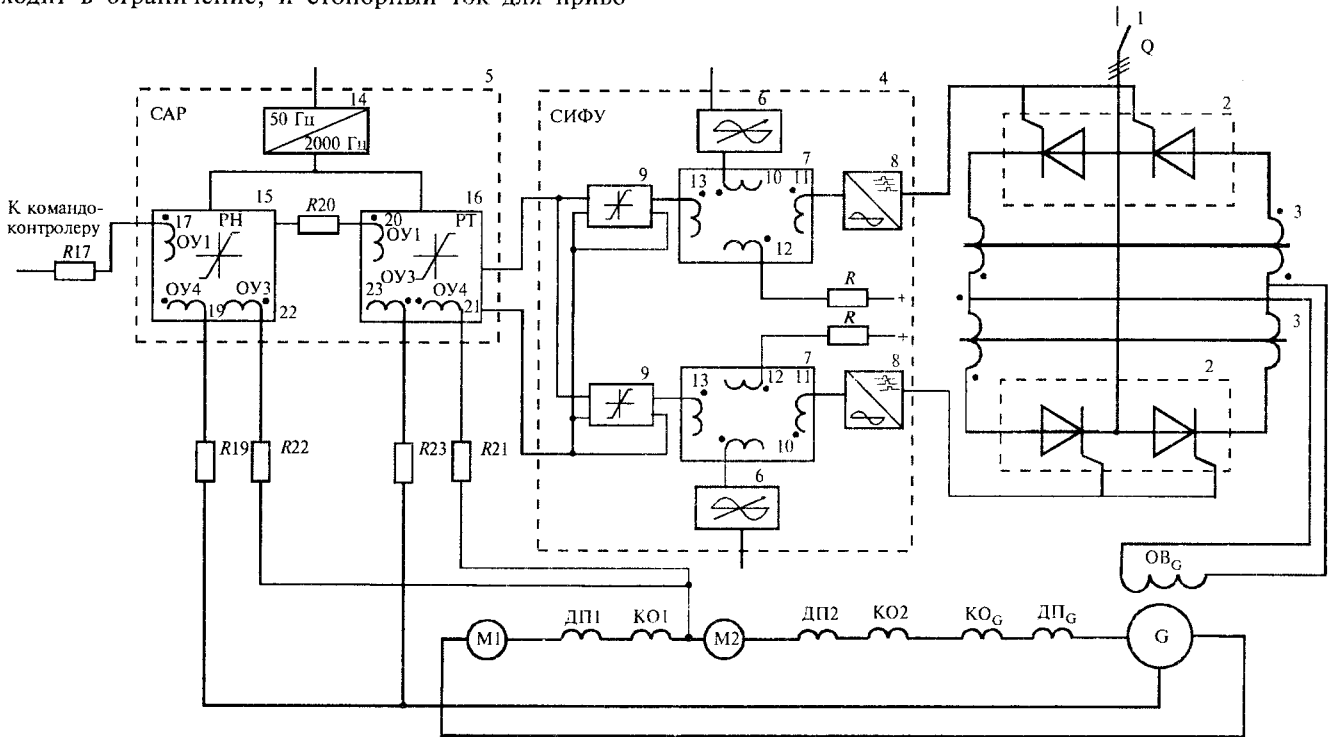


Рис.3. Структурная схема управления электроприводом подъема с КТУВГЭ:

1 — автоматический выключатель; 2 — тиристорные модули; 3 — уравнивательные реакторы; 4 — СИФУ реверсивная, одноканальная; 5 — блок регулирования частоты 50/2000 Гц; 6 — фазосмещатель; 7 — трансфазовращатель; 8 — ячейка формирования управляющих импульсов; 9 — электронный повторитель с ограничением сигнала; 10—13 — обмотки трансфазовращателя: входная, выходная, смещения, управления; 14 — преобразователь частоты 50/2000 Гц; 15, 16 — регуляторы напряжения РН и тока РТ; 17, 19, 22 — обмотки РН (задание, обратная связь по напряжению генератора, формирующая связь по току на РН); 20, 21, 23 — обмотки РТ (задание, обратная связь по току, формирующая связь по напряжению на РТ); R17, R19, R20, R21, R22, R23 — резисторы в цепях задания и обратных связей регуляторов; G — генератор подъема; OB_G — обмотки возбуждения генератора; M1, M2 — двигатели подъема

Наладка и испытания всех трех электроприводов с КТУВГЭ выполняются на специальном стенде Г-Д с учетом общих требований и особенностей работы данного механизма экскаватора. По своим параметрам электрические машины стенда (синхронный двигатель СДС-14-496, 800 кВт; генератор МП-151-8К, 600 кВт; двигатель МП-151-7, 900 кВт) достаточно близки к электрооборудованию экскаваторов ЭШ-10/60 и ЭШ-10/70А НКМЗ. Это позволило в заводских условиях при выполнении заказа реализовать реальные внешние статические характеристики электроприводов подъема, тяги и поворота и произвести испытания каждого из них в динамических режимах с реальными величинами стопорных токов.

При доводке и испытаниях на объекте заложенная в КТУВГЭ структура САР позволяет реализовать и другие варианты настройки регуляторов. Для этого на задней стороне блоков БР имеются панели с набором резисторов МЛТ-2 и конденсаторов для введения гибких обратных связей. Вся наладка электроприводов производится только на блоках БР.

Реверсивный возбудитель КТУВГЭ поставляется полностью налаженным на заводе и никаких регулировок в нем на объекте производить не требуется.

На рис.4 приведены внешние характеристики и осциллограммы переходных процессов электропривода подъема в режимах пуска, реверса и торможения. Там же показано действие на внешние характеристики положительной обратной связи по току на РН и совместного действия компаундирования и положи-

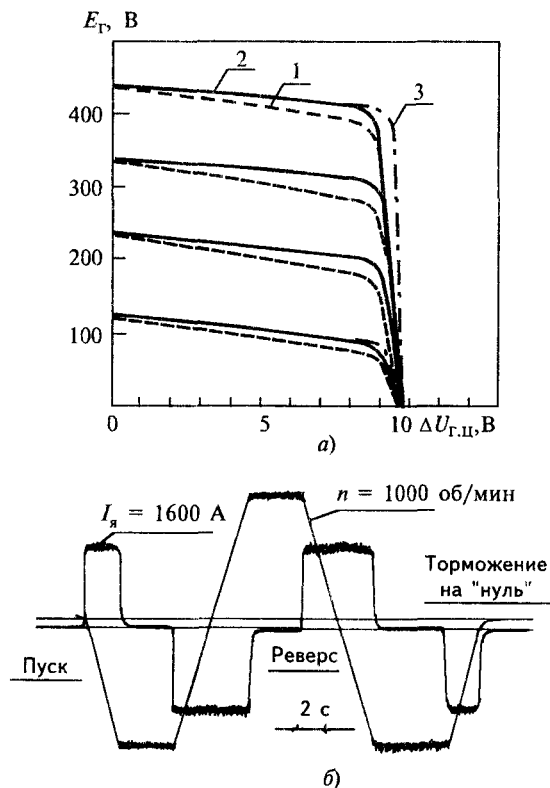


Рис.4. Электропривод подъема:
а — внешние характеристики по ступеням КК (1 — РН: $R17 = 1,37 \text{ кОм}$, $R19 = 650 \text{ Ом}$; РТ: $R20 = 720 \text{ Ом}$, $R21 = 1,7 \text{ кОм}$; формирующая связь $R22 = \infty$; 2 — то же, но введено компаундирование $R22 = 5,1 \text{ кОм}$; 3 — то же, но $R22 = 5,1 \text{ кОм}$, $R23 = 7,5 \text{ кОм}$); б — осциллограмма переходных процессов (пуск, реверс, торможение на "нуль", 4-я ступень КК, внешняя характеристика — 3)

тельной обратной связи по U_r , введенной на РТ. Идеальная прямоугольная форма тока на осциллограмме свидетельствует об устойчивости и высоких динамических свойствах электропривода.

Осциллограмма электропривода поворота при равномерной разбивке задания скорости и стопорного тока по ступеням КК приведена на рис.5,а. Разгон, реверс и торможение двигателя на них происходят более плавно, если сравнивать их с переходными процессами электропривода подъема. Схема выполнена таким образом, что для получения плавного реверса и торможения КК сначала переводится в любое положение из трех возможных: в первое положение прежнего направления "вперед", в нулевое положение (задание по скорости равно нулю) и первое положение направления "назад". В любом случае торможение происходит с моментом $M_r = 1/4 M_{ст}$. Затем КК переводится во 2, 3 или 4-е положение "назад" и реверсируется. Для полной остановки, когда скорость приближается к нулю, КК устанавливается в нейтральное положение.

На рис.5,б приведена осциллограмма поворота при неизменяемом задании стопорного тока по ступеням КК, но с введенной непосредственно на вход СИФУ отрицательной гибкой обратной связью по току двигателя — "чистой" производной, полученной с помощью дифференцирующей ячейки УБСР.

На объекте для плавного выбора зазоров в механизме поворота могут быть использованы и оба способа.

Комплектное тиристорное устройство возбуждения двигателей КТУВДЭ. Это устройство предназначено для замены на экскаваторах с ЭМУ и СМУ трехмашинных вспомогательных агрегатов. При этом достигается повышение надежности, снижение расходов на элект-

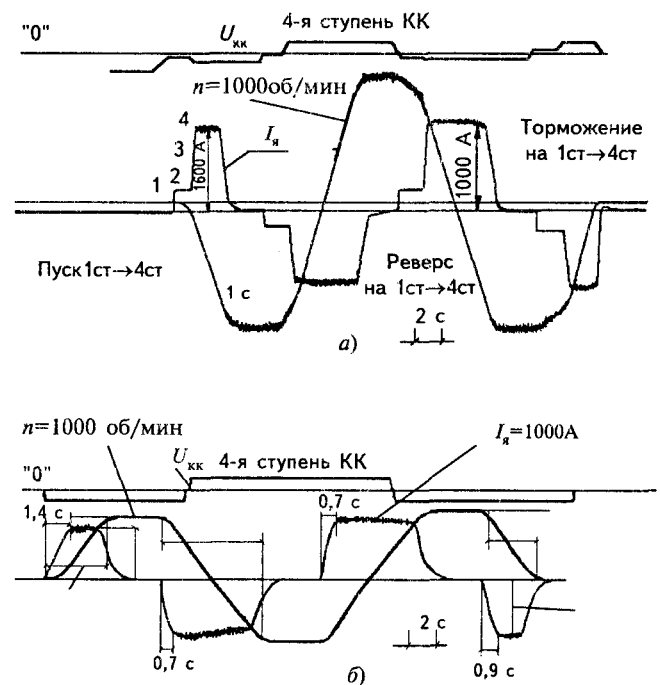


Рис.5. Осциллограммы электропривода поворота:
а — без гибких обратных связей при одновременном задании по ступеням КК скорости и стопорного тока; б — при задании постоянного значения стопорного тока и введенной «чистой» производной по току на вход СИФУ

троэнергию, обслуживание, ремонт электрооборудования. Комплексно поставляются пусковое сопротивление и два специальных выпрямительных трансформатора ТСЗП-25/07-УХЛ4 29 кВ·А с вторичными напряжениями 59 и 102 В при соответствующем соединении на клеммнике фазных обмоток.

Тиристорный шкаф с габаритными размерами 800×600×2000 мм состоит из двух полноуправляемых трехфазных преобразователей: ТП1 — возбудителя синхронного двигателя и ТП2 — источника стабилизированного напряжения для возбуждения двигателей постоянного тока. Обслуживание одностороннее.

Выходные параметры ТП1: максимальное выпрямленное напряжение 70 В, номинальный выпрямленный ток 315 А; ТП2: номинальные выпрямленное напряжение 115 В, выпрямленный ток 200 А.

Тиристорный возбудитель с обратной связью по току обеспечивает постоянство тока возбуждения СД независимо от его нагрева и колебаний напряжения сети. Тиристорный источник 115 В выполнен с обратной связью по напряжению.

КТУВДЭ проходит наладку на заводе и поставляется в полной готовности для монтажа.

Высокая надежность КТУВДЭ достигается благодаря использованию в нем мощных тиристоров с номинальными токами 800 и 630 А, естественного охлаждения, а также одноканальной СИФУ, о которой говорилось выше. КТУВДЭ сохраняет работоспособность при просадках напряжения сети (во время пуска главного агрегата экскаватора) до 50% $U_{с.ном}$.

Комплексное тиристорное устройство разгона главного преобразовательного агрегата КТУРАЭ. Устройство разгона агрегата (КТУРАЭ) разработано применительно к шагающим экскаваторам ЭШ-10/70А и ЭШ-10/60. При его использовании резко снижается пусковой ток СД и механические нагрузки в обмотках.

Шкаф разгона содержит: трехфазный силовой тиристорный преобразователь якоря (ТПЯ), автономный возбудитель (ТПВ) и релейно-контакторную часть схемы дистанционного управления и защиты. Питание обоих преобразователей осуществляется от трансформатора собственных нужд экскаватора. Габаритные размеры шкафа 800×600×2000 мм, охлаждение естественное, обслуживание двухстороннее.

Для разгона силовые контакторы главной цепи, установленные на экскаваторах этого типа, отключаются, и силовая цепь якоря генератора подключается к ТПЯ, а обмотка возбуждения к автономному возбудителю ТПВ.

В процессе всего разгона САР ТПЯ обеспечивает поддержание тока якоря на заданном уровне как при полном, так и ослабленном потоке генератора, вплоть до выхода синхронного двигателя на подсинхронную частоту вращения. Все переключения в схеме выполняются в бестоковые паузы.

Устройство КТУРАЭ может быть использовано также и на экскаваторах ЭКГ-12,5, ЭШ-15/90, ЭШ-15/90А и др. В этом случае для разрыва силовой цепи одного из электроприводов дополнительно поставляется силовой контактор с номинальными данными $I_n=2500$ А, $U_n=800$ В.

Основные параметры КТУРАЭ: напряжение питающей сети 380 В, номинальное выпрямленное напряжение, номинальный и допустимый (в течение 2,5 мин) выпрямленный ток ТПЯ — 500 В и 250 (500) А. Номинальные выпрямленные напряжение и ток ТПВ 440 В и 50 А.

По основным техническим решениям и конструктивам устройство разгона унифицировано с КТУВДЭ.

Варианты модернизации применительно к конкретной модели экскаватора. Наиболее простой и экономичный вариант модернизации для экскаваторов НКМЗ ЭШ-10/60 и ЭШ-10/70А заключается в замене на них соответственно ЭМУ или двух шкафов СМУ и вспомогательных трехмашинных агрегатов комплектными тиристорными устройствами КТУВГЭ (рис.1) и КТУВДЭ в базовом исполнении. При этом все релейно-контакторное оборудование экскаваторов, относящееся к возбуждению двигателей подъема тяги и СД, сохраняется.

Модернизация экскаватора ЭКГ-12,5 в наиболее простом варианте также сводится к замене существующего тиристорного шкафа возбуждения генераторов устройством КТУВГЭ (рис.1), а существующего шкафа возбуждения СД с тремя тиристорными блоками и магнитно-транзисторной СИФУ — более совершенным и надежным устройством КТУВДЭ без доработок. Питание обмоток возбуждения двигателей и релейно-контакторной аппаратуры экскаватора переключается на стабилизированный источник 115 В шкафа КТУВДЭ.

Упрощенная однолинейная схема модернизации экскаватора ЭШ-15/90А с четырехдвигательным приводом поворота и силовыми магнитными усилителями представлена на рис.6. Для замены трех генераторных шкафов со СМУ используется однокомплектное тиристорное устройство КТУВГЭ-1, в котором в секции поворота встроены: два полноуправляемых однофазных возбудителя, блок БВТ выравнивания токов в двух параллельных якорных цепях двигателя и блок БФУ — фазочувствительных устройств для сельсинных КК главных приводов. Обмотки возбуждения двигателей каждой параллельной цепи, соединенные последовательно, подключаются к своим возбудителям, выполненным по полноуправляемой мостовой схеме для форсированного управления как при усилении, так и ослаблении магнитного потока. Дифференциальный сигнал управления для выравнивания токов в параллельных ветвях двигателей поступает на входы СИФУ возбудителей с магнитных датчиков блока БВТ, подключенных к шунтам каждой ветви двигателей привода.

Для возбуждения синхронного двигателя главного агрегата и двигателей подъема и тяги используются устройства возбуждения в исполнении КТУВДЭ-1, в котором преобразователь ТП1 с мостовой выпрямительной схемой заменяется двумя трехфазными возбудителями с нулевой схемой выпрямления.

Таким образом, для модернизации действующих экскаваторов рассматриваемых типов все необходимое тиристорное оборудование в новых разработках размещается с возможными необходимыми доработками для некоторых вариантов (или без них) в двух шкафах с общими размерами по фронту 2200 мм, которые могут быть смонтированы на площадке, занятой существующим оборудованием, с сохранением в большинстве случаев внешнего монтажа.

По согласованию с заказчиком возможны и другие варианты компоновки шкафов. В частности, размещения комплектов возбудителей генераторов и двигателей постоянного тока каждого привода в отдельных шкафах с габаритными размерами каждого 700×600×2000 мм и при этом соответствующим уменьшением размеров шкафа возбуждения СД.

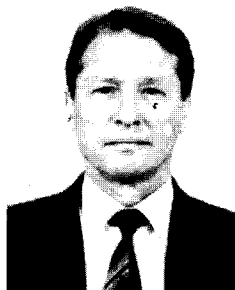
СПИСОК АВТОРОВ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ



Абрамов Борис Иванович — генеральный директор Московской энергосберегающей компании, первый заместитель генерального директора ОАО «Электропривод», директор НПЦ «Электронетфтегаз». Окончил электротехнический факультет Тюменского индустриального института в 1972 г. по специальности горный инженер-электрик.

Дрожжин Александр Сергеевич — начальник сектора ЦАГИ им.Н.Е.Жуковского. Окончил радиотехнический факультет МЭИ в 1978 г.

Авдийский Евгений Иванович — руководитель лаборатории НПЦ «Электронетфтегаз». Окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии им.Азизбекова по специальности инженер-электромеханик в 1961 г.



Дронов Александр Степанович — начальник отдела ОАО «Электропривод». Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1971 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование электромагнитных процессов в криотропных выпрямителях для питания СП индуктивных цепей».



Батанов Виктор Евгеньевич — руководитель испытательной лаборатории, эксперт по сертификации электротехники ОАО «Электропривод». Окончил факультет автоматики и измерительной техники Куйбышевского политехнического института в 1969 г.

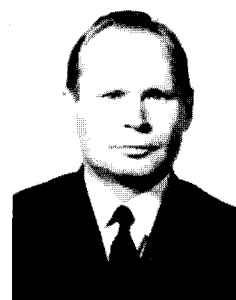


Иванов Валерий Владимирович — директор НПЦ ОАО «Электропривод». Окончил факультет электрификации Тимирязевской сельскохозяйственной академии в 1963 г.

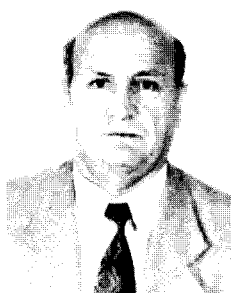
Брагилевский Евгений Лазаревич — директор НПЦ ОАО «Электропривод». Окончил АВТФ МЭИ в 1962 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и разработка электроприводов с фотоэлектрическим управлением для автоматизации производственных процессов» в 1982 г.



Иванов Гелий Михайлович — заместитель генерального директора ОАО «Электропривод». Окончил факультет ЗАПТФ МЭИ в 1957 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Разработка, исследование и промышленное внедрение многосвязных систем электроприводов технологических линий» в 1980 г.



Дацковский Лев Ханинович — директор НПЦ-12 «Электротехнические комплексы» ОАО «Электропривод». Окончил в 1957 г. факультет горной электромеханики Московского Горного института. В 1976 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование регулирования регулируемых электрических приводов горных механизмов, унифицированных на основе непосредственных преобразователей частоты» в Московском горном институте.



Ишханов Эдуард Павлович — директор НПЦ-47 ОАО «Электропривод», кандидат технических наук.

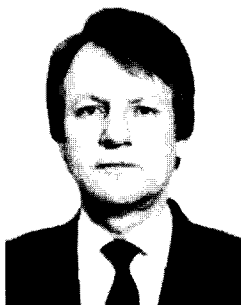


Католиков Виктор Ермолаевич — главный научный сотрудник ОАО «Электропривод». Окончил электромеханический факультет Московского горного института. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Исследования и разработка электроприводов шахтных подъемных машин».

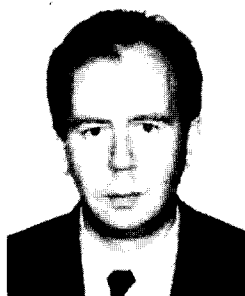


Кочегарова Любовь Михайловна — инженер, эксперт по сертификации электрооборудования ОАО «Электропривод». Окончила факультет электронных приборов и устройств Московского института электронного машиностроения в 1994 г.

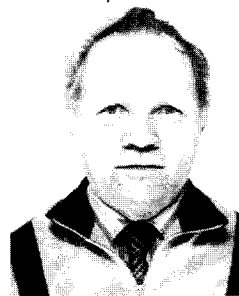
Коган Александр Иосифович — заместитель директора — начальник отдела бурового и горного электропривода НПЦ «Электроннефтегаз» ОАО «Электропривод». Окончил Московский институт нефтехимической и газовой промышленности им. Губкина по специальности автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов в 1966 г.



Кузнецов Григорий Дмитриевич — главный конструктор ОАО «Электровыпрямитель». Окончил Мордовский ГУ им. Н.П.Огарева в 1963 г.

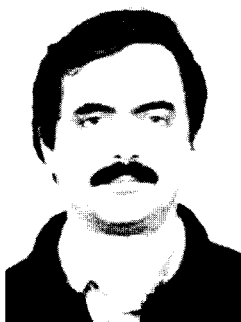


Кожakov Олег Игоревич — руководитель лаборатории НПЦ «Электроннефтегаз». Окончил Чувашский государственный университет им.И.Н.Ульянова по специальности электропривод и автоматизация производственных процессов в 1982 г.



Кузнецов Юрий Петрович — директор НПЦ ОАО «Электропривод». Окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1958 г.

Колин Владимир Валерьевич — ГУП «Ульяновский Машиностроительный завод». Окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института в 1981 г.



Кузнецов Иван Семенович — старший научный сотрудник ОАО «Электропривод». Окончил в 1963 г. факультет «Электрификация и автоматизация в промышленности и транспорте» МЭИ.



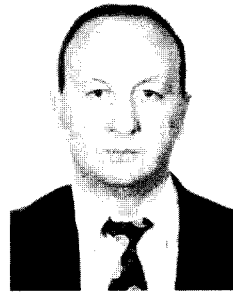
Колоколкин Александр Михайлович — ведущий научный сотрудник ОАО «ЭНИН им. Г.М.Кржижановского». Окончил ФРТК МФТИ в 1972 г. Кандидат техн.наук.



Лезнов Борис Семенович — заведующий лабораторией института «Водгео». Защитил докторскую диссертацию по теме «Энергосберегающие технологии переработки чистых и сточных вод» в 1999 г.



Лесниковский Александр Евгеньевич — ГУП «Ульяновский Машиностроительный завод». Окончил факультет электронной техники МЭИ в 1974 г.

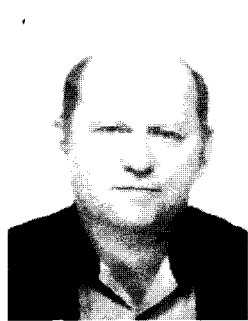
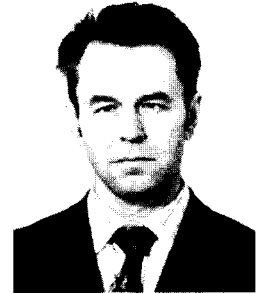


Павлов Василий Иванович — начальник отдела Главного энергетика ООО «Мострансгаза». Окончил в 1983 г. факультет «Энергоснабжение» Всесоюзного заочного политехнического института.

Моцохейн Борис Иосифович — ведущий научный сотрудник — руководитель группы НПЦ «Электронефтегаз» ОАО «Электропривод». Окончил Московский институт нефти и химии им. Губкина по специальности «Машины и оборудование нефтепромыслов» в 1957 г. В 1965 г. в АЗИНХ им.Азизбекова защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и выбор оптимальных параметров электроприводов подъемных систем буровых установок».



Парфенов Борис Михайлович — главный конструктор по электроприводу буровых и горных машин НПЦ «Электронефтегаз». Окончил Московский энергетический институт по специальности «инженер-электромеханик» в 1958 г. В 1976 г. в МИНХ и ГП защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследования электропривода буровой лебедки и определение его рациональных параметров».



Никифоров Евгений Александрович — заведующий лабораторией ОАО «Электропривод». Окончил ЭАПТФ МЭИ в 1975 г.

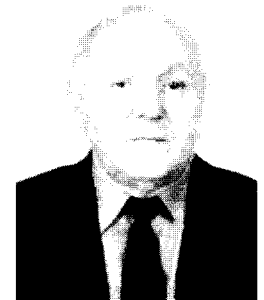


Портной Теодор Зиновьевич — главный специалист НПЦ «Электронефтегаз» ОАО «Электропривод». Окончил МЭИ по специальности «электромеханика» в 1941 г. В 1967 г. в АЗИНХ им.Азизбекова защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и определение рациональных систем электропривода основных механизмов буровых установок».

Павелка Иржи — профессор Чешского технического университета в г. Прага. Окончил в 1958г. электротехнический факультет Чешского технического университета. В 1982 г. защитил докторскую диссертацию «Проблематика систем возбуждения синхронных машин» в Чешском техническом университете.



Рейнгольд Юрий Рудольфович — старший научный сотрудник ОАО «Электропривод». Окончил факультет приборостроения МАИ в 1946 г. Кандидатскую диссертацию по теме «Исследования и методика расчета динамики экскаваторных электроприводов с электромашинными и магнитными усилителями» защитил в 1962 г.



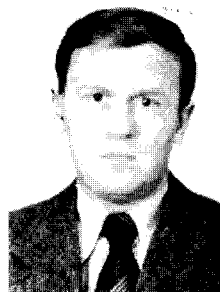
Павелка Павел — сотрудник отдела микропроцессорных регуляторов ЧКД, Промышленная Электроника г.Прага, Чешская Республика. Окончил в 1988 г. электротехнический факультет Чешского технического университета в г.Прага. В 1991 г. защитил кандидатскую диссертацию «Микропроцессорное управление вентильным приводом» в Чешском техническом университете.



Роговой Валерий Иосифович — старший научный сотрудник ОАО «Электропривод». Окончил в 1962 г. факультет «Электрификация железнодорожного транспорта» Московского института инженеров железнодорожного транспорта. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию «Некоторые вопросы динамики стабилизированных преобразовательных установок».



Румянцев Анатолий Николаевич — директор центра сертификации электрооборудования ОАО «Электропривод». Окончил электротехнический факультет Магнитогорского горно-металлургического института в 1959 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Аппараты защиты электротехнических объектов» в 1975 г.



Шевырев Юрий Вадимович — доцент Московской геолого-разведочной академии. Окончил Московский энергетический институт по специальности «Электропривод и автоматизация производственных механизмов». В МЭИ защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование буровых установок».

Федоров Александр Михайлович — директор НПЦ ОАО «Электропривод», доктор электротехники. Окончил в 1960 г. факультет «Технология машиностроения, станки и инструмент» Всесоюзного заочного машиностроительного института (ВЗМИ). Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Основы конструирования комплектных тиристорных электроприводов и низковольтных комплектных устройств управления электроустановками» в 1994 г.



Шныренков Александр Анатольевич — инженер ОАО «Электропривод». Окончил факультет железнодорожной автоматики телемеханики и связи Московского государственного университета путей сообщения в 1997 г.



Швец Сергей Александрович — старший научный сотрудник ОАО «Электропривод». Окончил электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института в 1959 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование самотормозящихся конусных двигателей» в 1971 г.



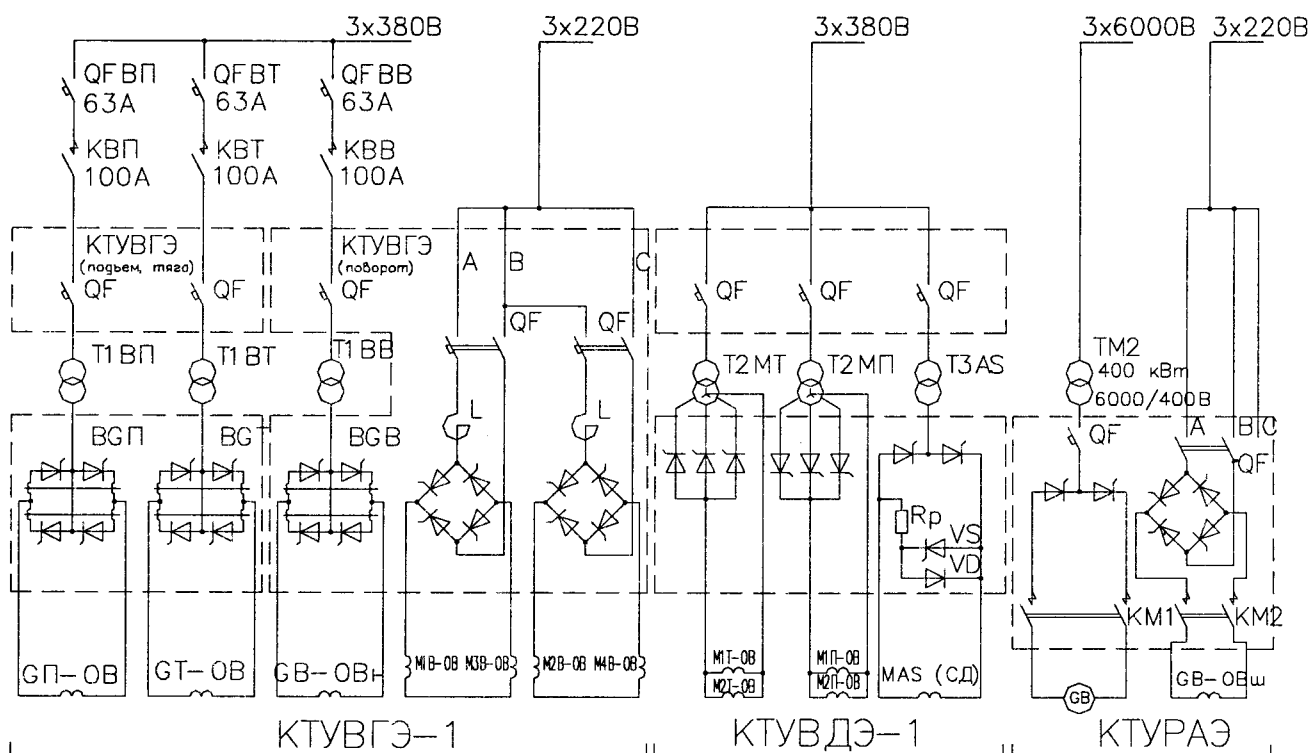


Рис.6. Упрощенная однолинейная схема модернизации экскаватора ЭШ-15/90А с четырехдвигательным приводом поворота: *T1BP, T1BT, T1BV* — трансформаторы ТСЗМ-16 380/230 В; *T2MT, T2MP* — трансформаторы ТСЗМ-25 380/230 В; *T3AS* — трансформатор ТСЗП-25/0,7 29,5 кВт 380/59 В

Комплектное тиристорное устройство разгона главного электромашинного агрегата является полностью автономным и для всех экскаваторов выполняется одинаково.

К настоящему времени находятся в эксплуатации 25 комплектов КТУВДЭ, 4 шкафа КТУРАЭ, изготовлены и отгружены заказчику 2 комплекта КТУВГЭ для модернизации экскаваторов ЭШ-10/60 и ЭШ-10/70А. Ввод в действие комплектных устройств производился местным персоналом. За время эксплуатации (некоторых образцов КТУВДЭ в течение более 6 лет) рекламаций не поступало.

Список литературы

1. А.с. 126940/Ефанов А.Г., Козлов Н.Г., Рейнгольд Ю.Р., Ярцев Г.М.//Открытия. Изобретения. 1960. №6.
2. А.с. 251070/Рейнгольд Ю.Р., Кочетков В.Д., Павлович А.Г. //Открытия. Изобретения. 1969. №27.
3. Комплектные устройства управления электроприводами, Устройства комплектные тиристорные с магнитно-транзисторной системой управления мощностью до 250 кВт для

управления электроприводами постоянного тока. Каталог. М.: Информэлектро. 08.08.04-74.

4. Мамкин В.М., Ольховиков Б.В., Кошкарёв А.В., Розенцвайг А.Б. Автоматизированный электропривод карьерных и шагающих экскаваторов Уралмашзавода//Горный журнал. 1983. №6. С.22—24.
5. Задерей Г.П. Многофункциональные магнитные радиокомпоненты, М.: Советское радио, 1980.
6. Рейнгольд Ю.Р., Бенедиктов А.А., Кленчева Т.С., Коган А.И. Комплектные тиристорные устройства для управления электроприводами технологических механизмов морских буровых установок//Электротехническое производство. 1990. Вып. 9 [33].
7. Проведение эксплуатационных испытаний опытного образца комплектного тиристорного устройства для питания, управления и защиты главных электроприводов экскаватора ЭКГ-4,6 Вольногорского ГМК//Сборник рефератов, НИР и ОКР. Энергетика. 1986. №22. С. 20.
8. Пат. 2012984, C1 RU. Устройство для импульсно-фазового управления трехфазным тиристорным преобразователем/Рейнгольд Ю.Р., Кленчева Т.С., Бенедиктов А.А., Шухтерева Г.С.

Производство всех исполнений КТУ организовано на Московском заводе “Электропривод”. Заявки на поставку можно присылать по адресу: 107078, г. Москва, Садовая-Спасская ул., д. 1/2, корп. 2, Генеральному директору Кочеткову В.Д. (для НПЦ-12 Рейнгольду Ю.Р.), телетайп АТА-113339 “Дуга”, факс 208-26-23.

Методы выбора параметров фильтро-компенсирующих устройств ступенчатого типа для тиристорных электроприводов в системах соизмеримой мощности

АБРАМОВ Б.И., ПАРФЕНОВ Б.М., ШЕВЫРЕВ Ю.В.

Основные технические проблемы, возникающие при применении тиристорного электропривода в системах, где мощность тиристорных преобразователей (ТП) соизмерима с мощностью источников электроэнергии, определяются тем, что в рабочих режимах снижается напряжение питания электроприводов, возрастает потребление реактивной мощности, повышается содержание высших гармоник в напряжении сети. Эти явления, в свою очередь, отрицательно влияют как на характеристики самих ТП, так и на условия работы другого электрооборудования того же и смежных объектов. В расчетах необходимо учитывать технические данные источников электроснабжения и линий питания, а также параметры режимов всех основных потребителей системы. Наиболее сложен учет параметров конкретных режимов нагружения полупроводниковых преобразователей, входящих в систему, которые в общем случае могут действовать в различных режимах — в зависимости от технологических нагрузок объекта.

На первых стадиях внедрения тиристорного электропривода в системах соизмеримой мощности было распространено мнение, что для обеспечения приемлемого качества его работы необходимо, чтобы мощность системы электроснабжения многократно превышала мощность тиристорных электроприводов. В связи с этим ОАО "Электропривод" (ранее ВНИИЭлектропривод) с участием МЭИ, ЦНИИСЭТ и ряда других организаций и специалистов были выполнены рабо-

ты, обеспечившие создание работоспособных тиристорных электроприводов постоянного тока для условий соизмеримой мощности, в том числе и создание не вполне совершенных, но сравнительно простых фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) [1].

В связи с многообразием действующих факторов, при практических разработках признано целесообразным проводить исследования систем электропривода и ФКУ в два этапа. На первом этапе, на основе упрощенных расчетов ряда статических режимов, выбираются два-три режима, наиболее тяжелых с точки зрения отклонения напряжения питания на вводе установки, реактивной мощности и коэффициента несинусоидальности напряжения, для которых предварительно выбираются общие параметры ФКУ.

На втором этапе выполняются проверочные расчеты для любых режимов по всем интересующим энергетическим показателям. В случае неудовлетворительного результата, следует скорректировать параметры ФКУ и повторить расчеты по той же программе, что практически требует весьма небольших затрат времени.

Рассмотрим достаточно типичную систему электропривода с питанием от источника соизмеримой мощности, схема которой показана на рис.1. Отличительной особенностью данной схемы является наличие на вторичной стороне главных трансформаторов общих шин переменного тока, к которым подключены все главные ТП и все ФКУ. Тиристорные электроприводы главных механизмов ЭП2, ЭП4, ЭП6 в общем случае могут работать в различных режимах. Вспомогательные электроприводы ЭПВ содержат в основном асинхронные электродвигатели и нагрузки в виде активных сопротивлений.

Традиционные методы расчета подобных систем (например, [2]) приближенно учитывают сложную структуру системы и одновременно работы нескольких ТП, что может привести к существенным погрешностям.

В настоящей работе предложена более точная методика, учитывающая сложную структуру системы, наличие нескольких одновременно работающих тиристорных преобразователей, коммутацию тиристорных преобразователей, коммутацию тиристорных преобразователей, математическая модель разработана на основных теоретических положениях, которые применялись ранее для исследования линий электропередач постоянного тока [3] и тиристорных электроприводов автономных морских буровых установок [4]. Отметим, что в [4] внесены уточнения, обеспечивающие учет пульсаций выпрямленного тока. Принятая модель основана на использовании метода узловых потенциалов для комплексных величин, включая высшие гармоники тока и напряжения.

Схема замещения для расчета энергетических характеристик представлена на рис.2. Все электрические параметры выражаются в комплексной форме и приводятся к номинальному напряжению 6 кВ. Мощность

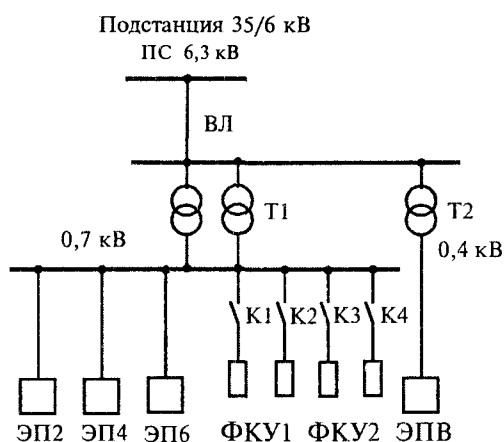


Рис.1. Схема системы электроснабжения объекта:

ПС — питающая подстанция; ВЛ — высоковольтная линия; Т1 — трансформаторы питания главных электроприводов (два трансформатора, соединенные параллельно); Т2 — трансформатор питания вспомогательных электроприводов; ЭП2, ЭП4, ЭП6 — главные тиристорные электроприводы постоянного тока; ЭПВ — электроприводы вспомогательных механизмов; ФКУ-1, ФКУ-2 — фильтро-компенсирующие устройства К1—К4 — контакторы ступеней ФКУ (номера контакторов соответствуют номерам ступеней ФКУ)

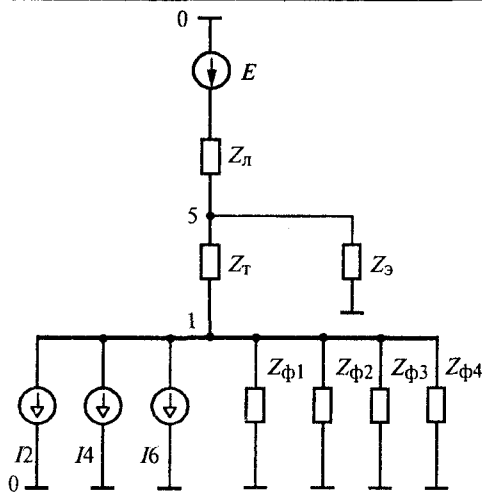


Рис.2. Схема замещения системы

источника на выходе подстанции 35/6 кВ, т.е. в начале линии, принимается бесконечной.

Схема замещения содержит:

источник синусоидальной ЭДС бесконечной мощности E ;

комплексное сопротивление $z_L = r_L + jx_L$ линии электропередачи 6 кВ;

комплексное сопротивление $z_T = r_T + jx_T$ двух параллельно включённых силовых трансформаторов;

комплексное сопротивление $z_3 = r_3 + jx_3$, учитывающее влияние вспомогательных электроприводов на сеть;

комплексные сопротивления 1-й и 3-й ступеней ФКУ, настроенные (в данном примере) на пятую гармонику $z_{\phi 1} = r_{\phi 1} + j(x_{L1} - x_{C1}/h)$ и $z_{\phi 3} = r_{\phi 3} + j(x_{L3} - x_{C3}/h)$;

комплексные сопротивления 2-й и 4-й ступеней ФКУ, настроенных (в данном примере) на седьмую гармонику $z_{\phi 2} = r_{\phi 2} + j(x_{L2} - x_{C2}/h)$ и $z_{\phi 4} = r_{\phi 4} + j(x_{L4} - x_{C4}/h)$;

источники тока I_2, I_4, I_6 , которые учитывают влияние тиристорных электроприводов постоянного тока на сеть.

Наличие тиристорных электроприводов постоянного тока приводит к искажению напряжения в системе электроснабжения, в результате чего на стороне переменного тока появляются высшие гармоники напряжения и тока. В установившемся режиме все токи и напряжения являются периодическими функциями времени и их можно разложить в ряды Фурье в комплексной форме. Если предположить, что внешняя по отношению ко всем преобразователям трёхфазная электрическая сеть обладает линейными параметрами и симметрична, то, согласно принципу наложения, расчёт схемы производят для каждой комплексной амплитуды ряда Фурье отдельно, после чего можно найти реальные токи и напряжения в системе, рассчитать энергетические показатели.

Составим по методу узловых потенциалов уравнения для схемы замещения, представленной на рис.2. Данная схема содержит два независимых узла — 1 и 5. Согласно методу узловых потенциалов для точек 1 и 5 сети переменного тока для произвольной h -й гармоники можно записать следующие алгебраические уравнения:

$$\varphi_{5h} G_{55h} + \varphi_{1h} G_{51h} = E_h G_{50h}; \quad (1)$$

$$\varphi_{1h} G_{11h} + \varphi_{5h} G_{15h} = -I_{2h} - I_{4h} - I_{6h}. \quad (2)$$

Здесь $\varphi_{1h}, \varphi_{5h}$ — комплексные амплитуды гармоник потенциалов 1 и 5 узлов; E_h — комплексная амплитуда гармоники ЭДС системы; I_{2h}, I_{4h}, I_{6h} — комплексные амплитуды гармоник фазных токов со стороны переменного напряжения тиристорных преобразователей; $G_{11h}, G_{55h}, G_{15h}, G_{51h}, G_{50h}$ — коэффициенты, которые находятся по следующим формулам:

$$G_{11h} = 1/(r_T + jhx_T) + 1/(r_{\phi 1} + j(hx_{L1} - x_{C1}/h)) + 1/(r_{\phi 2} + j(hx_{L2} - x_{C2}/h)) + 1/(r_{\phi 3} + j(hx_{L3} - x_{C3}/h)) + 1/(r_{\phi 4} + j(hx_{L4} - x_{C4}/h));$$

$$G_{55h} = 1/(r_L + jhx_L) + 1/(r_T + jhx_T) + 1/(r_3 + jhx_3);$$

$$G_{15h} = G_{51h} = -1/(r_T + jhx_T);$$

$$G_{50} = 1/(r_L + jhx_L).$$

Для случая симметричной трёхфазной электрической цепи, при линейных характеристиках всех пассивных элементов, комплексные амплитуды фазных токов со стороны питания каждого i -го тиристорного преобразователя находятся по формуле, приведенной в [3,4]

$$I_{ih} = \frac{(1 - \exp(-jh\pi))(1 - \exp(-jh\rho))}{4\pi h x_{pi}} \times \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} U_{mk} \frac{(\exp(jk\rho) - 1) \exp[j(k-h)(\tau_{0i} + \alpha_i)]}{k-h} \times [\exp(j(k-h)\gamma_i) - 1] \right\}. \quad (3)$$

Здесь I_{ih} — комплексная амплитуда фазного тока i -го ТП, подключённого к узлу сети переменного тока, номер которого равен m (в данном случае узлы 1 и 5); U_{mk} — комплексная амплитуда k -й гармоники фазного напряжения в узле сети переменного тока, номер которого равен m ; X_{pi} — индуктивное сопротивление сетевого реактора i -го ТП; α_i — угол управления i -го ТП; γ_i — угол коммутации i -го ТП; $\tau_{0i} = \pi/6$ — момент прохождения через нуль первой гармоники линейного напряжения фаз A и C в узле m , относительно которого ведётся отсчёт угла управления i -го ТП; $\rho = 2\pi/3$ — сдвиг фаз напряжений в трёхфазной системе.

В исследуемой системе применяются трёхфазные мостовые преобразователи. Поэтому токи и напряжения в трёхфазной цепи содержат гармоники, номера которых удовлетворяют условию $h = 6n \pm 1$, где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Уравнения (1) и (2) записываются для всех гармоник, для которых справедливо данное условие. Полученная система уравнений полностью описывает установившиеся процессы в системе электроснабжения.

При решении системы уравнений (1) и (2) возникает трудность, связанная с тем, что коэффициенты в уравнениях зависят от углов управления α_i и коммутации γ_i . Эти углы в общем случае неизвестны. В то же время в тиристорных электроприводах постоянного тока заданными величинами являются средние зна-

чения выпрямленных токов I_{di} и напряжений U_{di} . Между этими значениями и углами управления α_i и коммутации γ_i существует нелинейная функциональная зависимость, которая описана в [3,4]:

$$U_{di} = \sum_{h=-\infty}^{\infty} U_{mh} \frac{(\exp(jh\rho) - 1) \exp[jh(\tau_{0i} + \alpha_i)]}{2j\rho h} [\exp(jh\gamma_i) + 1]; \quad (4)$$

$$I_{di} = \frac{1}{4x_{pi}} \sum_{h=-\infty}^{\infty} U_{mh} \frac{(1 - \exp(jh\rho))}{jh} \times [\exp(jh(\tau_{0i} + \alpha_i + \gamma_i)) - \exp[jh(\tau_{0i} + \alpha_i)]]; \quad (5)$$

Отметим, что формулы (3)–(5) получены для случая идеально сглаженного выпрямленного тока и могут использоваться при решении задач настоящей работы. В более общем случае должны использоваться точные, но весьма громоздкие формулы, приведенные в [4].

При нахождении высших гармоник напряжения необходимо решать нелинейную систему уравнений (1)–(5). Очевидно, предварительно необходимо задаваться начальными значениями неизвестных φ_{1h} , φ_{5h} для всех действующих гармоник h , углами управления α_i и коммутации γ_i для всех ТП. Система уравнений (1), (2) содержит бесконечное число неизвестных. Поэтому необходимо ограничиться конечным числом высших гармоник напряжения. В настоящей работе учитываются высшие гармоники до 19-й включительно. Тем самым бесконечная система уравнений (1), (2) превращается в конечную.

При решении уравнений (1)–(5) заданными являются комплексная амплитуда первой гармоники ЭДС на выходе подстанции и сопряжённая к ней:

$$E_{+1} = E_{\max} \exp(-j\pi/2); \quad E_{-1} = E_{\max} \exp(j\pi/2).$$

Все высшие гармоники ЭДС источника питания (подстанции) равны нулю.

На основании предложенной математической модели разработана программа расчета на ЭВМ уравнений рассматриваемой системы электроприводов, учитывающая ее сложную структуру, одновременную работу нескольких ТП и наличие ФКУ. Эта программа позволяет выполнить расчёты напряжений и токов, полной, активной и реактивной мощностей системы электроприводов (в точке ввода БУ), коэффициента мощности системы, коэффициента несинусоидальности и т.д. при различной длине питающей линии 6 кВ и разным числе включённых ступеней ФКУ.

Предлагаемые методы расчета рассматриваются на примере системы электропривода буровой установки БУ-3900 ЭПКБМ, питающейся от электрической сети. Выбор такого примера неслучаен, поскольку первыми объектами для применения силового тиристорного электропривода в системах соизмеримой мощности были морские буровые установки с автономным питанием и наземные установки сверхглубокого бурения. Эти установки и до настоящего времени остаются наиболее типичными объектами применения рассматриваемого класса систем электропривода.

Электропривод буровых установок (БУ) имеет следующие специфические особенности, затрудняющие выбор ФКУ:

— переменный характер нагрузок в течение суток от относительно спокойных режимов бурения до по-

вторно-кратковременных нагрузок при спуске и подъеме бурильной колонны;

— значительные изменения уровня максимальных нагрузок в течение более длительных интервалов времени в зависимости от текущей глубины скважины;

— на электрических установках (питаемых от электрических сетей) мощность нагрузки, фактически допустимая для источника питания, зависит от длины высоковольтной линии (т.е. от удаленности установки от центра питания);

— на дизель-электрических установках (питаемых от автономных дизель-электростанций) мощность нагрузки, фактически допустимая для источника питания, зависит от числа дизель-генераторов, вводимых в работу, и т.д.

В настоящее время та же проблема возникла в несколько иной постановке. Электрические буровые установки располагаются обычно на расстоянии от подстанций 5–6 км, на что и рассчитывается их электрооборудование. Сейчас в целях разведки и освоения более удаленных месторождений необходимо обеспечить работоспособность буровой установки с питанием от существующих маломощных линий длиной до 10–12 км, а по возможности и большей длины, без строительства новых линий электропередач. Очевидно, эта проблема может быть решена только за счет наиболее рационального выбора ФКУ, что должно обеспечить существенный технико-экономический эффект за счет экономии капитальных затрат.

Конкретные технические данные приняты в соответствии с техническим проектом системы электропривода БУ-3900 ЭПКБМ, выполненным ОАО "Электропривод". В наиболее тяжелых режимах (в которых имеет место наибольшая реактивная мощность) работают тиристорные электроприводы буровых насосов ЭП2 и ЭП4, получающие питание от системы электроснабжения 6 кВ через два параллельно включённых главных трансформатора Т1 мощностью по 1600 кВ·А, вторичное напряжение на общих шинах равно 0,709 кВ. По ряду технико-экономических соображений на буровых установках используются только трехфазные мостовые ТП. Работают также вспомогательные электроприводы ЭПВ, питаемые через трансформатор Т2 напряжением 0,4 кВ.

К общим шинам (на выходе трансформаторов Т1) могут быть подключены два фильтро-компенсирующих устройства ФКУ-1 и ФКУ-2. Каждое ФКУ содержит две ступени, т.е. два LC-фильтра, настроенных в резонанс на 5-ю и 7-ю гармоники тока.

По согласованию с энергетическими службами эксплуатирующих организаций (заказчиков) принято, что на вводе БУ допускается отклонение напряжения от номинального в пределах $V = (+5\%) \div (-15\%)$. Последняя цифра несколько больше, чем определено стандартом [5] (–10%), однако это считается допустимым, поскольку расчетный узел является внутренним узлом нефтепромышленной сети, а электрооборудование установки спроектировано с учетом повышенных отклонений напряжения.

В качестве основного требования к системе в целом принято условие, что с увеличением длины питающей линии должны сохраняться неизменными параметры расчетного технологического режима, т.е. скорости, моменты и мощности главных электроприводов.

На первом этапе проведены расчеты потребляемых мощностей в различных режимах работы при номинальном питающем напряжении, без включения ФКУ, и выбран наиболее тяжелый режим (турбинное бурение двумя насосами), в котором потребляемая активная мощность главных электроприводов равна 1340 кВт, вспомогательных электроприводов — 300 кВт. На вводе БУ имеют место суммарные мощности системы:

- активная мощность 1640 кВт;
- реактивная мощность 990 квар (индуктивная);
- полная мощность 1915 кВ·А;
- коэффициент мощности по первой гармонике 0,856.

Заметим, что длительность такого режима относительно невелика и составляет не более 5% в общем балансе времени работы установки, в связи с чем для данного режима в соответствии со стандартом [5] допускаются установленные предельные нормы энергетических показателей. Остальные режимы работы — более легкие, и в них могут быть получены лучшие энергетические показатели.

Предварительным расчетом установлено, что суммарная мощность ФКУ должна быть приблизительно 1000 квар, и выбраны два ФКУ со следующими параметрами элементов. В каждом из четырёх фильтров используется по два (на фазу) параллельно включенных конденсатора типа КЭК2-0,5-75 УХЛ2, с соединением трех фазных групп в звезду. Номинальные параметры одного конденсатора: напряжение — 0,5 кВ, мощность — 75 квар, ёмкость — 955 мкФ. В фильтре 5-й гармоники используется в каждой фазе реактор с индуктивностью 0,24 мГн, в фильтре 7-й гармоники — реактор с индуктивностью 0,12 мГн.

Суммарная номинальная реактивная мощность одного ФКУ равна 900 квар, но фактически реализуемая реактивная мощность одного ФКУ, с учетом принятого коэффициента запаса по напряжению (30%), составляет 520 квар. Соответственно общая реактивная мощность двух ФКУ равна 1040 квар, что и требовалось.

На втором этапе при помощи разработанной программы были осуществлены на ПЭВМ расчеты отклонения первой гармоники напряжения сети от номинального (V), значений активной (P), реактивной (Q) и полной (S) мощностей на вводе БУ, коэффициента мощности по первой гармонике ($\cos\varphi_1$), коэффициента несинусоидальности напряжения сети (K_H), а также линейного тока системы (I_c) и линейного напряжения системы ($U_{в.л.}$) при переменной длине $L_{в.л.}$ питающей высоковольтной линии 6 кВ, с учетом различного числа включённых ступеней ФКУ. Найдены также значения токов первой и высших гармоник, протекающих через ФКУ; токи находятся в допустимых пределах.

Результаты расчетов, содержащиеся в полном объеме в электронном отчете, могут быть представлены в различном виде. Реальные алгоритмы управления включением и отключением ступеней ФКУ могут быть различными и определяются при конкретном проектировании. Поскольку главной задачей настоящей работы считается поддержание в заданных пределах отклонения напряжения на вводе БУ, целесообразно представить результаты в условном виде как графики

зависимости основных энергетических показателей от длины линии, приведенные на рис.3. При этом для наглядности принято, что напряжение на выходе подстанции равно 6,3 кВ, т.е. повышено на 5% по отношению к номинальному (что необходимо для максимальной длины линии), и сохраняется неизменным.

Условно принят следующий порядок подключения ступеней ФКУ:

- в точке нулевой длины линии включена одна первая ступень ФКУ;
- с увеличением длины линии, а соответственно, и снижением напряжения на вводе БУ каждая после-

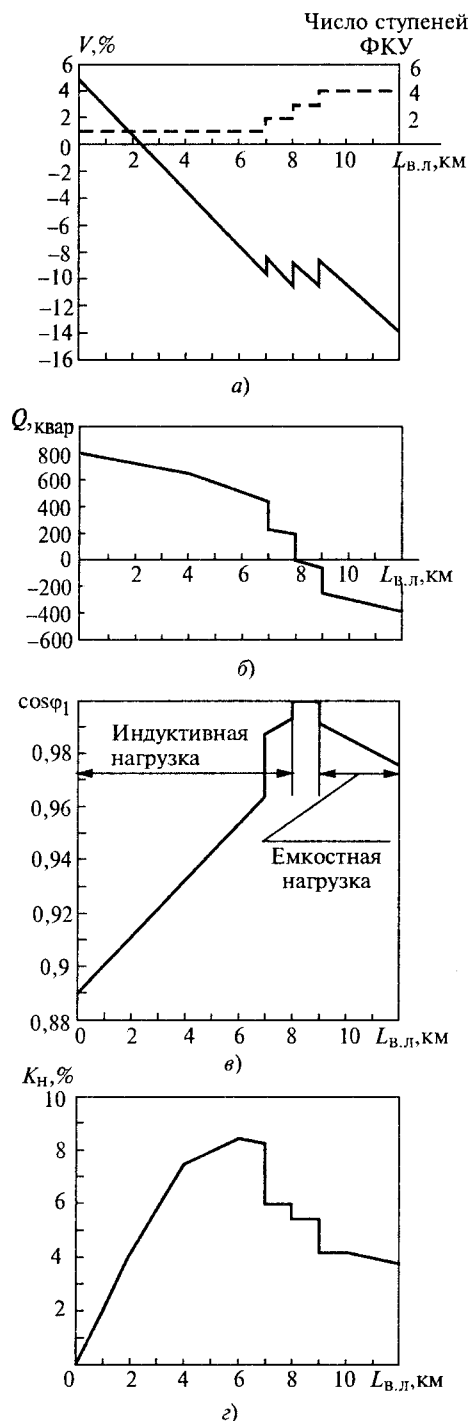


Рис.3. Графики изменения энергетических показателей в зависимости от длины высоковольтной линии

дующая ступень ФКУ включается после снижения напряжения на 10% по сравнению с номинальным значением (число включенных ступеней ФКУ показано на рис.3,а пунктирной линией).

Кратко рассмотрим полученные графики. При одной включенной ступени ФКУ и увеличении длины линии до 7 км отклонение напряжения достигает $V = -10\%$, включается вторая ступень ФКУ. Затем с увеличением длины на каждый 1 км включаются последующие ступени ФКУ. После того, как все четыре ступени включены, с увеличением длины линии напряжение снижается, максимально допустимое отклонение напряжения (приблизительно $V = -15\%$) достигается при длине линии 12 км.

Реактивная мощность Q на вводе установки (рис.3,б) сначала имеет индуктивный характер, величина ее уменьшается с ростом длины линии. Это объясняется тем, что система автоматического регулирования уменьшает угол открытия тиристоров α . Коэффициент мощности $\cos\varphi_1$ (рис.3,в) также имеет индуктивный характер и постепенно увеличивается. После достижения длины 8 км обе эти величины приобретают емкостный характер. Таким образом, производится некоторая "перекомпенсация" реактивной мощности на вводе БУ, в результате чего достигается наименьшее общее падение напряжения в линии.

Коэффициент несинусоидальности K_n при нулевой длине линии равен нулю, затем возрастает и при длине 5—7 км достигает примерно 8% (при указанном выше порядке включения ФКУ), что соответствует предельно допустимой норме по стандарту [5]. Далее K_n уменьшается за счет следующих факторов:

— на участке от 7 до 9 км подключаются дополнительные ступени ФКУ;

— при снижении напряжения система автоматического регулирования уменьшает угол открытия тиристоров α , в связи с чем уменьшается искажающее влияние тиристорной нагрузки.

В целях уменьшения коэффициента несинусоидальности, очевидно, при реальной работе возможно выбрать такой алгоритм управления, чтобы ступени ФКУ включались при возрастании K_n до желаемого уровня (например, 5%) независимо от отклонения напряжения.

Анализ графиков показывает (рис.3), что в случае дальнейшего увеличения длины линии необходимо либо уменьшать нагрузку электроприводов, либо увеличивать количество ФКУ. Так, дополнительные расчеты показали, что при длине линии 14 км следует уменьшить мощность электроприводов на 10—12% или ввести в работу третьи ФКУ. Оба эти мероприятия являются реально осуществимыми.

Однако при дальнейшем увеличении длины линии (более 15 км) обеспечить нормальную работу установ-

ки практически уже невозможно, необходимо увеличить сечение проводов линии или выполнить другие мероприятия для повышения реальной мощности источника питания.

Выводы

1. Предложена методика расчета режимов ФКУ ступенчатого типа для систем тиристорного электропривода постоянного тока при питании от источников соизмеримой мощности в целях обеспечения работоспособности электропривода при выполнении установленных ограничений по отклонению напряжения, реактивной мощности, несинусоидальности напряжения и по другим показателям.

Методика обеспечивает достаточную точность расчетов, что подтверждено сравнением результатов расчета с экспериментальными данными, полученными ОАО "Электропривод" при промышленных испытаниях электроприводов морских буровых установок.

2. Показано, что за счет рационального использования ФКУ возможно обеспечение работоспособности систем тиристорного электропривода постоянного тока с номинальной мощностью приблизительно до 70% мощности источника питания, что ранее считалось реально неосуществимым.

3. Приведен пример использования методики для одной из достаточно сложных реальных задач применительно к электроприводу буровой установки с питанием от длинной линии ограниченной мощности. Показано, что при правильном выборе ФКУ возможно обеспечить нормальную работу установки при длине линии, более чем в два раза превышающей общепринятые в настоящее время нормы.

4. Предложенная методика в течение ряда лет успешно используется ОАО "Электропривод" при разработке и внедрении систем электропривода буровых установок и даёт существенный технико-экономический эффект.

Список литературы

1. Парфенов Б.М., Шевырев Ю.В., Шинянский А.В. Тиристорные электроприводы главных механизмов буровых установок в системах электроснабжения соизмеримой мощности. Обзорная информация. М.: Информэлектро, 1984.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1974.
3. Андреюк В.А. Метод расчета статических характеристик электропередачи постоянного тока с учетом сложной структуры примыкающей энергосистемы//Изв. НИИПТ. 1970. Вып.16.
4. Шевырев Ю. В. Математическое описание автономных тиристорных электроприводов постоянного тока//Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1980. № 6. С. 77—85.
5. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Электрооборудование лифтов, перспективы развития и применения

ИШХАНОВ Э.П.

Дан обзор используемых в настоящее время регулируемых и нерегулируемых электроприводов для лифтов, разработанных ОАО «Электропривод», с этажностью до 40 остановок и скоростью до 1,6 м/с. Рассмотрена автономная система диспетчерского контроля, обеспечивающая передачу информации о выходах из строя тех или иных элементов лифта. На основе анализа даны рекомендации по дальнейшему развитию электроприводов и систем управления лифтами.

На лифтах, эксплуатирующихся в настоящее время, используются нерегулируемые (электропривод массовых лифтов со скоростью до 1,4 м/с) и регулируемые электроприводы (электропривод скоростных лифтов со скоростью 1,6—4,0 м/с в высотных зданиях) с этажностью от 20 до 40 остановок.

Лифтовое оборудование постоянно совершенствуется по мере развития элементной базы электротехники, электроники и приборостроения.

При разработке как нерегулируемых, так и регулируемых электроприводов лифтов основное внимание уделяется: надежности и безопасности, комплектности поставки и заводской готовности электрооборудования; обеспечению встроенной в систему управления диагностики об отказах; обеспечению сервисными средствами наладки как на заводах-изготовителях, так и в условиях эксплуатации; вопросам энергосбережения; использованию современной элементной базы, технико-экономическим показателям; унификации НКУ и т.д.

ОАО «Электропривод» на протяжении ряда лет разрабатывает электроприводы лифтов как на переменном токе (массовые лифты), так и на постоянном токе (скоростные лифты и подъемники для высотных зданий).

Появление новой элементной базы обеспечило возможность создания моделей электроприводов и электрооборудования лифтов, пригодных как для новых, так и для модернизации ранее разработанных установок.

С 1994 г. на смену устройствам управления с жесткой логикой на лифтовом рынке появляются системы, приспособление которых к объектам выполняется методом изменения программы, — микропроцессорные шкафы управления лифтом (ШУЛК), разработанные ОАО «Электропривод».

Применение микропроцессорных устройств дало дополнительные возможности реализации более совершенных алгоритмов управления и, как следствие, позволило повысить надежность, снизить стоимость НКУ, обеспечить значительные возможности по информативности, диагностике отказов и принципиально по-новому строить системы управления лифтом.

ШУЛК является универсальным и пригодным для использования в лифтах жилых, административных и лечебно-профилактических зданий как в нерегулируемом (со скоростью движения до 1,4 м/с), так и регулируемом варианте (со скоростью движения до 2,0 м/с) с числом остановок в двух исполнениях — до 17 (с контроллером ПКЛ-17) и 32 (с контроллером ПКЛ-32).

Применение ШУЛК обеспечивает:

— возможность модификации алгоритма работы лифта по дополнительным требованиям заказчика (до-

работка программного обеспечения под конкретный заказ, установка тех или иных временных параметров и т.д.);

— возможность сопряжения контроллера ПКЛ с регуляторами различных типоразмеров;

— значительное сокращение времени поиска неисправностей в системе управления лифта за счет возможности накопления на плате контроллера информации об отказах (100) системы в течение длительного времени с указанием кода неисправности, времени и даты как на внутреннем дисплее, так и для передачи информации в диспетчерскую;

— обеспечивает работу лифтов в одиночном и групповом режимах (по последовательному каналу) в количестве до 6 лифтов в группе без использования каких-либо дополнительных устройств и независимо от местоположений лифта (по одному или обе стороны холла).

Кроме того, переключатель, установленный на плате контроллера, обеспечивает дополнительные сервисные функции: спуск в подвальные этажи, автоматическое определение этажей, подвижный и неподвижный пол, проходная или непроходная кабина, различная скорость движения.

Для удобства наладки и тестирования поставляется компактный наладочный блок, который кроме отображения текущего состояния всех датчиков и индикаторов по шахте, входящих в матрицу, а также возможности принудительной имитации их рабочего состояния позволяет организовать полный цикл работы лифта или проверить обработку вызовов группой лифтов, не отходя от одного из шкафов в машинном помещении.

Эти преимущества обеспечили массовое применение системы управления электропривода на базе ШУЛК в лифтах различных заводов (70% нового строительства в Москве оснащаются системами ОАО «Электропривод»).

В связи с массовым выпуском преобразователей частоты как иностранных, так и отечественных фирм, построенных на основе нового поколения электронных приборов — биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), отличающихся большим быстродействием, высокими предельными значениями коммутируемой мощности, малой мощностью управления при полной управляемости прибора — появилась возможность создания для скоростных лифтов высотных зданий регулируемого привода на переменном токе взамен ранее выпускавшегося серийно тиристорного электропривода постоянного тока.

ОАО «Электропривод» была разработана и рекомендована лифтостроительным заводам система регу-

лируемого электропривода лифта со скоростью до 1,6 м/с с числом остановок до 32, состоящая из серийно выпускаемого ШУЛК и преобразователя частоты фирмы КЕВ (Германия) или АВВ (Финляндия).

Проведенные испытания показали отличную совместимость основных компонентов управляемого электропривода благодаря встроенному в схему контроллера ПКЛ-32 специального выхода для управления частотным преобразователем. Наличие специализированного программного интерфейса преобразователя КЕВ позволило получить легко настраиваемую систему управления главным приводом лифта и возможность использования его для управления приводом двери, а также обеспечить вопросы энергосбережения в электроприводе.

Использование регулируемых электроприводов переменного тока на лифтах позволяет значительно повысить комфортные показатели работы лифта (плавность разгона и торможения). Основной причиной их широкого применения является снижение электропотребления при работе лифта (по данным МГПУ «Мослифт» 40—60%) и возможность использования односкоростных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором общего применения.

В ОАО «Электропривод» разработан шкаф управления лифтом в бесконтактном исполнении силовой части (ШУЛБ), проведены приемочные испытания в составе лифта и рекомендован выпуск установочной партии.

ШУЛБ при том же рабочем алгоритме, что и ШУЛК, и при той же матричной схеме подключения к внешним элементам управления, имеет следующие главные особенности:

- наличие только одного магнитного пускателя, обеспечивающего прерывание цепи тока электродвигателя главного привода при одновременном блокировании управляющих сигналов включения электродвигателя, согласно требованиям п.6.2.2, 6.4.11 и 6.2.3(в,г) ПУБЭД;

- наличие бесконтактных оптоэлектронных пускателей главного привода, привода двери, тормоза, освещения;

- запуск оптоэлектронных пускателей в момент перехода сетевого напряжения через нуль и, как следствие, их высокая надежность и полное отсутствие коммутационных помех;

- возможность работы в режиме «Ревизия» на стадии отладки лифта без платы микроконтроллера;

- наличие дополнительных защит и диагностики работы — электрическая блокировка цепей реверса оптоэлектронных пускателей, отключение двигателя привода дверей и главного привода, наложение механического тормоза при чрезмерном токе нагрузки, при отказах элементов оптоэлектронных пускателей главного привода (нарушение проводимостей семисторных ключей или короткого замыкания в цепях двух или трех фаз бесконтактных пускателей как большой, так и малой скорости, нарушение симметрии проводимости семисторного ключа в цепи, любой фазы бесконтактных пускателей (большой и малой скорости) или тормоза при заклинивании двигателя и обрыве обмоток электродвигателя как большой, так и малой скорости.

Функциональная схема шкафа управления приведена на рисунке.

Плата контроллера ПКЛ32 с тем же программным

обеспечением используется в устройстве управления лифтом типа ШУЛК.

Плата управления ЯУ состоит из логических схем, на которые с микропроцессора ПКЛ32 по шине 18 поступают сигналы СЛ/ГР, РЕТО-РЕТЗ, С16, С17, а по шине 19 сигналы состояния дверей шахты и кабины. ЯУ формирует сигналы **большая скорость** вверх/вниз или **малая скорость** вверх/вниз, которые соответственно по цепям 21 или 22 поступают на плату ЯГП, ЯУ формирует сигнал **открывания/закрывания** двери, который по цепи 23 поступает на плату ЯПД. Формирование этих сигналов производится с помощью элементов «жесткой логики» с учетом сигналов безопасности, определяемых состоянием дверей шахты и кабины, датчиком пожарной опасности и т.д. Подобная структура также предотвращает несанкционированное включение привода в случае ошибок или сбоя микропроцессора.

В ЯУ находятся бесконтактные ключевые элементы, коммутирующие сигналы диспетчеризации. Кроме того, в ЯУ находится схема перегрева, получающая по цепям 32 и 33 сигналы с лозисторов двигателя главного привода и по цепи 34 сигнал с терморезистора, установленного на радиаторе платы главного привода (ЯГП). Эта схема формирует сигналы **Перегрев 1** и **Перегрев 2**, поступающие на микропроцессор ПКЛ32 по шине 35. Кроме того, на плате ЯУ собрана схема, позволяющая работать в режиме «Ревизия на стадии наладки лифта при отсутствии платы ПКЛ32.

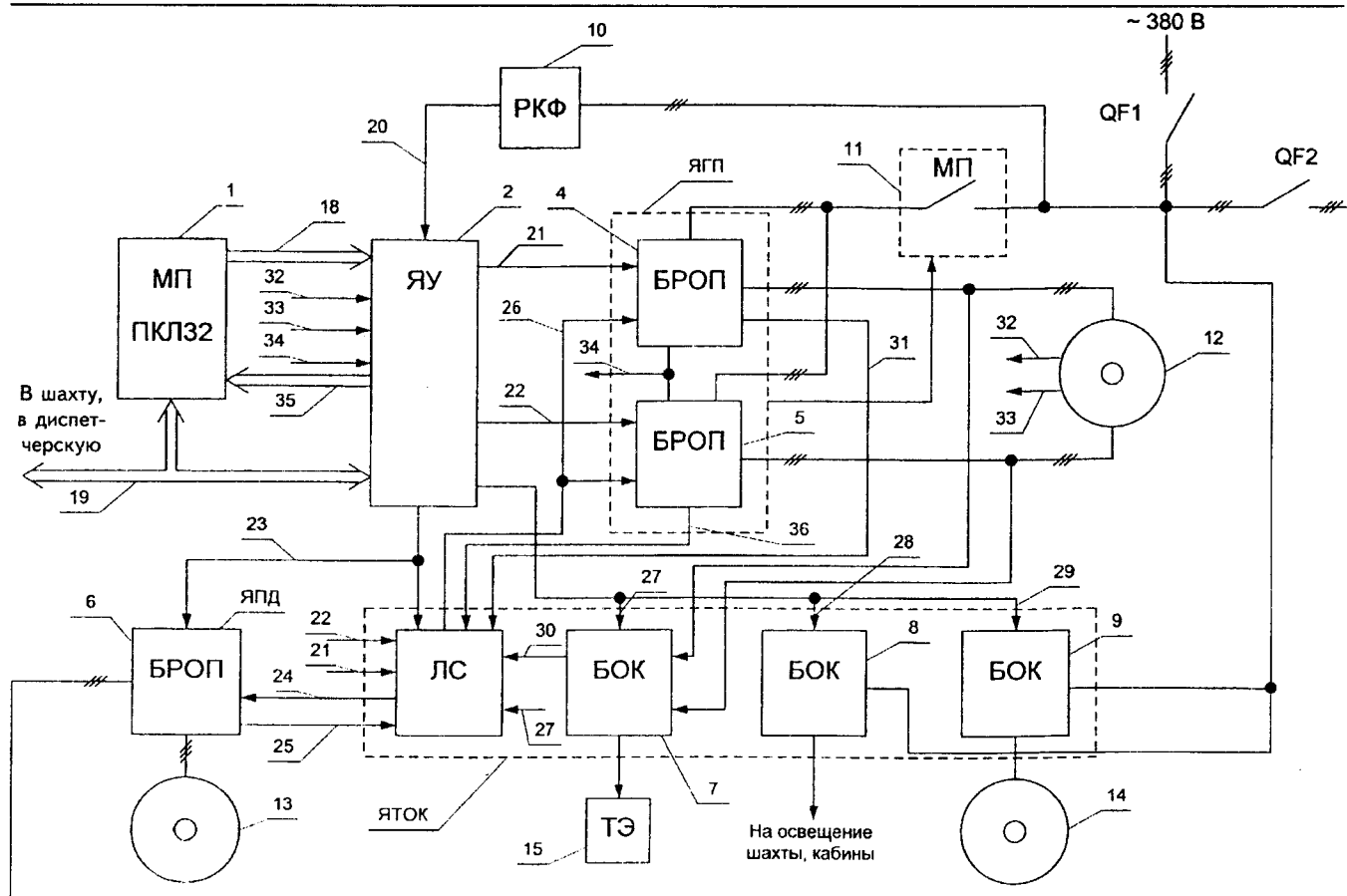
Плата привода двери (ЯПД) состоит из бесконтактного реверсивного оптоэлектронного пускателя (БРОП), имеющего в своем составе логическую схему. Эта схема запрещает включение БРОП в случае ошибочного одновременного поступления сигналов открывания и закрывания двери, а также при поступлении с платы ЯТОК сигнала аварии привода двери. Трехфазное напряжение с выхода БРОП подается на обмотку двигателя 13 привода двери.

Плата главного привода (ЯГП) состоит из двух бесконтактных реверсивных оптоэлектронных пускателей БРОП 4 и БРОП 5 соответственно для большой и малой скорости, имеющих в своем составе логическую схему. Эта схема запрещает включение БРОП в случае ошибочного одновременного поступления сигналов вверх и вниз, а также отключает БРОП при поступлении с платы ЯТОК сигнала **аварии главного привода**. На радиаторе, охлаждающем элементы БРОП, смонтирован терморезистор, сигнал с которого поступает по цепи 34 на плату ЯУ. При нагреве радиатора выше определенной температуры сопротивление терморезистора достигает значения, при котором формируется сигнал **Перегрев 1**. В результате микропроцессор ПКЛ32 выдает команду включения вентилятора. Включается вентилятор 14 и производится обдув радиатора.

Кроме того, на плате имеется схема, запускающая магнитный пускатель МП спустя 1—2 с после включения автоматического выключателя QF1.

Трехфазное напряжение с выходов БРОП4 и БРОП5 подается соответственно на обмотку большой и малой скорости двигателя 12 главного привода.

Плата тормоза, освещения и контроля работы (ЯТОК) содержит бесконтактные оптоэлектронные ключи БОК 7, БОК 8 и БОК 9, которые соответственно с помощью управляющих сигналов 27, 28 и 29,



поступающих с платы *ЯУ*, коммутируют тормозной электромагнит *ТЭ*, цепи освещения кабины и шахты, а также вентилятор *14*.

Включение *ТЭ* возможно только при подаче питающего напряжения на обмотку большой и малой скорости двигателя *12* главного привода.

Для контроля работы *БРОП 4, 5*, входящих в *ЯГП*, и *БРОП 6*, входящего в *ЯПД*, в плате *ЯТОК* имеется логическая схема *ЛС*, содержащая три цифровых компаратора. Первый компаратор сравнивает логический уровень сигнала *21* **большой скорости** с сигналом *31*, информирующим о наличии переменного напряжения каждой фазы на обмотке большой скорости двигателя *12*, а также сравнивает логический уровень сигнала *27* **включения ТЭ** с сигналом *30*, информирующим о наличии напряжения на обмотке *ТЭ*. Второй компаратор сравнивает логический уровень сигнала *22* **малой скорости** с сигналом *36*, информирующим о наличии переменного напряжения каждой фазы на обмотке малой скорости двигателя *12*, а также сравнивает логический уровень сигнала *27* **включения тормоза** с сигналом *30*, информирующим о наличии напряжения на обмотке *ТЭ*.

При неправильной работе (отказах) *БРОП 4*, *БРОП 5*, а также *БОК 7*, на выходах этих компараторов формируются сигналы **аварии**, которые спустя определенное время задержки по цепи *26* поступают на плату *ЯГП*, в результате чего *БРОП 4*, *БРОП 5* и магнитный пускатель *МП* отключаются.

Третий компаратор сравнивает логический уровень сигнала *23* **открывания или закрывания** двери с сигналом *25*, информирующим о наличии переменного напряжения каждой фазы на обмотке двигателя *13*

привода двери. При неправильной работе (отказах) *БРОП 6* на выходе этого компаратора формируется сигнал аварии, который спустя определенное время задержки поступает по цепи *24* на плату *ЯПД*, обуславливая отключение этого *БРОП*. Кроме того, в *ЛС* платы *ЯТОК* имеются детекторы токов трех фаз силовых цепей *БРОП 4*, *БРОП 5* и *БРОП 6*. При чрезмерном токе любой фазы детекторы формируют сигналы **аварии**, которые спустя определенное время задержки поступают по цепи *26* на плату *ЯГП* и по цепи *24* на *ЯПД* с целью отключения этих *БРОП* и пускателя *МП*.

Решая вопрос повышения информативности о выходах из строя тех или иных элементов системы лифта и оперативного принятия решения по отказам, ОАО «Электропривод» разработал и опробовал на стендах на базе ШУЛК с контроллером ПЛК-32 и ПЭВМ типа РС 486 и последующими модификациями автономную систему диспетчерского контроля.

Система сбора информации о состоянии лифтов с использованием ПЭВМ, включающая в свой состав плату контроллера ПЛК-32, обеспечивает дистанционный сбор данных о текущем состоянии лифтовых станций ШУЛК и передачи их по запросам оператора на пульт в диспетчерскую. Система может обслуживать дом, имеющий до четырех подъездов, в каждом из которых установлены до четырех лифтов. В качестве пульта управления используется ПЭВМ типа РС АТ (тип РС 486 и выше).

Для передачи данных в каждом направлении (к одному из четырех подъездов) используется одна резервная витая пара из телефонного кабеля типа ТПВ, проложенного между машинным помещением и диспетчерской для звуковой сигнальной связи.

Выводы

1. Применение современной силовой электроники в разработанных электроприводах и автоматики управления и микропроцессорных систем управления лифтами различного назначения открывает широкие перспективы перед лифтостроителями и позволяет существенно изменить подход к технологии монтажа лифтов, их изготовлению и эксплуатации, при этом существенно повысить экономическую эффективность от применения новой техники.

2. Наиболее перспективным в настоящее время, для построения систем управления лифтами является применение:

— последовательного интерфейса для соединения различных периферийных устройств управления и индикации;

— средств бесконтактной силовой автоматики и устройств управления, а при изготовлении плат управления — технологии поверхностного монтажа;

— регулируемого электропривода переменного тока на большинстве типов лифтов.

3. Применение принципа последовательного канала связи различных периферийных устройств для построения системы управления лифтами приведет к созданию распределенной системы управления, наличию удаленных от машинного помещения интеллектуальных модулей, решающих под общим (централизованным) управлением самостоятельные задачи по управлению лифтом и контролю за его работой и исправностью.

Практическая реализация данного принципа по-

строения систем управления позволит в несколько раз сократить количество проводов по шахте лифта и в подвесном кабеле. При этом наиболее перспективным станет использование для монтажа лифтов медных проводов с соединением всех устройств управления и контроля через разъемные соединения, что позволит существенно сократить время и трудоемкость монтажа лифтов и, что не менее важно, ошибки при монтаже их электрической части.

Применение данного принципа позволит изменить подход к построению устройств диспетчерской связи с лифтами, повысить информативность канала связи и обеспечить практически полную диагностику лифта из диспетчерской.

4. Применение систем регулируемого электропривода позволит прежде всего сократить потребление электроэнергии на 20—30%, повысить плавность хода лифтов, точность остановки на заданном этаже, сократить габарит двигателя и усилить его защиту от аварийных ситуаций, исключить динамические нагрузки. При правильном подходе к построению системы регулируемого электропривода практически может быть исключена возможность преждевременного вывода из строя приводного электродвигателя в результате ошибочных действий наладочного и эксплуатирующего персонала, а также и в результате аварийных процессов в сети.

5. Совмещение в едином шкафу управления всех перечисленных принципов управления позволит в целом сократить затраты потребителя, даже на уровне капитальных затрат, несмотря на кажущееся увеличение стоимости за счет наличия регулируемого привода.

Технологические особенности применения тиристорного электропривода шахтных подъемных машин

КАТОЛИКОВ В.Е.

Рассмотрены технологические процессы на скиповых, клетевых подъемных установках, режимы оттормаживания машины, осуществления пуска-торможения на подъем-спуск грузов с разных точек пути, осуществления режима "ревизия" с требуемым двигательным или тормозным пуском на подъем и спуск, выполнения маневров на малом пути, длительной работы при прерывистых токах и др. Предложены схемотехнические дополнения к САУ, устраняющие негативные проявления особенностей применения привода.

Технологические особенности тиристорного электропривода шахтных подъемных машин обусловлены диаграммами движения и нагрузок возможных исполнений подъемных установок, режимами работы на этапах движения при отличающихся условиях пуска и замедления в двигательном и тормозном режимах, при ревизии канатов и ствола с изменением знака статического момента и др. Некоторые режимы работы подъема находятся в противоречии с возможностями и особенностями построения простого по силовой схеме и дешевого тиристорного электропривода (ТП-Д) с реверсом тока возбуждения (I_b). Негативное качество привода проявляется в том, что при принятой структуре САУ с подчиненным регулированием параметров каждый пуск начинается при нарастании I_b с нуля, а нарастание или уменьшение момента двигателя, изменение его знака от двигательного режима

к тормозному и обратно определяется значительными постоянными возбуждения тихоходных двигателей.

Рассмотрим одну из структур САУ привода ТП-Д с реверсом I_b , построенную с подчиненным управлением параметров: v — скорости (регулятор РС), I_a — якорного тока (РТ), I_b — тока возбуждения (РВ). Контур I_b управляется по скоростной ошибке $\pm \Delta v$ на выходе РС. На входе САУ используется устройство задания программы движения ПУ. При отсутствии U_z , $U_{PC} = 0$ привод включается при $I_b = 0$. САУ должна обеспечивать условие хорошего управления — формирование непрерывного изменения значения и знака I_b , $F_{дв} = 2M_{дв}/D_m$ при реверсировании — изменении режима работы привода с двигательного на тормозной и обратно. Это достигается согласованным управлением I_b и I_a в зависимости от $\pm \Delta v$ за $t_{рв}$ — время изменения $\pm I_{b,ном}$ до $\mp I_{b,ном}$ — за то же время $\pm F_{дв}$ ($\pm M_{дв}$). В опи-

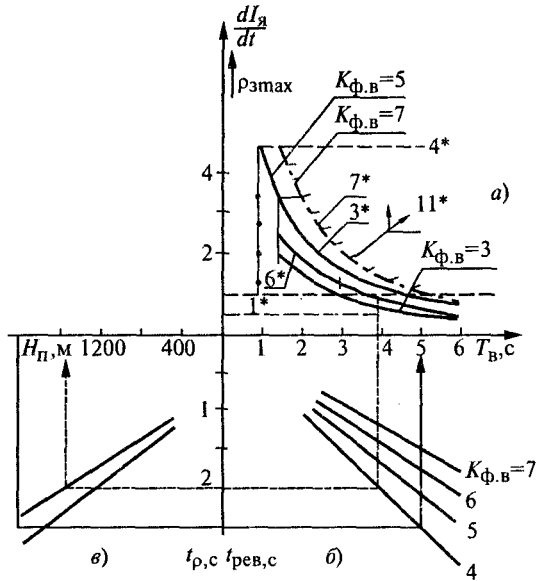


Рис.3. Зависимости $t_{рев} = f(T_b, K_{\phi})$, $t_{рев} = f(H_n, C_k)$

$U_{в.ном}$ нежелательно, так как при этом необходим переход от низковольтных реверсивных тиристорных возбудителей ТВ (6* на рис.3,а) к ТВ с питанием через высоковольтный трансформатор (7* на рис.3). При $U_{в.ном} = 55 \text{ В}$, $I_{в.ном} = 1000 \text{ А}$, $P_{тр} = 1300 \text{ кВт}$, что по объему оборудования и стоимости менее привлекательно по сравнению с приводом ТП-Д и силовым реверсивным ТП с лучшим управлением (11* на рис.3,а). Увеличение $P_{дв}$, T_b и снижение эффективности $K_{\phi.v}$ является одним из ограничений к применению привода ТП-Д с реверсом I_b .

Необходимо установить соответствие между $t_{рев}$ тока I_b и ограничением $dF_{дв}/dt$ на динамические нагрузки в подъемном канате. Значение $t_{рк}$ по ограничению амплитуды $A_{кол}$ колебаний каната до $0,1A_{кол.мах}$

$$t_{рк} = \frac{2\pi H_n}{v_6} \sqrt{\frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_k}}$$

где μ_1, μ_2, μ_k — относительная массивность машины-привода, концевой нагрузки, канатов; $v_6 = 4200 \text{ м/с}$ — скорость распространения упругой волны по канату.

Время $t_{рк}$ из условия ограничения колебаний в канате возрастает с увеличением глубины подъема H_n и уменьшением жесткости каната. Зависимость $t_{рк} \approx f(H_n)$ приведена на рис.3,в. При увеличении H_n должно ограничиваться $(dF_{дв}/dt)_{мах}$ путем повышения $t_{рк}$. При возрастании $P_{дв}$, T_b , $t_{рев}$ желательно удовлетворение условия выбора $t_{рз} = t_{рев} > t_{рк}$. Выполнение этого условия рассмотрим на примере скипового подъема с параметрами: $H_n = 1100 \text{ м}$, $P_{дв} = 5000 \text{ кВт}$, $T_b = 7,5 \text{ с}$, $G_1 = G_m + G_{дв} = 2060 \text{ кН}$, $G_3 = G_{ск} + Q_{гр} = 210 \text{ кН}$, $G_k = 127 \text{ кН}$, $\Sigma G = 2400 \text{ кН}$, $\mu_1 = 0,91$, $\mu_2 = 0,13$, $\mu_k = 0,053$. Величина $t_{рз}$ должно выбираться по большому значению $t_{рев}$ или $t_{рк}$.

Для рассматриваемой подъемной установки и привода $t_{рзмах} = t_{рев} = 3 \text{ с} > t_{рк} = 2 \text{ с}$. Для других исполнений возможно $t_{рк} > t_{рев}$.

Для непрерывного изменения (без разрыва) $F_{дв}$ ($M_{дв}$) при реверсировании знака I_b принимается дополнительное условие, достигаемое установлением K_{PO} :

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{K_{\pi} I_{яi} K_{\phi.v}}{T_b} \leq K_{PO} \frac{dI_b}{dt},$$

где K_{π} — коэффициент при значении $I_{яi}$, с которого начинается реверсирование I_b .

Неблагоприятный характер процессов исключается при $(dI_a/dt) < K_{PO}(dI_b/dt)$.

Требуемая dI_a/dt по каналу управляющего воздействия на входе САУ устанавливается ограничением ρ_3 посредством ПУ. Как частный случай может быть $dI_a/dt \approx dI_b/dt$, что нежелательно, так как практически исключает поддержание $I_{в.ном}$ при $v = \text{const}$.

Графики $dI_a/dt = f(T_b, K_{\phi.v})$ приведены на рис.3,а. Характеристику 3* можно считать граничной при $K_{\phi.v} = 5+6$. Характеристика 2* ограничивает область слева, которая не может быть реализована по допустимым нагрузкам в канате. Линия 4* — верхняя граница $(dI_a/dt)_{мах} < 5I_{я.н}/с$ определяется ограничением динамических нагрузок на механическое оборудование, устанавливаемых независимой настройкой контура тока. Линия 1* — нижняя граница $(dI_a/dt)_{мин} = 2I_{я.н}/с$ определяется условием $dF_{горм}/dt = dF_{дв}/dt$. Сочетание параметров I_b и $K_{\phi.v}$ для обеспечения меньшего $t_{рев}$ и допустимых $(dI_b/dt)_{мин}$, $(dF_{дв}/dt)_{мин}$ представляются граничной линией справа. При одной и той же мощности постоянная возбуждения и время реверсирования момента двигателей многоканатных машин меньше, чем при более тихоходных двигателях барабанных машин. Поэтому граничная линия справа несколько изменяется. Построение привода с параметрами $T_b/K_{\phi.v}$, dI_a/dt , $t_{р}$, взятыми в пределах граничных характеристик рис.3 при программировании с условием $t_{рев} > t_{рк}$ обеспечивает его нормальную работоспособность. Ограниченная область — область применения рассматриваемой системы однодвигательного электропривода.

При увеличении T_b , $t_{рев}$, уменьшении $(dI_a/dt) = dI_b/dt$ темп реверсирования $F_{дв}$ во времени оказывается сравнимым с темпом изменения загрузки $Q_{гр}$ подъемного сосуда — скипа:

$$dF_{дв}/dt \approx (F_{дв.ном}/c) \rightarrow (dQ_{гр}/dt) \approx Q_{гр.ном}/c,$$

что ограничивает применение САУ-П — системы регулирования положения подъемного сосуда на уровне загрузки — разгрузки при использовании ПУ.

Влияние технологических режимов подъемных установок на управление приводом

Скиповые установки

На двухскиповых установках, неуравновешенных и уравновешенных, диаграммы которых приведены на рис.4,а,б, пуск с любой точки пути при любых нагрузках на подъем с $+F_{ст} > 0$ осуществляется всегда при $+I_b$, $+F_{дв}$ в двигательном режиме работы привода. По схеме рис.1 задание $+I_{в.ном}$ на пуск осуществляется по основному каналу управления ПУ-РС-РВ и дублируется по вспомогательному каналу ЗУ-АП непосредственно на вход РВ на малое время начала движения. Технологические режимы двухскиповых подъемов с многоканатными машинами (мк) — рис.4,б жирные линии, вследствие их уравновешенности и меньшей массивности m_{Σ} отличаются от режимов неуравновешенных подъемов с барабанными машинами (бар) рис.4,а. Вследствие этого при подъеме груза

$$F_{ст.нач.бар} = Q_{гр.ном} + p_k H_{пмах} > F_{ст.нач.мк} = Q_{гр.ном};$$

$$F_{ст.кон.бар} = Q_{гр.ном} - p_k H_{пмах} < F_{ст.кон.мк} = Q_{гр.ном};$$

$$a = \text{const}; F_{дин.мк} = a_{мах} m_{\Sigma мк} < a_{мах} m_{\Sigma бар}$$

**Формирование пуска привода в сочетании с
оттормаживанием машины**

Процессы пуска должны сочетаться с временем снятия механического тормоза $t_{отт} = 0,5$ с. К концу оттормаживания двигатель должен обеспечивать на ободе машины $F_{дв} = F_{ст} \cong 0,7F_{ном}$ для удержания груза $Q_{гр.ном}$ на весу при токовой отсечке с $I_{я.отс} \cong I_{я.ном}$ на $t_{отт}$. Условие нарастания до $I_{в} = 0,7I_{в.ном}$ достигается за $t_{отт} = t_{нар} = 1,2T_{в}/K_{ф}$ при $T_{в} < t_{отт}K_{ф.в} = 3\div 4$ с. В эксплуатирующихся приводах при $T_{в} > 3\div 4$ с вводится временная задержка $t_{в.вр}$ на снятие тормоза для обеспечения $F_{дв} = F_{ст}$ при $F_{торм} \rightarrow 0$. Процессы нарастания $I_{в}$, $I_{я}$, $F_{дв}$ и снятия $F_{торм}$ показаны на рис.5,а. При возрастании $P_{дв}$ и $T_{в} > 4$ с условие $t_{отт} = t_{нар}$ не удовлетворяется. При $T_{в} = 7,5$ с $t_{нар} = 1,8$ с увеличение $t_{в.вр}$ определяет отставание $F_{дв}$ от требуемого для программного пуска при существенном отклонении v_d от v_3 в начале пуска. Улучшение процесса достигается применением устройства подготовки требуемого знака $I_{в.ном}$ во время паузы между подъемами $\theta \gg t_{рев}$ до подачи пускового сигнала. По схеме рис.1 в устройство входят: датчики Дс-В, Н стопорения в конце пути с узлом задания обратного направления движения В, Н, запоминающее устройство ЗУ и ключи переключения K_r . Выключателем Дс-В или Дс-Н через $K_{тр}$ осуществляется стопорение машины тормозом, разрывается канал ПУ-РС, прерывается $I_{я}$. По каналу ИП-Дс-ЗУ-АП изменяется полярность $I_{в.з}$. Вместо $+I_{в.ном}$ задается $-I_{в.ном}$ предыдущего направления "В" (Н), что соответствует $+I_{в.ном}$ для нового направле-

ния движения "Н" (В). По команде "пуск" машина оттормаживается, аппаратами "В" ("Н") по каналу ПУ-РС-РВ на выходе РС-РВ задается $+I_{в.ном}$ нового направления движения, задание по каналу ИП-Дс-ЗУ с задержкой АП снимается. Процесс пуска развивается при $+I_{в.ном} = const$ как показано на рис.5,б — также, как и в приводах Г-Д, ТП-Д с реверсивным ТП. При длительных стоянках машины и наложении аварийного тормоза (ТП) регулятор РВ блокируется и нагрев обмотки возбуждения двигателя исключается.

**Задание знака $I_{в}$, $F_{дв}$ для пуска при подъеме груза
с промежуточной точки пути**

По схеме рис.1 сигнал $+I_{в}$, поданный до пуска на подъем, запоминается посредством ЗУ до конца пути. В случае остановки скипа в промежуточной точке пути и отключения канала управления ПУ-РС-РВ сигнал $+I_{в}$ восстанавливается через ключ $K_{тр}$ по каналу ЗУ-РВ. Повторный пуск привода осуществляется с подготовленным $+I_{в.ном}$ в прежнем направлении движения с удовлетворением условия удержания $Q_{гр.ном}$ на весу при оттормаживании машины. С началом движения сигнал от ЗУ снова замещается на $+I_{в.ном}$ по каналу основной структуры ПУ-РС-РВ. На скиповых подъемах с большой степенью неуравновешенности $(dF_{ст}/dh)_{max}$ пуск должен осуществляться при $+F_{дв}$. Исключение перехода в режим тормозного пуска при $F_{дв} \leq 0$ на всем пути подтверждается примером подъема с параметрами: $H_{п.макс} = 1100$ м, $Q_{гр.ном} = 100$ кН, $P_k = 10 \cdot 10^{-3}$ т/м, $m_{\Sigma} = 260$ кН·с²/м, $a_{min} = 0,3$ м/с²

$$h_{пр} = \frac{1}{2P_k} [Q_{гр.ном} + a_{min}m_{\Sigma} + H_{п.макс}P_k] \geq H_{п.макс}$$

Пуск и разгон привода в тормозном режиме на подъем может потребоваться при $Q_{гр.и} \ll Q_{гр.ном}$ и $Q_{гр} = 0$, ($-F_{ст}$). Для реализации такого пуска после остановки сосуда в промежуточной точке пути принцип задания знака $I_{в}$ по пути дополняется измерением груза $Q_{гр.и}$ до начала движения посредством датчика с запоминающим устройством на весь полуцикл. По схеме рис.1 после команды "Стоп" $Q_{гр.и}$ складывается с нагрузкой неуравновешенности $F_{ст} = P_k(H_{п} - 2h_i)$, измеряемой в точке остановки h_i , вводится в сумматор Σ . Сигнал от Σ подавался на вход РТ для задания $I_{я} \cong Q_{гр}$ и оптимизации трогания привода. В сумматоре при условии $I_{дин} \cong F_{дин} = const$ определяется требуемый $\pm I_{в}$ для обеспечения $\pm F_{дв} = Q_{гр.и} + P_k(h_{ст}) + F_{дин}$.

Сигнал с выхода Σ подавался на РО-РВ для задания знака и значения $I_{в}$, выбора $\pm F_{дв}$. После нарастания $I_{в}$ до $I_{в.ном}$ требуемого знака подавался сигнал "пуск". Проявлялся принцип временного замещения — подавления знака $I_{в}$ основной структуры ПУ-САУ. При появлении в начале движения $-\Delta v$, обеспечивающей требуемый режим работы привода по каналу ПУ, сигнал с выхода Σ снимался.

Формирование процессов в приводе на спуск грузов

Формирование требуемого знака $I_{в}$ для пуска на спуск грузов по заданной программе рассмотрим на примере одноконцевого подъема с параметрами: $H_{п.макс} = 1900$ м, $Q_{гр.ном} = 100$ кН, $Q_{под.сос} = 29$ кН, $F_{ст.верх.гр} = 150$ кН, $F_{ст.ниж.гр} = 340$ кН, $m_{\Sigma} = 200\div 210$ кН·с²/м, $a_{min} = 0,3$ м/с², $F_{ном} = 200$ кН. Диаграммы $v = f(t)$, $F_{дв} = f(t)$ приведены на рис.6,а. Двигатель быстроходный с $T_{в} = 2,6$ с. Для такого подъема характерны два крайние режима спуска: при $Q_{гр} = 0$ или малых гру-

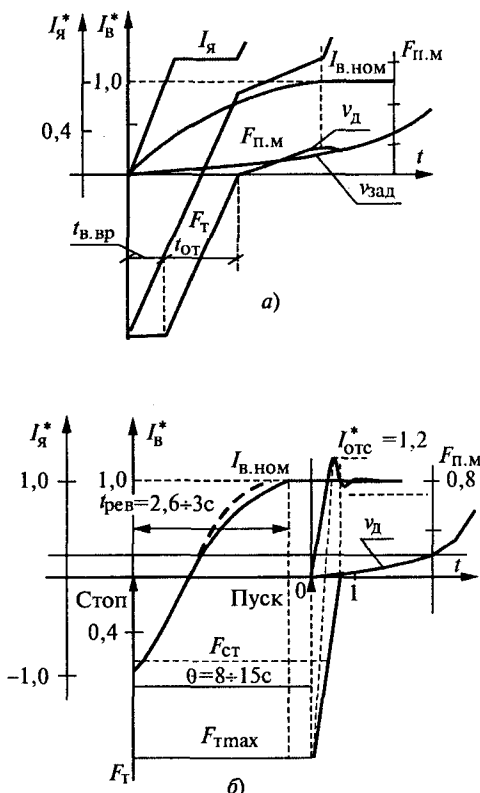


Рис.5. Диаграмма процесса пуска с учетом снятия механического рабочего тормоза:

а — при одновременной подаче сигнала на развитие электромагнитного процесса и снятия с выдержкой времени механического тормоза; б — при формировании тока возбуждения двигателя до подачи сигнала "пуск"; F_t — усилие на ободе барабана машины от действия механического рабочего тормоза; $F_{п.м}$ — усилие на ободе барабана машины

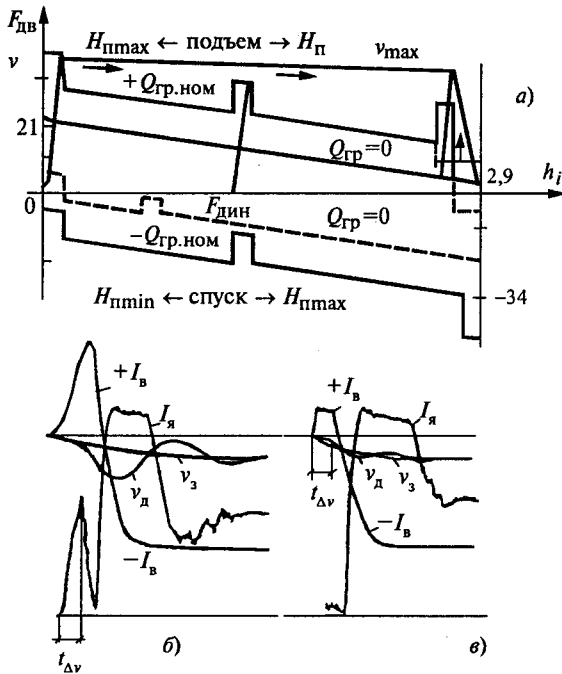


Рис.6. Диаграмма движения и нагрузок:
 а — одноконцевой подъемной установки при подъеме и спуске грузов; б — процессы пуска на спуск груза с запираем цепи $I_{\text{я}}$ на время изменений знака Δv для изменения режима работы привода с двигательного на тормозной

зах и при $Q_{\text{гр.ном}}$. Спуск $Q_{\text{гр}} \rightarrow 0$ с верхней точки пути ($h_i = 0$) должен начинаться в двигательном режиме с $+I_{\text{в}}, +F_{\text{дв}}$, так как $|F_{\text{дин}} = 62 \text{ кН}| > |-F_{\text{ст.пор}} = 28 \text{ кН}|$. По основной структуре САУ по рис.1 при использовании условий пуска при подъеме $Q_{\text{гр}}$ для пуска с $Q_{\text{гр}} \rightarrow 0$ и $t_{\text{отт}} = 0,6$ с оказывается $+I_{\text{в.ном}}, I_{\text{я.ном}}, F_{\text{п.м}} = F_{\text{ст.верх}} + +F_{\text{ном}} - F_{\text{т}} \text{ и } F_{\text{т}} \rightarrow 0$, пусковое ускорение $a_{\text{верх}} = = [(F_{\text{ст.верх}} + F_{\text{ном}})/m_{\Sigma}] \rightarrow 1,7 \text{ м/с}^2$. При $F_{\text{ст.ниж}} a_{\text{ниж}} \rightarrow \rightarrow 2,5 \text{ м/с}^2$. За $t_{\text{рев}}$ и достижения $-I_{\text{в}}, -F_{\text{дв}}$ возрастает v вдвое больше заданной, что видно из рис.6,б. Такой режим спуска для посадки сосуда и маневров, как и применение механического тормоза для ограничения $a_{\text{ниж}}, v$, нежелательны или недопустимы. Уменьшение ошибки управления на малое время двигательного пуска можно обеспечить токовой отсечкой, ограничивающей

$$a_{\text{мин}} \cong \frac{1}{m_{\Sigma}} (0,25F_{\text{ном}} + Q_{\text{п.с}} + Q_{\text{гр.мин}}).$$

Для уменьшения ошибки управления при пуске на спуск груза может быть использовано устройство ограничения развития $I_{\text{в}}$ неправильного знака, прерывания $I_{\text{я}}$ на время $t_{\text{рев}}$ — изменение знака $F_{\text{в}}$ до требуемого по схеме рис.1 посредством ключей в цепи РТ. На время изменения $+I_{\text{в.орг}}$ на $-I_{\text{в}}$ движение и процессы в приводе определяются $-F_{\text{ст}}$ и изменением $I_{\text{дв}}$ на $I_{\text{динв}}$, как показано на рис.6,в для реверсирования с $+F_{\text{дв}}$ на $-F_{\text{дв}}$.

Необходимость двигательного режима пуска на спуск с $Q_{\text{гр}} \rightarrow 0$ по программе при $|-F_{\text{ст.гр}}| \cong |F_{\text{дин}}|$ ограничивается на пути

$$h_i = \frac{1}{\rho_{\text{к}}} (-F_{\text{ст.гр}} + a_{\text{мин}} m_{\Sigma}) = 565 \text{ м.}$$

Запирание $I_{\text{я}}$ на $t_{\text{рев}}$ исключает $+F_{\text{дв}}$, система подвешива будет работать с ускорением свободного выбега $a_{\text{св}}$

и, значит, с некоторой скоростной ошибкой.

После остановки подъемного сосуда в точке пути $h_1 > 565$ м для выполнения заданной программы пуска при $|+F_{\text{дин}}| < |-F_{\text{ст}}|$ требуется задание $-F_{\text{дв.пуск}}$. Если же по основной структуре САУ в начале пуска задаются $+\Delta v, +I_{\text{в}}, +F_{\text{дв}}$, то САУ определяет необходимость изменения знака Δv на $-\Delta v$, но при этом на время $t_{\text{спад}}$ остается $+I_{\text{в}}$, что нежелательно. Поэтому целесообразно после $h_{\text{гр}} > h_1$ с начала пуска сразу задавать $-\Delta v, -I_{\text{в}}, -F_{\text{дв}}$. Определение точки $h_{\text{гр}} > h_1$, после которой для программного пуска требуется $-I_{\text{в}}, -F_{\text{дв}}$ может фиксироваться путевыми выключателями АЗК или цифровой системой измерения пути с импульсными датчиками. При действии путевого датчика по вспомогательному каналу ИП- $p(h)$ подготавливается сигнал для задания $-I_{\text{в.ном}}$, который реализуется при остановке машины и замыкании $K_{\text{тр}}$ по каналу $p(h)$ -ТР-АП-РВ. Сигнал $p(h)$ запирает РО, исключая проход $+\Delta v$, образующей при пуске на выходе РС для задания $+I_{\text{в}}$ на РВ. После $t_{\text{отт}}$ движение начинается под действием $-F_{\text{ст}}$. По рис.6,б при $a = = (F_{\text{ст}}/m_{\Sigma}) < a_{\text{мин}}$ изменение на выходе РС $+\Delta v$ на $-\Delta v$ будет происходить за $t_{\Delta v}$. Если $t_{\text{АП}} = t_{\Delta v}$, то одновременно за это время на входе РВ будет осуществляться замена задания $-I_{\text{в}}$ от вспомогательного канала ИП-АП на $-I_{\text{в}}$ по основному каналу РС-РО-РВ. При создании $-\Delta v$ обеспечивается сдвиг $E_{\text{дв}} \rightarrow E_{\text{динмакс}}$ через $I_{\text{д}} \rightarrow 0$ для управления в инверторном режиме по заданной программе. Сигналом ИП- $p(h)$ реализуется принцип, условно называемый подавлением (замещением) $+I_{\text{в}}$ от ПУ-САУ на время, пока на выходе РС не возникнет $-\Delta v$, необходимая для управления в тормозном режиме по заданной программе.

Пуск на спуск $Q_{\text{гр.ном}}$ должен начинаться и осуществляться с любой точки пути в тормозном режиме с $-I_{\text{в}}$ из-за $|-F_{\text{ст.верх.ном}} = 158 \text{ кН}| > |F_{\text{дин}} = a_{\text{мин}} m_{\Sigma} = 68 \text{ кН}|$. Для этого необходимо по сигналу направления спуска (H) выполнить задание $-I_{\text{в.ном}}$ по вспомогательному каналу ИП-АП на РО-РВ. За $t_{\text{АП}}$ замещается $-I_{\text{в}}$ по основному каналу РС-РО-РВ как описано выше. Пуск на спуск с $-F_{\text{дв}}$ должен начинаться при $Q_{\text{гр.мин}} = = 47,5 \text{ кН} = 0,2F_{\text{ном}}$, что следует из $F_{\text{дв}} = Q_{\text{п.с}} + Q_{\text{гр.мин}} + F_{\text{дин}}$.

Возможно осуществление спуска любых грузов от $Q_{\text{гр}} = 0$ до $Q_{\text{гр.ном}}$ с заданием $-I_{\text{в.ном}}$ до начала движения на весь полцикл спуска. При этом начало движения на спуск $Q_{\text{гр}} = 0$ при требуемом по программе $+I_{\text{в.ном}}$, но задании $-I_{\text{в.ном}}$ будет происходить в режиме свободного разворота под действием $F_{\text{ст.нач}}$ с ускорением $a_{\text{св.раз}} = 0,14 \text{ м/с}^2 < a_{\text{минпад}}$ до достижения на малом отрезке движения $+\Delta v$. За время $t_{\text{АП}}$ уменьшающееся задание на $-I_{\text{в}}$ от вспомогательного канала замещается возрастающим заданием $+I_{\text{в}}$ по основному каналу РС-РО-РВ для двигательного режима пуска. После разгона привод переходит в тормозной режим пуска, что не вызывает затруднений.

Управление в режиме "ревизия"

Движение на всем пути $H_{\text{п}}$ осуществляется за $v_{\text{рев}} = 0,3 \pm 0,1 \text{ м/с}$, при $Q_{\text{гр}} = 0$, начальный разгон с $a_{\text{мин}} = 0,3 \text{ м/с}^2$. Изменение $F_{\text{ст}} = f(h_i)$ — линейное. На двухконцевых подъемах изменение знака $F_{\text{ст}}$ происходит при $h_i = H_{\text{п}}/2$. Диаграммы движения и нагрузок показаны на рис.7,а. Пуск может осуществляться в обоих направлениях движением из любых точек пути, затруднения могут возникать когда по структуре САУ задаются начальные $+I_{\text{в}}, +F_{\text{дв}}$, а для пуска с опреде-

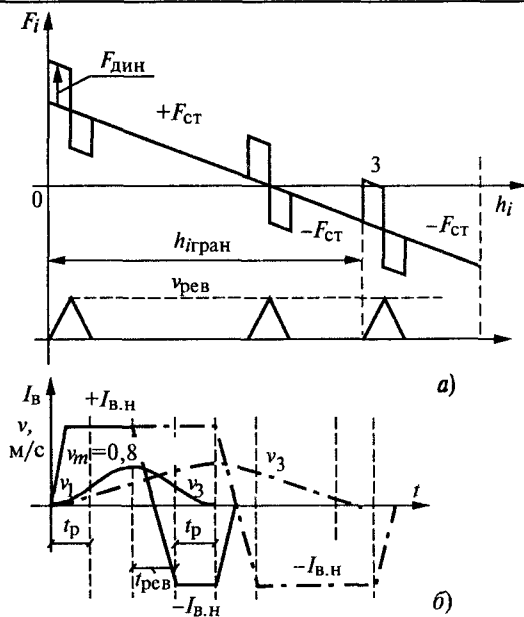


Рис.7. Диаграмма статической нагрузки неуровненного подъема в режиме "ревизия" при $Q_{гр} = 0$ (а), процессы при обработке диаграммы с ограничением рывка на минимальном пути движения (б)

ленной точки h_i при данной $\pm F_{ст}$ требуется $-F_{дв}$. На многоканатных двухсосудных подъемах с уравниванием канатов всегда $|F_{дин}| > |F_{ст}|$ и пуск с любой точки h_i осуществляется при $+F_{дв}$. На некоторых отрезках пути неуровненных подъемов может быть $|F_{ст}| > |F_{дин}|$ и возникает необходимость тормозного разгона.

При одинаковой форме диаграммы $F_{ст} = f(h_i)$ для не полностью неуровненных многоканатных (n_i) и неуровненных подъемов, $Q_{гр} = 0$, соответственно:

$$F_{ст} = (H_n - 2h_i)(G_{г.к} - G_{х.к}); \quad F_{ст} = p_k(H_n - 2h_i).$$

Так как изменение $F_{ст}$ происходит по пути, то определение знака $I_v, F_{дв}$ целесообразно выполнить также в функции h_i при облегчающем условии: в режиме "ревизия" $m_\Sigma = \text{const}, a_{\min} = \text{const}, F_{дин} = a_{\min} m_\Sigma = \text{const}$.

Выбор оптимального режима пуска с разграничением $+F_{дв}$ или $-F_{дв}$ вытекает из $F_{дв} = m_\Sigma a_{\min} + P_k(H_n - 2h_i) = 0$.

Путь h_i вычисляется с одной и той же начальной точки на оба направления движения. Разграничительная точка 3 по диаграмме рис.7,а:

$$h_{i\text{гран}} = \frac{1}{2} \left(H_n + a_{\min} \frac{m_\Sigma}{p_k} \right).$$

Если подъемный сосуд остановился в точке $h_i < h_{i\text{гран}}$, то выбирается $+I_v, +F_{дв}$: при $h_i > h_{i\text{гран}}$ — задается $-I_v$ на данное направление движения для разгона по программе в режиме торможения. Путь до граничной точки 3, соответствующей $h_{i\text{гран}}$, может фиксироваться путевыми датчиками. Точность определения точки 3 не требуется, так как при $F_{дв} \rightarrow 0$ выбор неправильного знака I_v приводит на время $t_{рев}$ к движению в свободном выбеге или развороте с Δv_{\min} и ΔI_{\min} .

Нежелательные процессы пуска могут возникнуть на

двухскиповых неуровненных подъемах при движении в режиме "ревизия" из его верхнего положения снова вверх в направлении переподъема-спуска второго скипа на длинной ветви каната.

Для подъемной установки с $H_n = 1100$ м, $Q_{гр} = 100$ кН, $F_{ном} = 310$ кН, $m_\Sigma = 160 \div 190$ кН·с²/м, $t_{нар} = 2$ с, рабочей диаграммой по рис.4,а после разгрузки поднятого скипа $F_{ст}$ изменяется от $F_{ст1} = -10$ кН до $F_{ст2} = -110$ кН и устанавливается $|F_{ст2}| = |-110| > |F_{дин} = 5,7|$ кН. При этом пуск должен осуществляться в тормозном режиме. Задаваемые по основной структуре САУ $+I_{в.ном}$, при $F_t = 0, +F_{дв} \rightarrow +F_{ном}$ будет определять неприемлемое ускорение

$$a_{кон} = [(F_{ст2} + F_{ном})/m_\Sigma] \rightarrow 2,5 \text{ м/с}^2.$$

Для уменьшения ошибки управления при пуске использовалось устройство ограничения развития $+I_v$, прерывания I_v на время $t_{рев}$ посредством ключей в цепи РТ по схеме рис.1 до достижения требуемых $-I_v, -F_{дв}$ и тормозного пуска. Достижимые процессы приведены на рис.6,в. На время изменения $+I_v$ до $-I_v$ при $I_v = 0$ привод работает в режиме свободного неуправляемого разворота под действием протягивающего груза на спуск с $a_{кон} = F_{ст2}/m_\Sigma = 0,55 \text{ м/с}^2$, что можно считать допустимым. Более целесообразным является применение общего принципа осуществления в режиме "ревизия" задания $-I_v$ для тормозного пуска в зависимости от положения подъемного сосуда по пути.

По схеме рис.1 с начала работы в режиме "ревизия" при замыкании ключей $K_{рев}$ и путевого выключателя $p(h)$ в точке 3 от ИП на вход РО-РВ подается сигнал, требующийся на выходе РВ для обеспечения $-I_{в.ном}$ и пуска в инверторном режиме работы привода. По сигналу "пуск" снимается тормоз ($K_{тр}$), РО-РВ отсоединяется с выдержкой времени от начального задания $-I_{в.ном}$ по каналу $p(h)$. Задание $-I_{в.ном}$ заменяется подключением к каналу основной структуры ПУ-РС-РВ.

Формирование минимального пути движения

Необходимость минимального пути перемещения подъемного сосуда Δh_{\min} возникает в режиме "ревизия" для контроля состояния ствола и канатов, на клетевых подъемах — при многообразных маневрах у разгрузочно-загрузочных площадок.

Достижение Δh_{\min} может затрудняться при формировании ПУ базовой программы движения из четырех отрезков с непрерывным разгоном-замедлением и ограничением ρ_3 , показанной на рис.7,б. Чем больше T_b и t_p , тем больше отклонение от требуемого Δh_{\min} . Можно считать, что процессы при $v_i < v_{\text{дот}} = 0,3 \div 0,1 \text{ м/с}, a_{\min} = 0,3 \text{ м/с}^2$, с t_p и ρ_3 будут определяться условиями реверсирования I_v и ограничением колебания каната. Минимальный путь разгона-замедления $\Sigma h_{\min} = 2h_{\text{разг}} = 2h_{\text{зам}}$

$$h_{\text{разг}} = \frac{\rho_p^3 t_p^3}{6} + \left[\rho_p^3 t_p^3 - \frac{\rho_p^3 t_p^3}{6} \right] = \rho_p^3 t_p^3.$$

При $t_p = 3$ с, $\rho_3 = 0,1 \text{ м/с}^3$ будет $\Sigma h_{\min} = 5,4$ м; при $t_p = 2$ с, $\rho_3 = 0,15 \text{ м/с}^3$ будет $\Sigma h_{\min} = 2,4$ м.

Такая обработка пути посредством КАР-ПУ неудовлетворительна по технологии маневров и потребует прерывание разгона с ρ_3 посредством КАР или использованием тормоза. С целью уменьшения $t_{рев}, \Sigma h_{\min}$ в режиме "ревизия" можно допустить работу привода

с $I_{\text{восл}}$ (на ограниченном пути $H_{\text{п}}$ при малых значениях $+F_{\text{ст.нач}}$, $-F_{\text{ст.кон}}$ (рис.7,б) и малых токовых нагрузках), при начальных параметрах настройки ПУ, САУ: $K_{\text{до}}, I_{\text{восл}}, v_{\text{рев}}, a_{\text{мин}}, t_{\text{рmin}} = a_{\text{мин}}/\rho_3, F_{\text{динmin}}$. Задание $a_{\text{мин}} = 0,3 \text{ м/с}^2, \rho_3 = 0,2 \div 0,3 \text{ м/с}^2$ устанавливается изменением параметров в ПУ. При $I_{\text{восл}}$ должно быть скорректировано задание скорости реверсии для обеспечения $v_{\text{ревmax}} = 0,3 \text{ м/с}$. При таких условиях управления электроприводом можно обеспечить удовлетворительный по технологии путь маневров $\Sigma h_{\text{мин}} = 0,65 \div 0,3 \text{ м}$.

Влияние прерывистых токов в приводе на технологические процессы

Прерывистость токов ТП и низкочастотные колебания параметров привода могут возникать на разных v . Колебания на v_{max} на малых участках пути с $\pm F_{\text{ст}} \rightarrow 0$, а также при $F_{\text{ст}} = 0$ на всем пути движения отображены на осциллограммах рис.8,а,б и соответствуют точке А на диаграмме рис.8,д. Для большинства подъемов характерны длительные изменения знака $\pm F_{\text{ст}}$. Наибольшее неблагоприятное влияние $I_{\text{пер}}$ проявля-

ется на $v_{\text{сниз}} \cong v_{\text{рев}}, F_{\text{стmin}}, (dF_{\text{ст}}/dt)_{\text{мин}}$ при наибольшем отклонении от линейности механических характеристик, при $(U_d^*/I_d^*)_{\text{пер}} < (U_d^*/I_d^*)_{\text{непер}}$, при расширяющейся зоне граничной характеристики $I_{\text{пер}}$. Колебания параметров привода в режиме реверсии показаны на рис.8,в, этот процесс при $I_{\text{я}} \rightarrow 0$ соответствует точке Б на рис.8,д. Для создания при $I_{\text{пер}}$ характеристики регулирования, подобной при $I_{\text{непер}}$, применяют компенсирующие контуры. Для "оптимизации" контура $I_{\text{я}}$ при изменении коэффициента усиления контура и постоянной времени объекта, в его структуру вводится самонастраивающаяся эталонная модель ЭМ и корректирующее устройство с передаточными функциями [1]

$$W_{\text{эм}}(p) = 1/(\alpha_1^2 T_{\mu}^2 p^2 + \alpha_1 T_{\mu} p + 1);$$

$$W_{\text{кв}}(p) = (T_{\mu} + T_{\text{я}})p + 1.$$

Включение ЭМ в структуру САУ показано на рис.1, компенсирующий сигнал формируется по разности фактического и желаемого тока на выходе ЭМ для подачи на вход ТП. Результаты внедрения отражены в [1].

При формировании нелинейной компенсации невозможно создать САУ однокачественную во всех точках механических характеристик привода ТП-Д, поэтому при наличии ЭМ ошибки управления при длительных $I_{\text{пер}}$ все же сохраняются. Облегчающим обстоятельством для такой компенсации является использование в САУ привода подъема демпфированной настройки контура тока (РТ).

Ввиду того, что на шахтных подъемах привод ТП-Д может работать при $I_{\text{я}} \rightarrow 0, U_{\text{дmin}}, v_{\text{мин}}$ длительно (рис.8,б,в), то представляется целесообразным сузить область $I_{\text{пер}}$ (рис.8,д) путем выбора индуктивности силовой цепи не из условия ограничения пульсаций $I_{\text{я,пер}}$, а по условию уменьшения компенсируемого значения ΔU_d^* на уровне сопротивления движения и $I_{\text{пер}} \cong I_{\text{сопр.движ}}$. Может оказаться целесообразным включение в цепь ТП-Д дополнительного индуктивного дросселя. При шестипульсной схеме ТП

$$L_{\text{др}} = \frac{0,1 E_d \max \sin \alpha}{\omega I_{\text{я,сопр.движ}}} - L_{\text{я,дв}}.$$

Уменьшение вероятности работы привода в области $I_{\text{пер}}$ при переходе $F_{\text{ст}}$ через нуль может быть достигнуто уменьшением времени нахождения привода в области $I_{\text{пер}}$ путем существенного уменьшения $I_{\text{восл}}$ двигателя, увеличения $I_{\text{я}}, dI_{\text{я}}/dt \cong dF_{\text{ст}}/dt$, как это показано на рис.8,з. При этом $t_{\text{пер}2} < t_{\text{пер}1}$.

Дополнения к основной структуре САУ

Схема ПУ-САУ по рис.1 дополняется устройствами, обеспечивающими:

- задание сниженного ускорения в ПУ при выходе на любую установившуюся скорость $v_{\text{уст}}$ для ограничения пика активной мощности при пуске с определением точки задания по разности $v_{\text{уст}}$ и $\Delta v_{\text{перех}}$ неизменного заданного значения;
- работоспособность привода при глубоком снижении U_c ;
- независимое ограничение $I_{\text{двыпр}}, I_{\text{динвер}}$; ограничение $I_{\text{я}}$ для уменьшения перерегулирования v_i за время трогания машины: при подъеме груза (примерно $0,8 I_{\text{я,ном}}$), при перегоне порожних скипов (примерно $0,4 I_{\text{я,ном}}$), только при подъеме тяжелых грузов;
- управление одновременно приводом и тормо-

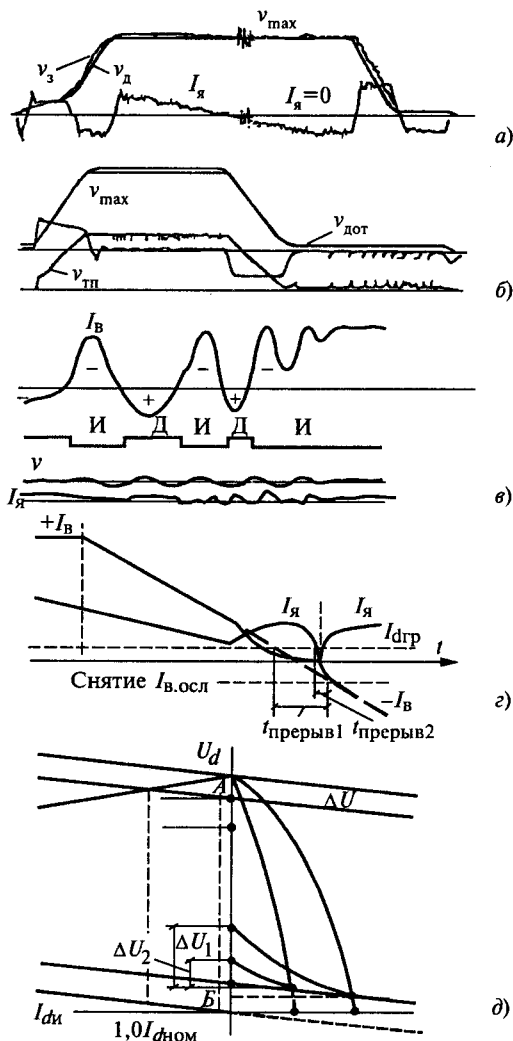


Рис.8. Диаграммы с режимами работы привода в области прерывистых токов:

а — при изменении знака $F_{\text{ст}}$; б — при $F_{\text{ст}} = 0$ на всем пути движения; в — при изменении знака $F_{\text{ст}}$ при движении на скорости реверсии; г — то же, что на рис.8,в, но с использованием компенсирующего контура; д — характеристики с ограничением области $I_{\text{пер}}$ путем использования дополнительной индуктивности в цепи ТП-Д

зом для точности останковки;

— компенсацию влияния $E_{дв}$ при взаимозависимом регулировании $I_{в}$, $I_{я}$ и др.

Для исключения опрокидывания инвертора при переходе привода в область верхней ограничительной характеристики следует ограничивать $I_{динв}$ заданием рывка ρ_3 , который обеспечивал бы $t_{рmax} = a_{гран}/\rho_3 = t_{рев}$, а формирование замедления по выражению:

$$a_{гран} \leq [\pm Q_{гр} + G_{кан}(h_i) - K_F I_{дфmax}] / m_{\Sigma};$$

$$I_{дфmax} = \frac{2\sqrt{2}}{X_n} E_2 \frac{\pi}{m} \cos \beta.$$

Это еще одно требование на ограничение ($dI_{в}/dt$), ($dF_{дв}/dt$) в начале замедления.

Эксплуатационные процессы привода

Качество работы привода ТП-Д с реверсом $I_{в}$ иллюстрируется по основным видам согласованного управления при сложных режимах изменения знака $I_{в}$, $F_{дв}$.

По осциллограмме рис.9,а привод при замедлении работает в режиме, близком к свободному выбегу с изменением сопротивления движению и $\pm F_{ст}$. Выполнение программного замедления с v_{max} до $v_{дот}$ обеспечивается двойным переходом с двигательного режима в тормозной и обратно практически без скоростной ошибки. На рис.9,б показаны процессы при перегоне порожних скипов. При достижении v_{max} одновременно $I_{я} \equiv I_{ст} \rightarrow 0$ и $I_{в} \rightarrow 0$. В точке "0" $+I_{в}$ меняет знак на $-I_{в}$ и, так как должен быть $I_{я} \equiv -I_{ст}$, то привод непрерывно изменяет величину и знак момента. При уменьшении $I_{в}$ возрастает $I_{я}$, но при малых абсолютных значениях это не существенно, так как происходит при редких режимах работы.

На осциллограмме рис.9,в показано управление с двумя видами согласованного изменения знака $I_{в}$, $F_{дв}$:

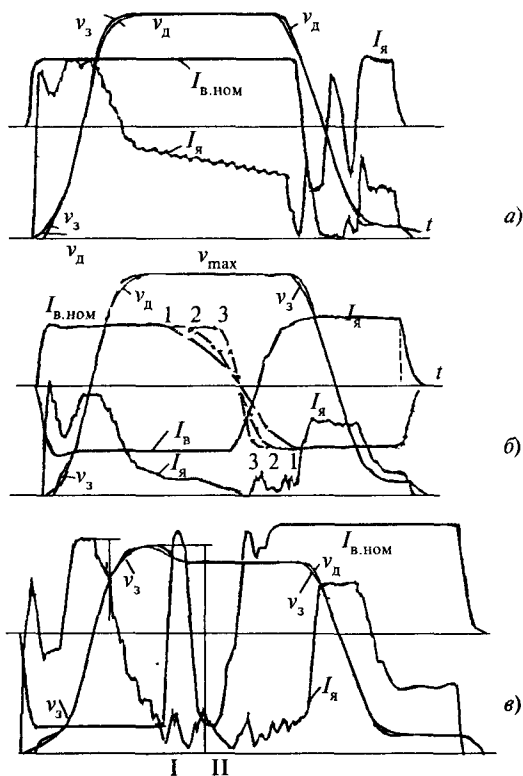


Рис.9. Цикловые диаграммы движения и нагрузок в автоматическом режиме работы при подъеме груза и перегоне порожних скипов

на участке I при создании принудительного уменьшения v_3 и изменения знаков Δv , $I_{в}$, $F_{дв}$, а затем на участке II — при изменении знака $F_{ст}$ при разных $K_{р0}$.

При всех рабочих и нештатных режимах работы при создании рассогласования $v_{д}$ и v_3 , при изменении знака $F_{ст}$ обеспечивается непрерывный переход ТП из выпрямительного режима в инверторный и обратно для выполнения заданной диаграммы скорости с высокой точностью: $v_{д}$ практически совпадают с v_3 в течение циклов при изменении нагрузки от +100% до -20% номинальной для данного подъема и в пределах $\pm 100\%$ при других типах подъемов.

Отличительные аварийные режимы привода ТП-Д применительно к шахтному подъему

Электропривод характеризуется некоторыми аварийными режимами. В случае исчезновения U_c и остающейся замкнутой цепи ТП-Д создается неуправляемый режим динамического торможения: сохраняющаяся $E_{дв}$ через коммутируемые фазы трансформатора и выпрямителя создает кратковременные аварийные токи. При этом тормозной момент двигателя развивает замедление больше допустимого по ЕПБ. Создающиеся вследствие опрокидывания инвертора сверхтоки и тормозные замедления оказываются опасными при спуске людей.

Указанные негативные особенности тиристорного привода являются аргументом в пользу одновременного применения быстродействующих выключателей ВАТ, а также системы аварийного запираания ТП.

Области применения привода ТП-Д с реверсом $I_{в}$

Применение этого привода для скиповых установок не вызывает существенных замечаний. Верхнюю границу применения однодвигательного привода ТП-Д с реверсом $I_{в}$ можно определить мощностью до 4000 кВт и $T_{в} = 7$ с в связи с увеличением стоимостных показателей и ухудшением качества управления в сравнении с приводом ТП-Д и реверсивным ТП. Трудности управления могут устраняться приведенными выше или другими схмотехническими решениями.

Электроприводы ТП-Д с реверсом $I_{в}$ клетевых подъемных установок по сравнению со скиповыми отличаются меньшей мощностью — до 1800 кВт, $T_{в} \approx 2,5$ с, $t_{нараст} \approx t_{отт} = 0,6 \div 0,7$ с при $K_{фв} = 5$, что несколько облегчает управление, но все же их применение ограничивается или оказываются нежелательным ввиду более сложных технологических режимов работы, отражающих:

— неопределенность выбора направления движения (В и Н) и выбора режима подъема или спуска груза $\pm Q_{гр}$, $\pm F_{ст}$, так как к началу движения из исходного пункта возможен любой знак $\pm F_{ст}$ и будет требоваться изменение знака $\pm F_{дв}$;

— затруднение формирования оптимального процесса пуска при структуре САУ с заданием $+I_{в}$, но при необходимости задания требуемого знака $-I_{в}$ для тормозного пуска на спуск груза обязательного применения технических средств для определения $Q_{гр}$, $\pm F_{ст}$ до подачи сигнала на пуск, что на клетевых подъемах более затруднительно, чем на скиповых;

— затруднения при осуществлении реверсирования при маневрах с обработкой малого пути перемещения, что часто повторяется на многогоризонтных установках, вследствие значительных для этого процесса $t_{рев}$ и недостаточного быстродействия привода $dI_{в}/dt$,

$dF_{дв}/dt$, а при регулировании положения подъемного сосуда на уровне загрузки-разгрузки дополнительно вследствие требуемого изменения знака $\pm F_{дв}$ в процессе регулирования;

— нежелательность при длительных режимах по перевозке людей колебательных процессов на сниженных скоростях $v_{рsv}$ в области $I_{прер}$ и необходимость увеличения индуктивности якорного дросселя или использования схмотехнических решений, подобных указанным выше;

— длительность периодов работы с $F_{ст} < F_{дв.ном}$ и $I_{осл}$, что определяет увеличение $I_{я}$, дополнительные тепловые потери в приводе;

— возможность возникновения указанных или других аварийных режимов с резкими торможениями и чрезмерными усилиями в электромеханической системе, а на многоканатных машинах возможность проскользывания канатов относительно ведущего шкива, особенно опасного при перевозке людей.

Пример внедрения редукторного привода ТП-Д с реверсом $I_{в}$ мощностью 700 кВт с $T_{в} = 1,2$ с, $K_{ф.в} = 5$, $t_{рsv} = 0,5$ с подтвердил работоспособность уста-

новки. При использовании запирающих каналов $I_{я}$, $I_{в}$ после отторживания машины: время свободного разворота близко к времени нарастания $I_{в}$ до $I_{в.ном}$, перерегулирование v весьма мало на пути $\Delta h_{мин} = 0,3$ м, что по технологии установки приемлемо. Но этот результат не может являться основой вывода о применении этого привода для клетевых подъемов всех исполнений. На установках с тихоходными двигателями и большими $T_{в}$ процессы реверсирования $I_{в}$ и $F_{дв}$ с перечисленными выше затруднениями в управлении, могут не удовлетворять более жестким технологическим требованиям.

При применении привода ТП-Д с реверсом $I_{в}$ необходимо учитывать технологические особенности разных исполнений подъемных установок и в соответствии с этим в основной структуре САУ использовать предлагаемые или другие схмотехнические дополнения, устраняющие негативные проявления этих особенностей.

Список литературы

1. Католиков В.Е., Динкель А.Д., Седуниин А.М. Тиристорный электропривод с реверсом возбуждения двигателя рудничного подъема. М. Недра. 1990. С. 382.

Электроприводы мощных конвейерных линий

КУЗНЕЦОВ Ю.П., НИКИФОРОВ Е.А.

Разработаны технические решения и пути реализации электроприводов на основе двигателей с фазным ротором и тиристорных преобразователей в цепи ротора всего ряда приводов мощных конвейерных линий с единичной мощностью двигателя до 1600 кВт.

В течение тридцати лет ОАО "Электропривод" проводил работы с целью создания электропривода ленточных конвейеров, работающих в различных отраслях промышленности.

Ленточные конвейеры преимущественно осуществляют транспортирование сыпучих материалов (уголь, руда, порода вскрышных работ и т.п.). Основой ленточных конвейеров является резиноканевая или резиноканевая лента, смонтированная на многочисленных роликах, приводимая в движение электроприводом и перемещающая на большие расстояния сыпучий груз.

Головными организациями по конвейеростроению разработана экономически и технически обоснованная номенклатура конвейеров тяжелого типа для циклично-поточной технологии открытых горных работ и для магистрального транспорта горной массы или сыпучих материалов на большие расстояния.

Указанные конвейеры предназначены для транспортирования горной массы с насыпной плотностью от 1,6 до 3,5 т/м³ под углом от нуля до 16° на расстояния до 10—20 км.

Конвейеры эксплуатируются при изменении температуры окружающей среды в диапазоне от +40 до -45°С. Устанавливаются открыто или под навесами.

Конвейеры имеют головные приводы с однобарабанными, двухбарабанными и трехбарабанными вариантами.

Многоприводный вариант с промежуточными приводами наиболее распространен для мощных конвейеров большой протяженности. Общая мощность рас-

пределяется на несколько частей (от двух до десяти), что значительно снижает натяжение ленты и позволяет использовать ленту с меньшим показателем по прочности.

Многодвигательный привод конвейеров с целью унификации конструкции разрабатывается на основе унифицированных базовых приводных механизмов, что позволяет несколькими базовыми приводами укомплектовать весь типовой ряд ленточных конвейеров.

Для приводов мощных конвейеров с лентой шириной от 1200 до 2000 мм применяется следующий ряд мощностей электродвигателей: 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250 и 1600 кВт. Параметры приводов в зависимости от характеристик нагрузки конвейеров даны в таблице.

Таким образом, для указанного ряда мощностей необходимо создание соответствующих базовых электроприводов с пускорегулирующей аппаратурой.

Несмотря на значительные разработки механических узлов, усовершенствования в создании мощных резиноканевых лент, приведших к созданию конвейерного транспорта повышенной производительности и дальности перемещения грузов, основные технические требования к электроприводу мало изменились и формулируются практически так же, как и много лет назад. Изменились лишь мощности электроприводов конвейеров и средства их реализации.

1. Несущий орган ленточного конвейера представляет собой многомассовую структуру с гибкими (особенно в процессе пуска) связями со значительными инерционными массами и ограниченным сцеплением

Типовой ряд ленточных конвейеров тяжелого типа

Тип конвейера	Ширина ленты, мм	Производительность, м ³ /ч	Длина конвейера, м	Мощность привода				
				Мощность двигателя, кВт	Количество			
					1	2	3	4
КСТ.120	1200	1100—2800	400—3900	315	•	•	•	•
				400		•	•	
				500	•	•	•	•
КСТ.140	1400	1200—4800	600—3300	315		•	•	
				400		•	•	•
				630	•	•	•	•
КСТ.160	1600	2100—5250	600—4000	315		•	•	
				400		•		•
				500		•		
				630	•	•	•	•
				800	•	•		•
				1000	•	•	•	
				1600	•	•	•	
КСТ.200	2000	3300—8300	600—4800	400		•		•
				500		•	•	•
				630		•	•	•
				800	•	•	•	•
				1000		•		
				1600	•	•	•	•

Примечание: мощность привода зависит также от прочности ленты (1500—5000 Н/мм) и ее скорости (2,0—5,0 м/с)

между приводными барабанами и несущей лентой.

Первое условие для выполнения пуска конвейера, обеспечивающее надёжность работы ленты без пробуксовки и резких толчков, — необходимость плавного изменения момента двигателя с определенным заданием с нулевого значения до момента трогания и сохранением постоянного динамического момента в процессе всего пуска. Выполнение этого условия удлиняет срок службы ленты.

2. Практически на всех конвейерах требуется создание пониженной скорости, необходимой для первоначальной заправки ленты или при ремонте, а также для осмотра ленты в процессе эксплуатации. Как правило, эта скорость принимается на уровне 10—15% номинальной скорости. Если основное пускорегулирующее устройство не обеспечивает этот режим, то дополнительно устанавливается вспомогательный привод пониженной скорости мощностью соответственно 10—15% мощности основных двигателей.

3. Большинство конвейеров выполняются с многодвигательным вариантом электропривода по различным схемам (установка двигателей как с жесткой их связью между собой через редукторы, так и с гибкой связью посредством ленты конвейера).

Во всех вариантах требуется обеспечение равномерного распределения нагрузки между всеми двигателями как в процессе пуска, так и при номинальной скорости конвейера.

4. Пускорегулирующие устройства должны иметь исполнения для всего унифицированного ряда мощностей: 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250 и 1600 кВт, и выполнять необходимые функции при работе в составе многодвигательного электропривода.

5. Механическая характеристика конвейера пред-

ставляет собой постоянный момент в функции скорости и изменяется от 15—25% номинального момента при отсутствии груза на ленте до 80—90% при грузе на конвейере. В случае аварийной остановки конвейера момент трогания может превышать номинальный расчетный момент приводных двигателей. При этом необходимо учитывать требования наклонных конвейеров, пуск которых может сопровождаться обратным ходом ленты под нагрузкой после снятия тормозов, что недопустимо из-за опасности завала нижнего барабана.

Другой причиной увеличения нагрузки является эксплуатация при отрицательных температурах окружающего воздуха (особенно ниже -25°C), когда лента становится менее эластичной и увеличивает момент сопротивления для электропривода.

6. В любом случае эксплуатации конвейеров (наружная передвижная компоновка или с промежуточными стационарными перегрузочными станциями с закрытым исполнением) масса, а особенно, габариты электропривода имеют существенное значение, так как при больших габаритах необходимо увеличение площади в перемещаемом контейнере или в строительной части перегрузочной станции, что вызывает удорожание стоимости строительства.

7. Важным фактором для выбора привода конвейера являются климатические условия. Большинство конвейеров горнорудной промышленности представляют собой длинные конвейерные линии, иногда перемещаемые после выработки забоев, и оборудование для электропривода практически работает при температурах наружного воздуха, т.е. от +40 до -45°C. При этом добавляются трудности повышенной запыленности, зависящей от характеристик перемещаемого груза (уголь, асбест, железная руда и т.п.).

8. Надежность и простота обслуживания. Данное требование к электроприводу является особенно важным в условиях круглосуточной, непрерывной эксплуатации, так как останов одного из конвейеров комплекса приводит к большим материальным потерям.

Простота в обслуживании необходима при отказе для быстрого устранения неисправности.

Длительное время в качестве типового варианта на мощных конвейерах на приводах устанавливалась и эксплуатировалась реостатно-контакторная схема в роторе фазного двигателя. Указанная схема из-за простоты решений была широко распространена как в Советском Союзе, так и во всех ведущих странах мира [1].

Основной параметр технических требований — плавность пуска достигалась за счет количества пусковых ступеней и принималась из расчета заданного динамического момента, а реально для двигателей до 500 кВт получалось около 6 ступеней; до 1000 кВт — до 12, а до 1600 кВт — 20÷24 ступеней.

Включение ступеней выполнялось в функции времени или в последнее время появились реостатно-контакторные схемы с микропроцессорным управлением с выполнением контроля тока (момента) (фирма АВВ). Большим количеством ступеней шунтирования балластных сопротивлений в роторе достигается необходимый эффект. Но такой способ обуславливает большие габариты и затруднителен в реализации сопротивлений и, естественно, монтажа.

Теоретически наиболее предпочтительный вариант плавного изменения сопротивлений в цепи ротора реализуется жидкостным реостатом с перемещающимися электродами в специальном растворе с высокой проводимостью.

Но в этом варианте есть два основных недостатка: температура замерзания раствора и значительные трудности достижения необходимого диапазона как соотношения максимального и минимального значений сопротивления. И даже при выполнении широкого диапазона геометрия и конструкция соответствуют только одному двигателю, т.е. не удается достичь универсальности при разработке и изготовлении. На опыте нашей разработки жидкостного реостата ЖР-1250 [2] было установлено, что при реализации данного варианта его стоимость значительно превышает стоимость реостатно-контакторного.

Электроприводы УПТФ и ЭТПФ

С учетом длительного опыта проектирования и эксплуатации (по режимам работы конвейера и климатическим условиям) и требований необходимой надежности транспортирования грузов приводам конвейеров наиболее соответствует двигатель с фазным ротором.

По нашему мнению и мнению ведущих электротехнических фирм такой двигатель обладает следующими преимуществами:

1. Меньшие габариты и большая надежность, чем у двигателя постоянного тока.
2. При скорости двигателей 1000 об/мин и меньше срок службы щеточного аппарата больше, чем у двигателя постоянного тока.
3. Построение любых схем регулирования в роторе двигателя значительно проще, чем в статоре двигателя.
4. В системах длительного регулирования скорости всегда есть возможность перейти в режим короткозамкнутого ротора из-за отказа в преобразователе без остановки привода.

Двигатель с фазным ротором при современных средствах позволяет реализовать высоконадежные схемы с тиристорным управлением в цепи ротора. Благоприятные условия работы тиристоры в роторе двигателя из-за соизмеримой мощности двигателя и преобразователя значительно снижают требования к du/dt и di/dt тиристоры. Токи короткого замыкания находятся на уровне пусковых токов, особенно в схемах без рекуперации энергии скольжения.

При регулировании в цепи ротора воздействие на сеть высших гармоник меньше из-за большого воздушного зазора между ротором и статором по сравнению с преобразователем в статоре.

Наличие роторного напряжения на кольцах дает возможность получить обратную связь по скорости, если использовать частоту напряжения, или обратную связь по тахонапряжению, если использовать выпрямленное напряжение ротора.

В обоих случаях не требуется установка дополнительного тахогенератора, а обратная связь непосредственно с двигателя позволяет получить благоприятные динамические характеристики с большим запасом по устойчивости без колебательных процессов, что так важно для длинных гибких линий, какими являются резинотросовые ленты конвейеров.

Несмотря на преимущества тиристорных преобразователей, применение их в пускорегулирующих устройствах, особенно для ленточных конвейеров, до 70-х годов было крайне ограничено. Трудностью при создании тиристорных пускорегулирующих устройств для регулируемых приводов в цепи ротора являлась необходимость создания системы импульсно-фазового управления (СИФУ), отличной от СИФУ, работающей от сетевого напряжения из-за больших диапазонов изменений параметров напряжения ротора:

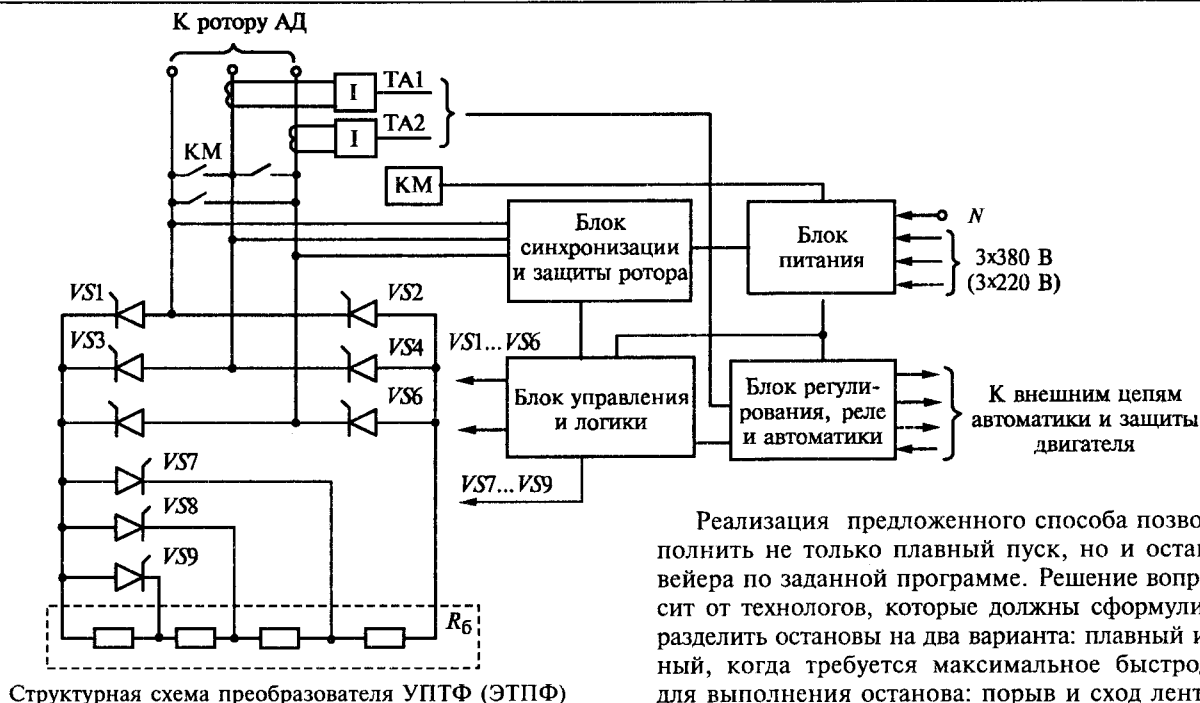
Напряжение ротора	0—2 $U_{\text{рот.ном}}$
Частота ротора, Гц	50—0 0—100
Угол коммутации, град.....	до 75

Развитие силовой полупроводниковой техники и микроэлектроники обеспечило возможность создания новых технических решений [3—5], реализованных в тиристорном устройстве пуска для двигателей с фазным ротором (УПТФ — до 1000 В роторного напряжения, ЭТПФ — свыше 1000 В роторного напряжения).

Структурная схема устройства приведена на рисунке. Регулирующим органом устройства является мостовой тиристорный преобразователь $VS1—VS6$, подключенный к контактным кольцам ротора двигателя и нагруженный на балластный резистор R_6 . Балластный резистор выбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимый момент для трогания и пуска двигателя с номинальной нагрузкой.

Регулирование угла управления тиристорами изменяет ток ротора, а следовательно, и момент двигателя.

Для формирования необходимых пусковых и регулировочных характеристик двигателя во всем диапазоне изменения скорости и момента (от минимального до номинального значений) в процессе регулирования осуществляется шунтирование балластного резистора тиристорами $VS7—VS9$. При скорости более 95% номинальной осуществляется замыкание роторных колец двигателя контактором КМ.



Реализация предложенного способа позволяет выполнить не только плавный пуск, но и останов конвейера по заданной программе. Решение вопроса зависит от технологов, которые должны сформулировать и разделить остановки на два варианта: плавный и аварийный, когда требуется максимальное быстродействие для выполнения останова: порыв и сход ленты и т.п.

Примеры реализации

1. Первые опытные образцы устройств УПТФ прошли опробование в условиях эксплуатации в 1975—1978 гг.

На Череповецкой ГРЭС четыре устройства УПТФ работают на конвейерах топливоподачи с двигателями 250 кВт более 25 лет. В настоящее время требуется замена элементной базы ("Логика-Т") на современную электронную.

2. С 1988 г. на Ковдорском горнообогатительном комбинате эксплуатируются УПТФ на многодвигательном приводе наклонного конвейера мощностью 3x800 кВт. На этом конвейере подтверждены основные решения для пуска наклонного конвейера под нагрузкой и равномерным распределением нагрузки между двигателями.

В 1993 г. для реализации плана развития комбината фирма "Takraf" (ФРГ) подписала контракт на поставку механической части семи конвейеров с единичной мощностью двигателя 710 кВт. В процессе согласования проекта фирма согласилась, что их вариант с 18-ступенчатой схемой и микропроцессорным управлением уступает по многим показателям электроприводу с УПТФ-800.

В 1999 г. фирма "Takraf" и ОАО "Электропривод" ввели в промышленную эксплуатацию конвейеры немецкого производства с электроприводами УПТФ.

3. На Березовском угольном разрезе работает 57 конвейеров с приводами УПТФ с единичной мощностью двигателя 500 кВт. Примерно половина из них многодвигательные. На этом же разрезе в 1997 г. выполнена модернизация многодвигательного электропривода с мощностью 4x1600 кВт с переводом 20 ступенчатой схемы на вариант ЭТПФ с напряжением ротора 1600 В и током ротора 1000 А (схема выполнена без параллельных и последовательных тиристоров).

Испытания электропривода с головным электроприводом 3x1600 кВт с двухбарабанным вариантом и хвостовым приводом 1600 кВт с длиной конвейера 4000 м дали положительные результаты как на холостом ходу, так и при пуске "аварийно" остановленного конвейера с максимальной нагрузкой.

Внешнее управление, регулирование, защита устройства и двигателя осуществляется блоком регулирования, реле и автоматики.

Формирование импульсов управления тиристорами VS1—VS6, а также управление шунтирующими тиристорами VS7—VS9 происходят в блоке управления и логики.

Синхронизирующие напряжения для системы управления тиристорами и защита преобразователя от перенапряжений, возникающих при отключении коммутационной аппаратуры, осуществляется блоком синхронизации и защиты.

В блоке питания преобразуется трехфазное питающее напряжение в напряжение питания для системы регулирования, управления и автоматики.

После завершения разработки получены положительные результаты по реализации всех технических требований, заданных для электропривода ленточных конвейеров, что подтверждает превосходство практически по всем показателям устройств УПТФ и ЭТПФ по сравнению с устройствами аналогичного назначения.

Устройства УПТФ и ЭТПФ обеспечивают:

- любой динамический момент и формирование начального момента при пуске;

- однодвигательный и многодвигательный вариант для всего ряда двигателей, выпускаемых промышленностью (до 5000 кВт);

- работу на пониженной скорости;

- высокую надёжность при всех климатических исполнениях (более 50000 ч наработки на отказ, подтверждено данными эксплуатации);

- унификацию устройств на все мощности с полной заводской готовностью (минимальное проектирование; минимальный монтаж; отсутствие требования по наладке);

- минимальные габариты —

УПТФ800 (кВт) — 800x1600x2200 мм

ЭТПФ1600 (кВт) — 800x4000x2200 мм

(габариты для реостатно-контактного типа для 800 кВт — в 2 раза больше, а для 1600 кВт — в 3 раза).

Привод устойчиво обеспечивал работу на пониженной скорости, пуск во всех режимах с равномерным распределением нагрузки и без колебательных процессов в схеме и механической части конвейера.

4. Подготовлена и опробована схема регулируемого электропривода с преобразователем в роторе типа УТФ с рекуперацией энергии скольжения в сеть. Данная схема позволяет вести непрерывное регулирование скорости конвейера в зависимости от изменяющегося грузопотока [8].

Выводы

1. Разработаны принципы построения электропривода мощных ленточных конвейерных линий на основе двигателя с фазным ротором и тиристорного преобразователя в роторе.

2. Разработана и освоена в производстве гамма преобразователей мощностью 200—1600 кВт для всего типового ряда конвейеров тяжелого типа.

3. В эксплуатацию введены все типопредставители электроприводов конвейеров, включая конвейер длиной 4 км с приводом 4×1600 кВт.

4. На основе многолетнего опыта эксплуатации (более 25 лет) многочисленных устройств (более 1000) подтверждено выполнение всех технических требований, предъявляемых к электроприводам мощных конвейерных линий. УПТФ и ЭПТФ стали универсальными для применения на рассматриваемых механизмах, а также на ряде других механизмов, имеющих близкие требования (дробилки, мощные краны, мельницы и т.п.)

5. Подготовлены новые технические решения для развития рассматриваемого привода.

Список литературы

1. Кузнецов Ю.П., Подаруев А.И. Устройство пуска для двигателей ленточных конвейеров типа УПДЛК500//Электротехническая промышленность. Электропривод. 1975. Вып. 2(37).

2. Кузнецов Ю.П. Привод переменного тока с регулируемым преобразователем в роторе асинхронного двигателя// Доклад на VI научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями". Свердловск, 1988.

3. Кузнецов Ю.П. Состояние и основные направления развития электропривода переменного тока с двигателем с фазным ротором. М.: Информэлектро, 1986.

4. А.с. 646800 СССР. Способ управления асинхронным электродвигателем с фазным ротором и устройство для его осуществления/Ю.П.Кузнецов, М.Ю.Соколов.

4. Deutsches patentamt Bundesrepublik. Pat. DE2811302C2 H02P5/40 "Einrichtung zur Regelung der Drehzahl eines mehrphasigen Asynchron-Schleifringlaufermotors/J.P.Kuznecov, M.J.Sokolov. 1984.

5. Pat. № 003858. № 148921 India. Invention for a device for controlling induction motor with phase rotor/J.P.Kuznetsov, M.J.Sokolov. 1978.

6. Кузнецов Ю.П., Соколов М.Ю., Пчелкин А.В. Устройство пуска двигателей с фазным ротором типа ЖР1250//Электротехническая промышленность. Электропривод. 1976.

7. Пат. SU 1792222 A1 СССР. Способ управления асинхронным двигателем/ Ю.П.Кузнецов.

Энергосбережение средствами электропривода в коммунальном хозяйстве города

АБРАМОВ Б.И., ИВАНОВ Г.М., ЛЕЗНОВ Б.С.

Приведены некоторые примеры внедрения регулируемых электроприводов насосных агрегатов в системах теплоснабжения и холодного водоснабжения, а также в системах водопровода и канализации.

В последние годы в условиях острого дефицита энергоресурсов значительное внимание во многих странах мира уделяется созданию энергосберегающих технологий в промышленности, транспорте, сельском хозяйстве, в том числе и в коммунальном хозяйстве.

Многие годы аналогичные работы применительно к городскому коммунальному хозяйству ведут ОАО "Электропривод" и НИИ "Водгео", используя для этого возможности регулируемого электропривода (РЭП) [1—3].

Наиболее широко эти технологии используются для систем теплоснабжения и холодного водоснабжения зданий, а также для систем водопровода и канализации.

Регулируемый электропривод в системах теплоснабжения и холодного водоснабжения

Широкое применение в системах теплоснабжения городов России получили автоматизированные центральные тепловые пункты. Применение систем автоматического управления позволяет существенно экономить тепловую энергию. Использование систем автоматического отпуска теплоты создает переменные гидравлические режимы в магистральных теплопроводах.

Если не принимать адекватные меры по регулированию параметров гидравлики при отпуске теплоносителя с коллекторов ТЭЦ или РТС, то при прикрытии клапанов на ЦТП будет возрастать давление в подающей магистральной сети, что создает неблагоприятные условия для трубопроводов, повышает утечки воды через неплотности в соединениях, на поврежденных участках.

Повышение давления вызывает увеличение непроизводительных потерь теплоты у неавтоматизированных потребителей, которые имеются в любом районе теплоснабжения. Эти проблемы легко решаются при применении регулируемого электропривода.

Регулирование частоты вращения сетевых насосов позволит снизить напоры в магистральных сетях и, тем самым, повысить надежность их эксплуатации и сократить утечки воды, привести в соответствие характеристики сети и насосов, что обеспечит экономию электроэнергии. В настоящее время при постоянных гидравлических режимах такое соответствие достигается изменением степени открытия регулирующей задвижки на подающем трубопроводе сети (дресселированием).

Имеющийся опыт эксплуатации регулируемого электропривода показал его высокую экономичность. В среднем экономия электроэнергии достигает 10—15%, экономия воды — 2—3%.

Целесообразно применение регулируемого электропривода в центральных тепловых пунктах для управления работой насосов холодного водоснабжения. В настоящее время применяется ступенчатое регулирование производительности и напора за счет включения различного количества насосных агрегатов. Регулируемый электропривод не только позволит экономить электроэнергию, но и значительно удлинит срок службы насосов.

Весьма широка область применения регулируемого электропривода в котельных для управления подпиточными и рециркуляционными насосами, дутьевыми вентиляторами, дымососами, системами приточной и вытяжной вентиляции. Регулируемый электропривод помимо существенной экономии электроэнергии позволяет экономить и тепловую энергию, а также улучшает качество технологических процессов путем включения его в общую систему автоматизации.

Весьма перспективными с точки зрения применения регулируемого электропривода являются хозяйственные насосы системы холодного водоснабжения. В условиях изменения давления в городской сети водопровода и изменяющегося в течение суток расхода холодной и горячей воды в жилых и административных зданиях для поддержания требуемого давления необходимо изменять частоту вращения приводных двигателей в пределах от 0,7 до 1. При водоснабжении зданий с этажностью 6—10 в отдельные временные интервалы давление в сети городского водопровода превышает требуемое для нормального водоснабжения. Тогда насосы системы ХВС на ЦТП должны останавливаться. Опыт показывает, что при регулировании частоты вращения насосов ХВС достигается экономия электрической энергии порядка 15—30% и холодной воды (за счет снижения потерь от утечек) порядка 3—4% [4—6].

В качестве примеров можно привести некоторые из работ ОАО "Электропривод":

— станции автоматического управления частотно-регулируемым электроприводом насосных агрегатов для центральных тепловых пунктов жилых районов Москвы и Московской области; внедрено в течение 1997—1999 г. свыше 2500 станций (МГП "Мосгортепло", МП "Мостеплоэнерго" и др.);

— региональная программа "Энергоресурсосбережение и экология" разработана для г.Ижевска (I этап); по II этапу разработан эскизный проект для пилотных объектов МП "Ижводоканал" и МП "Горкомунтеплосеть"; на III этапе внедрена первая станция управления насосными агрегатами ГВС мощностью 50 кВт (ЦТП-I г.Ижевска). Экономия электроэнергии на этом объекте составила около 17% по всему ЦТП, а утечки воды снизились на 2%.

На рис.1,а приведена схема станции автоматического управления двухнасосным агрегатом, а на рис.1,б — структурно-функциональная схема при питании одного из электродвигателей станции от преобразователя частоты.

Станция предназначена для автоматического и ручного управления насосными агрегатами. В такой станции количество подключаемых насосных агрегатов может быть от 2 до 6.

Станция управления состоит из блока автоматики (БА), осуществляющего обработку полученной информации и выдачу управляющих воздействий на насосные агрегаты; панели управления и сигнализации (ПУС), позволяющей осуществлять выбор режима управления насосными агрегатами и визуальный контроль за режимами работы каждого насосного агрегата; пускозащитной аппаратуры, осуществляющей подключение выбранного насосного агрегата к преобразователю или к сети и защиту от коротких замыканий и перегрузок по току.

Основные функции станции управления: контроль над работой насосов и переключение на резервный насос при аварии рабочего; автоматическое включение и выключение насоса при заданных минимальном и максимальном давлениях в напорном трубопроводе; автоматическое подключение одного или двух дополнительных насосов при недостаточной производительности рабочего; автоматическое чередование включенных насосов через заданные интервалы времени для обеспечения равномерной загрузки насосов; возможность запуска и останова каждого насоса кнопками в режиме ручного управления прямым пуском от сети; выдача на диспетчерский пульт сигналов о режимах работы станции.

Регулируемые электроприводы в системах водопровода и канализации

На перекачку чистых и сточных вод в России ежегодно расходуется 120—130 млрд.кВт·ч электроэнергии. Стоимость электроэнергии в общей сумме эксплуатационных расходов на водопроводно-канализационных предприятиях коммунального хозяйства при использовании подземных вод 70—80%. Несмотря на это, современные насосные установки работают не в оптимальном режиме, вызывая дополнительные потери электроэнергии.

Потери энергии в насосных установках обусловлены, главным образом, несоответствием режимов работы насосов и режимов водопотребления или притока сточных вод [3].

Специалисты лаборатории автоматизации института "Водгео", занимающиеся этой проблемой около 40 лет, показали в своих исследованиях на примере внедренных ими САУ на объектах водоканалов различных городов, что реализация энергосберегающих технологий перекачки чистых и сточных вод обеспечивает экономию электроэнергии, расходуемой на перекачку чистых и сточных вод, (5—15%), снижение расхода чистой воды за счет стабилизации давления в водопроводной сети (2—5%), уменьшение сброса сточных вод в канализацию (2—4%), уменьшение аварий и износа гидромеханического и электротехнического оборудования благодаря отсутствию гидравлических ударов и сокращению количества запусков и остановок насосных агрегатов и др. [3,7,8].

Основой разработанных технологий являются системы автоматического управления (САУ) технологическими режимами работы насосных установок, водопроводных или канализационных сетей. Одним из основных элементов САУ является регулируемый электропривод (РЭП) насосных агрегатов, который дает возможность плавно изменять частоту вращения рабочих колес насосов. В разработках использованы различные виды регулируемого электропривода, изготавливаемые отечественными предприятиями и зарубеж-

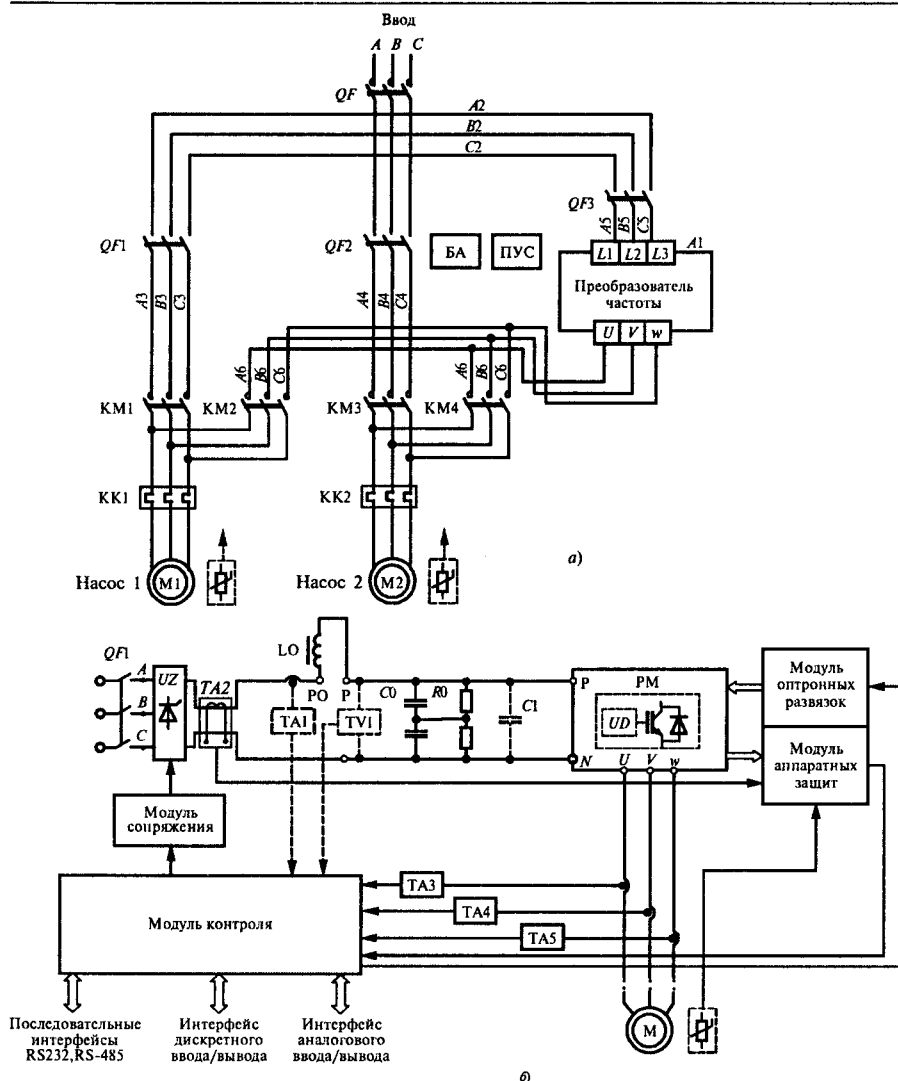


Рис.1. Схема станции автоматического управления двухнасосным агрегатом (а) и структурно-функциональная схема питания электродвигателя насосного агрегата от преобразователя частоты (б):

БА — блок автоматики; ПУС — панель управления и сигнализации; УЗ — выпрямитель; РМ — модуль инвертора, ТА — датчики тока; ТВ — датчики напряжения; LO — дроссель; М — электродвигатель

ными фирмами, в том числе частотно-управляемые электроприводы; электроприводы по системе "вентильный двигатель"; электроприводы по схеме асинхронно-вентильного каскада и др.

При участии специалистов института "Водгео" и ОАО "Электропривод" создан и внедрен целый ряд САУ, оснащенных регулируемыми электроприводами переменного тока мощностью от 40 до 5000 кВт.

1. САУ насосных установок второго подъема Восточной водопроводной станции г.Москвы. На этой станции на первом этапе создания САУ при модернизации двух агрегатов были использованы насосные агрегаты с пологой, плавнорегулируемой напорной характеристикой Q-H. В качестве регулируемого привода применен специализированный объектно-ориентированный привод мощностью 1600 кВт по схеме асинхронного вентильного каскада, изготовленный на заводе "Электровыпрямитель" (г.Саранск) и ЧЭАЗ (г.Чебоксары), по заказу Мосводоканала и технического заданию института "Водгео" и ОАО "Электропривод".

Испытания и полугодовой опыт эксплуатации САУ

показали, что она обеспечивает экономию электроэнергии около 3,0 млн. кВт·ч в год. В дальнейшем общее число насосных агрегатов с РЭП было доведено до шести. При этом три насосных агрегата мощностью 1250 кВт каждый были оснащены групповым приводом по системе "вентильный электродвигатель" с использованием преобразователя СПЧРС-10000/700 (изготовитель ТЭЗ), а один — индивидуальным приводом мощностью 1250 кВт с использованием частотного преобразователя ПЧ-ТПП (изготовитель ОАО "Электровыпрямитель").

В настоящее время находится в опытно-промышленной эксплуатации разработанная ИК "Ягорба" объединенная САУ, в состав которой входят 6 регулируемых и 11 нерегулируемых насосных агрегатов. Система управления построена на базе промышленного компьютера. В результате оснащения насосной установки регулируемым электроприводом и создания объединенной системы автоматизированного управления режимом работы объекта удельный расход энергии на перекачку воды снизился примерно с 150—155 кВт·ч/тыс.м³ до 105—120 кВт·ч/тыс.м³. При этом экономия энергии выросла до 10 млн.кВт·ч в год, что составляет 20—25% общего энергопотребления.

2. Станция автоматического управления по заданному уровню воды с плавным пуском и торможением электродвигателей канализационных насосов с элект-

родвигателем мощностью 160 кВт, пущена в эксплуатацию ОАО "Электропривод" в 1999 г. в г.Пермь (РНС-2 МП "Пермводоканал"). Это позволило резко уменьшить расходы на ремонт электродвигателей и насосных агрегатов.

3. САУ насосной установки второго подъема г.Северск (Томская область). Здесь оснащение насосного агрегата регулируемым приводом мощностью 250 кВт также сочеталось с заменой высоконапорного насоса 8НДВ на насос Д1250-63 с большей подачей и более низким напором. Был использован асинхронный частотно-управляемый электропривод с преобразователем типа "Эратон" производства АО "Эрасиб". Разработанная МК конторой "Ягорба" САУ в 1997 г. введена в промышленную эксплуатацию [8].

По результатам испытаний и эксплуатационным наблюдениям в течение двух лет экономия электроэнергии составляет 55%, причем 20% за счет применения регулируемого привода и 35% за счет приведения в соответствие рабочих характеристик насоса требуемому режиму работы системы. КПД и cosφ системы

РЭП составляют, соответственно, 97—98% и 0,90—0,92.

Работы по созданию этих систем велись при непосредственном участии эксплуатационного персонала насосных станций водоканалов Москвы, Перми и Северска.

На рис.2 приведена структурно-функциональная схема станций автоматического управления пятинасосным агрегатом с высоковольтными синхронными электродвигателями, с одним преобразователем частоты и возможностью поочередного плавного пуска одного из группы установленных насосов.

Здесь регулирование частоты вращения электродвигателя осуществляется по схеме "вентильного двигателя" на базе высоковольтных преобразователей частоты серии ПЧ-ТТП, выполненных на отечественных комплектующих.

Высоковольтный преобразователь частоты в этой схеме обеспечивает прямое преобразование напряжения питающей сети 6, 10 кВ, частотой 50 Гц в напряжение регулируемых частоты и значения, что обеспечивает экономичные режимы работы насоса.

ШУП — шкаф управления преобразователем, в состав которого входят системы импульсно-фазового управления, выходные каскады, системы защит электродвигателя и преобразователя, средства режимной автоматики, системы индикации и др.

В качестве масляных выключателей *B* на входе и выходе ТПЧ регулируемого электропривода могут быть использованы имеющиеся в РУ резервные ячейки масляных выключателей.

При использовании одного преобразователя частоты для плавного пуска любого из группы установленных агрегатов с последующим переключением электродвигателя *СМ* на прямое питание от сети, а также автоматического переключения любого *СМ*, питающегося от сети, на питание от преобразователя

частоты, в схему введены вакуумные выключатели *A* с последовательно соединенными разъединителями.

Накопленный опыт позволил сформулировать основные положения, обеспечивающие эффективно использование РЭП в насосных установках:

— высокая эффективность работы насосной установки достигается лишь в том случае, если обеспечивается надлежащий технологический режим с помощью системы автоматического управления с РЭП;

— разработке САУ должно предшествовать глубокое изучение технологического режима работы объекта; на этой основе принимаются основные технические решения и дается их технико-экономическое обоснование, подтверждающее техническую возможность и экономическую целесообразность применения РЭП и САУ насосной установки.

В ходе выполнения указанных этапов работы решаются задачи, связанные с:

— выбором установок, на которых выгодно применение РЭП; определением способов регулирования и средств, которые целесообразно применять на объекте;

— выявлением необходимых изменений, которые нужно внести в гидравлические и электрические схемы объекта;

— определением нужного состава гидромеханического и электрического основного оборудования и его размещения;

— определением ожидаемой экономии энергии, чистой воды и других ресурсов, а также эксплуатационных расходов и капитальных вложений.

Для решения этих задач и выполнения расчетов авторами разработаны соответствующие методики.

Таким образом, наибольшая эффективность от внедрения САУ насосных установок возможна лишь в том

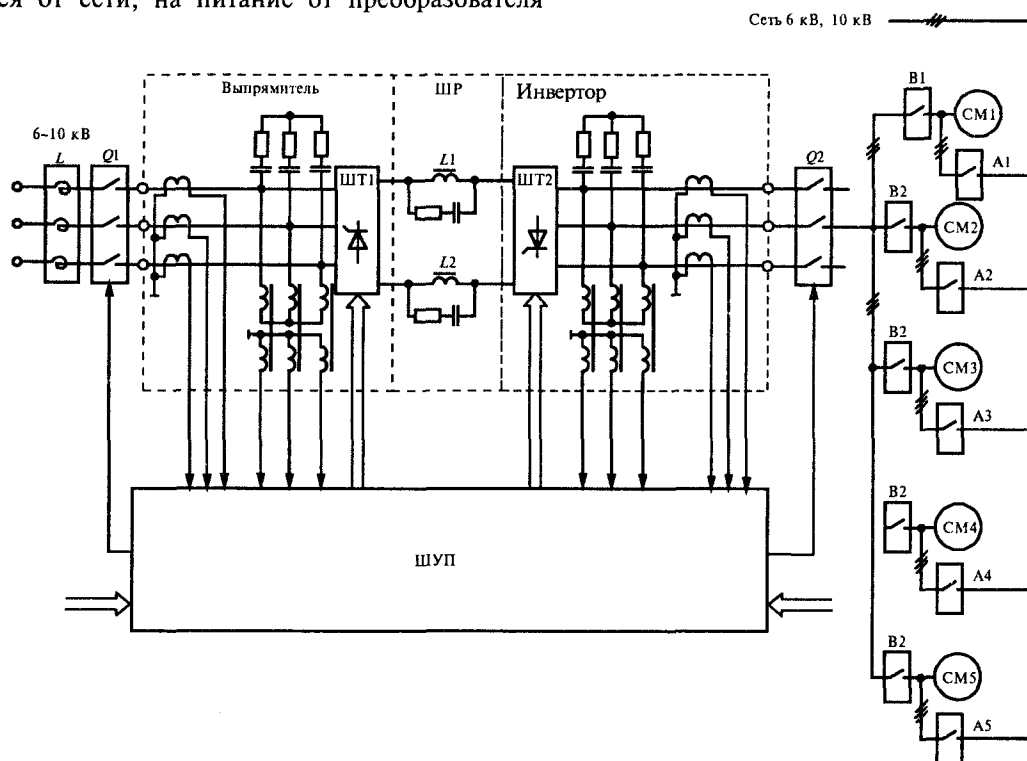


Рис.2. Структурно-функциональная схема станции автоматического управления пятинасосным агрегатом:

ШУП — шкаф управления, преобразователем; *L* — трехфазный токоограничивающий реактор; *СМ* — синхронный электродвигатель; ШР — шкаф реакторов; *A* — вакуумные выключатели; *B* — масляные выключатели

случае, когда реализация технических решений осуществляется комплексно, охватывая все составные части установки. При этом функции силовой основы выполняет регулируемый электропривод.

Список литературы

1. Иванов Г.М., Онищенко Г.Б. Автоматизированный электропривод в химической промышленности. М.:Машиностроение, 1975. С.312.
2. Дацковский Л.Х., Иванов Г.М., Роговой В.И. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока на основе вентильных преобразователей — базовое звено энергосберегающих технологий в народном хозяйстве//Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Разработка методов и средств экономии электроэнергии..." Днепропетровск, 1990. С.354—355.
3. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. М.: ИК "Ягорба" — Биоинформсервис, 1998. С.180.

4. Абрамов Б.И., Иванов Г.М., Моцохейн Б.И. Перспектива применения регулируемого электропривода переменного тока на технологических объектах нефтегазовой промышленности и городского коммунального хозяйства//Тезисы докладов научно-технического семинара "Энергосберегающий электропривод насосов и вентиляторов в промышленности и коммунальном хозяйстве". М., 1995.
5. Солнцев А.А. Опыт внедрения регулируемого электропривода на ЦТП МГП "Мосгортепло"//Энергосбережение. 1998. № 7—8. С.22.
6. Ильинский Н.Ф. С Регулируемый электропривод. Энерго- и ресурсосбережение// Приводная техника. 1997. № 3. С.21—23.
7. Храменков С.В., Гаврилин Е.Н., Афанасьев Ю.В. и др. Энергосберегающая система управления режимом работы насосной станции//Водоснабжение и санитарная техника. 1999. № 6.
8. Лезнов Б.С., Чебанов В.Б., Гинзбург Я.Н. и др. Энергосбережения в насосных установках//Промышленная энергетика. 1999. № 7.

Новая серия командоаппаратов управления электроприводами

ФЕДОРОВ А. М.

Рассмотрены конструкции основных исполнений командоаппаратов для бесступенчатого регулирования электроприводами производственных машин и механизмов.

По сложившейся традиции ОАО «Электропривод» являлся основным разработчиком командоаппаратов управления электроприводами различных производственных машин и механизмов, в том числе и для горнодобывающего оборудования, работающего в тяжелых условиях эксплуатации.

Последними, внедренными в 80-х годах в производство, были командоаппараты, предназначенные для управления экскаваторами ЭКГ20.

Традиционно задающим элементом в этих аппаратах были применены бесконтактные сельсины.

В результате конверсии оборонной промышленности появились возможности использовать в качестве задающих элементов датчики, ранее применяемые только в военно-космических устройствах.

Западными фирмами в качестве задающего элемента в ко-

мандоаппаратах аналогичного назначения используются специальные проволочные резисторы, индуктивные датчики с аналоговым и цифровым выходным сигналом и даже многоконтактные переключатели.

После анализа ряда отечественных и зарубежных датчиков, которые могли бы заменить традиционно применяемые в прежних сериях командоаппаратов сельсины, выбор остановился на многооборотных потенциометрах и пленочных потенциометрических датчиках отечественного производства и индуктивных датчиках с аналоговым выходом германской фирмы "TURCK".

Основным критерием для выбора был показатель надежности их эксплуатации при тяжелых внешних климатических и механических воздействиях, характерных для условий работы горнодобывающего оборудования.

Применение новых датчиков позволило в значительной степени изменить конструкцию многих узлов командоаппарата, уменьшить их массогабаритные показатели.

Первыми были освоены задающие командоаппараты, предназначенные для использования в электроприводах бурового и бумагоделательного оборудо-

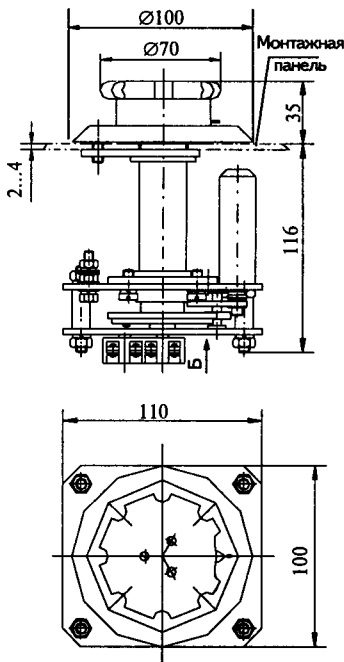


Рис.1. Командоаппарат типа КПМ11ФУ, КМП21ФУ

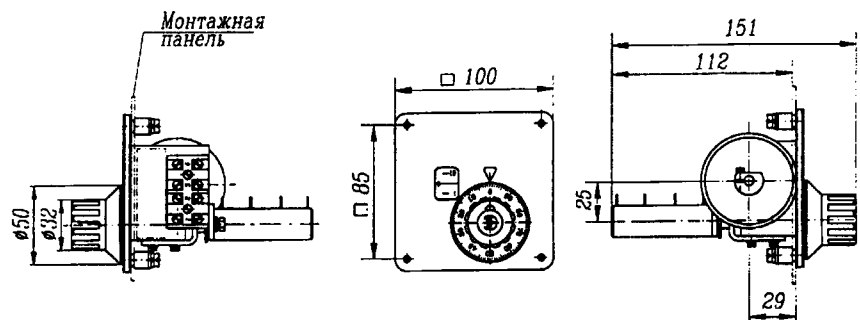


Рис.2. Командоаппарат типа КПМ11ФДУ, КМП21ФДУ

Таблица 1

Тип задатчика	Электрические параметры				
	$U_{пит}, В$	$U_{вых}, В$	$I_{вых}, МА$	$R, кОм$	$W, Вт$
Потенциометр однооборотный	=15	1-15 (пост.)	<1,0	20,0	0,25
Индуктивный В15.М18-ЛИУ	=24	0-10 (пост.)	0..20,0	$R_{нагр} < 0,5$	—
Потенциометр многооборотный	24 (0-400Гц)	0-24 (0-400Гц)	0..12,0	2,0	1,0

вания. В качестве задающего элемента в них были использованы многооборотные потенциометры, электрические параметры которых приведены в табл.1.

Задающие командоаппараты конструктивно выполнены в двух основных исполнениях: одношальные и двухшальные (с шкалами грубого и точного отсчета).

В одношальных командоаппаратах типа КПМ11ФУ, КПМ21ФУ (рис.1) при вращении маховичка-рукоятки движение через многоступенчатую зубчатую передачу передается на валик потенциометра: 270° поворота маховичка соответствуют изменению выходного сопротивления от нуля до максимума.

Шкала закреплена на коническом валике, подпираемом пружиной к коническому отверстию втулки, в которой поворачивается валик. Выполненное таким образом тормозное устройство обеспечивает фиксирование положения механизма командоаппарата.

Заданные параметры устанавливаются вращением маховичка. Показания отсчитываются по круговой шкале. Командоаппарат выпускается со шкалой с делениями от 0 до 100 и с симметричной шкалой 50-0-50 делений.

Командоаппараты типа КПМ11ФдУ, КПМ21ФдУ (рис. 2) снабжены двумя шкалами. Шкала грубого отсчета закреплена на валу многозаходного червяка, а точного — на валу червячной шестерни. Первая шкала отградуирована от 0 до 20 делений, вторая — от 0 до 100 делений.

Это исполнение командоаппарата также имеет тормозной механизм, предохраняющий от самопроизвольного поворота оси потенциометра.

В новую серию включены рычажные исполнения командоаппаратов, в качестве задающих элементов в которых применены пленочные потенциометры и индуктивные датчики. Их электрические данные приведены в табл.1.

В двухкоординатных командоаппаратах типа КПрКЗСНД и КиРКЗСНД (рис.3) рукоятка располагается на крышке аппарата и поворачивается в шарнире в любую сторону на 35°. В рукоятку встроен механизм нажатия, состоящий из кнопки, штока и возвратных пружин, размещенных внутри рукоятки. При нажатии на кнопку шток воздействует на сферическую чашку, подвешенную на четырех пружинах, под чашкой расположены микровыключатели типа МП1000.

При наклоне рукоятки одновременно под углом к координатам X и Y, второй ее конец поворачивает одновременно коромысла X и Y, закрепленные на валах, на концах которых установлены ведущие шестерни.

В командоаппарате с потенциометрическим задатчиком ведущая шестерня поворачивает ротор задатчика, а в командоаппарате с индуктивными задатчи-

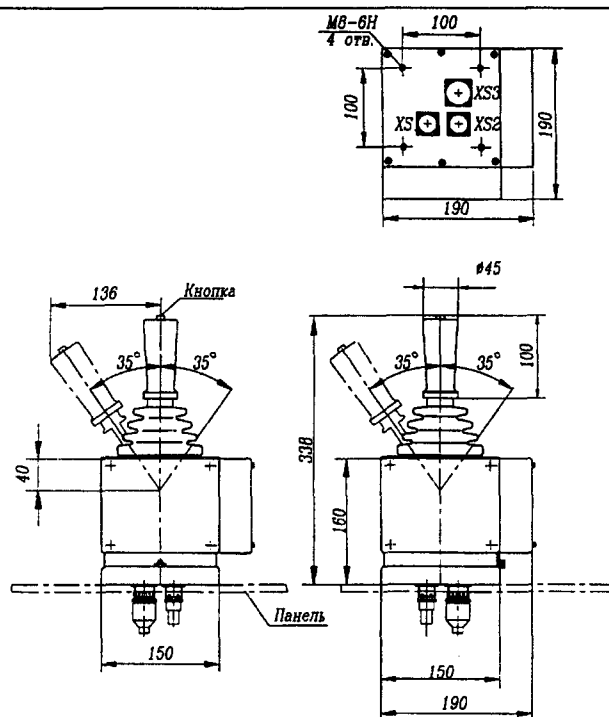


Рис.3. Командоаппарат типа КПрКЗСНД, КиРКЗСНД

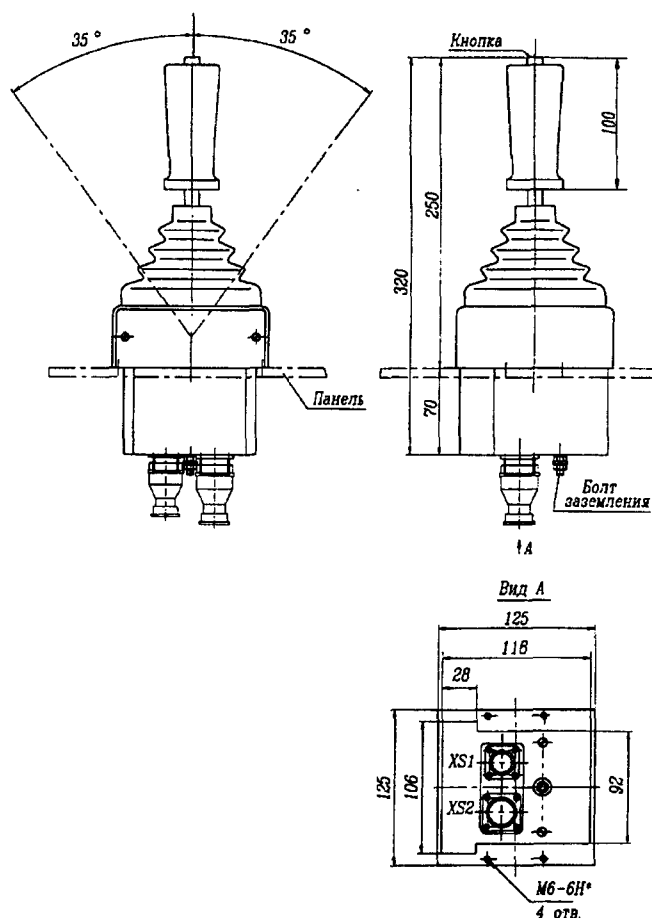


Рис.4. Командоаппарат типа КиРКЗСУ, КиРКЗФУ

Таблица 2

Обозначение типа командоаппарата	Вид датчика		Вид рукоятки			Шкала		Угол поворота рукоятки (маховичка)	Исполнение привода рукоятки			Способ установки		Количество управляемых электроприводов		Климатическое исполнение	Категория размещения по ГОСТ 15150
	Индуктивный	Потенциометрический	Маховичковый	Рычажный	Рычажный с кнопкой	Симметричная	Асимметричная		С самовозвратом	Фиксированный в любом положении	С двухотсчетной шкалой	Утопленный (встроенный)	Наружный (на панели)	Один	Два		
КТМ11ФУ02		+	+			+		-175°...+175°				+		+	2	+	2
КТМ21ФУ02		+	+				+	350°				+		+	2	+	2
КТМ11ФДУ02		+	+			+		-360°x9,5...+360°x9,5				+		+	2	+	2
КТМ21ФДУ02		+	+				+	360°x19				+		+	2	+	2
КТРКЗСН02		+		+				-35°...+35°					+		2	+	2
КТРКЗСНД02		+		+				-35°...+35°					+		2	+	2
КИРКЗСН02				+				-35°...+35°					+		2	+	2
КИРКЗСНД02				+				-35°...+35°					+		2	+	2
КИРКЗСН02					+			-35°...+35°					+		2	+	2
КИРКЗСНД02					+			-35°...+35°					+		2	+	2
КИРКЗСН02					+			-35°...+35°					+		2	+	2
КИРКЗСНД02					+			-35°...+35°					+		2	+	2
КИРКЗСН02					+			-35°...+35°					+		2	+	2
КИРКЗСНД02					+			-35°...+35°					+		2	+	2

ками перемещает две зубчатые рейки, к концам которых прикреплены шунтирующие пластины. При повороте ведущей шестерни одна рейка, перемещаясь, увеличивает зазор между шунтирующей пластиной и первым индуктивным датчиком, вторая соответственно уменьшает зазор между второй шунтирующей пластиной и вторым индуктивным датчиком.

Оба примененных типа задатчиков имеют на выходе линейный сигнал, значение которого зависит от угла поворота рукоятки по соответствующей координате.

Устройство возврата рукоятки в исходное положение выполнено в виде реечного механизма, рейка которого приводится в движение от шестерен, закрепленных на коромыслах. При перемещении рейки в ту или другую сторону она сжимает соответствующую пружину, которая при отпускании рукоятки воздействует на механизм возврата рукоятки в исходное положение.

Защитный кожух, установленный на рукоятке, предохраняет шарнирный механизм от прямого попадания пыли и воды. Все механизмы размещены в корпусе из алюминиевого сплава.

Командоаппараты по требованию заказчика могут дополнительно комплектоваться источниками питания и усилителями мощности.

Однокоординатные командоаппараты типа КТРКЗСН и КИРКЗСН выполнены на основе тех же узлов, что и двухкоординатные.

Основное назначение этих командоаппаратов — управление электроприводами экскаваторов и мостовых кранов большой мощности.

В однокоординатных рычажных командоаппаратах (рис.4), встраиваемых на крышках пультов управления, в качестве задатчиков использованы индуктивные датчики с аналоговым выходным сигналом. Конструкции механизмов управления задатчиками, самовозврата рукоятки в исходное положение аналогичны описанным выше. Этот тип командоаппаратов имеет несколько конструктивных исполнений:

- с самовозвратом рукоятки в нулевое положение и с дополнительно встроенной в рукоятку кнопкой для получения при нажатии на нее релейного сигнала (КИРКЗСУ);

- тоже самое без встроенной кнопки (КИРЗСУ);

- с фиксацией рукоятки в любом положении и с дополнительно встроенной в рукоятку кнопкой для получения при нажатии на нее релейного сигнала (КИРКЗФУ);

- тоже самое без встроенной кнопки (КИРЗФУ).

Номенклатура и технические характеристики всех типов серии приведены в табл.2.

Список литературы

1. Каталог 07.09.09.72 Сельсинные командоаппараты СКАЗ, СКАР, СКАП. М.: Информэлектро.
2. Пат. 1674093 РФ. Двухкоординатный командоаппарат/Федоров А.М., Пчелкин А.В., Федотов А.С., Подкидова Г.В.
3. Свидетельство 7519 на полезную модель. Командоаппарат/Федоров А.М., Наумова Л.Н.
4. Свидетельство 8815 на полезную модель. Командоаппарат/Федоров А.М., Федотов А.С., Молдавский Э.Д., Баязитов И.З.
5. Свидетельство 10933 на полезную модель. Командоаппарат/Федоров А.М., Наумова Л.Н.
6. Свидетельство 12282 на полезную модель. Командоаппарат (варианты)/Федоров А.М., Наумова Л.Н.

Унифицированная серия тиристорных бесконтактных пускателей типа ПБР, ПБН, ПБМ

БРАГИЛЕВСКИЙ Е.А., КОЛИН В.В., ЛЕСНИКОВСКИЙ А.Е., ШВЕЦ С.А., ШНЫРЕНКОВ А.А.

Описаны бесконтактные пускатели реверсивные и нереверсивные с микропроцессорным управлением, предназначенные для управления асинхронными электродвигателями, для коммутации в цепях переменного тока в отраслях с тяжелыми условиями труда, обеспечивающие прямой пуск, плавный пуск, сложный пуск, динамическое торможение, регулирование скорости асинхронного электродвигателя в диапазоне 1 : 10, снабженные всеми видами защит.

В последние годы ОАО "Электропривод" совместно с Ульяновским машиностроительным заводом разработаны и серийно выпускаются тиристорные бесконтактные пускатели типа ПБ¹. В настоящее время бесконтактные пускатели со сложными функциями переведены на микропроцессорное управление.

Пускатели бесконтактные реверсивные (ПБР), нереверсивные (ПБН) и с микропроцессорным управлением (ПБМ) предназначены для управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором, для коммутации в цепях переменного тока в отраслях с тяжелыми условиями труда (запыленная среда, повышенная влажность и температура, частота коммутации и т.д.): в нефтяной, газовой, горнорудной, химической, металлургической и др., а также в механизмах, где экономически выгодно использовать технические возможности бесконтактных пускателей вместо контактных.

На протяжении последних 30 лет ОАО "Электропривод" ведет разработки устройств управления асинхронными двигателями общепромышленных серий на базе тиристорных преобразователей переменного напряжения. Были разработаны и серийно выпускались много лет бесконтактные пускатели типа ПТМ и ПТМО, БУ-4702, тиристорные станции управления типа ТСУ различных модификаций с расширенными функциональными возможностями.

Новая серия ПБ выполнена на современной элементной базе и обеспечивает коммутирование токов от 0,5 до 630 А, прямой пуск, управляемый пуск (плавное нарастание напряжения), управляемый останов асинхронного двигателя; защиту от перегрева двигателя и пускателя, от токов короткого замыкания, обрыва фазы, перекоса напряжения в фазах.

ПБ имеют исполнение для использования в качестве регулятора и стабилизатора напряжения при работе на активную и активно-индуктивные нагрузки (нагреватели и т.д.).

На рис.1 приведены упрощенные схемы ПБ, где БУ — блок управления, обеспечивает алгоритм управления бесконтактными пускателями. В пускателях с микропроцессорным управлением БУ включает в себя микропроцессорные схемы управления: U_c — напряжение сети; АД — асинхронный электродвигатель; U_y — напряжение управления.

Основные технические данные ПБ приведены в таблице.

При прямом включении ПБ тиристоры включаются электронным устройством, обеспечивающим до 3600—10000 включений в час. Ограничение накладывают исполнительные механизмы.

В ПБ с управляемым пуском и управляемым торможением электронная схема осуществляет фазовое управление открытия тиристоров и регулирование напряжения на выходе.

Использование ПБ с управляемым пуском и торможением позволяет уменьшить пусковой момент и снизить большие пусковые токи АД. Ограничение пускового момента уменьшает нагрузку на транспортируемый или обрабатываемый материал, снижает износ всех механических деталей привода и, соответственно, увеличивает периоды между ремонтами, а также повышает надежность работы и сокращает время простоев.

Под управляемым пуском понимают следующие виды пуска механизмов:

- безударный пуск—пуск с пониженным пусковым моментом;
- сложный пуск (затянутый пуск); время пуска регулируется в пределах 0,2—60 с;
- пуск с отсечкой тока, при этом пусковые токи за время пуска не превышают заданного тока отсечки.

Безударный пуск осуществляется подачей напряжения на двигатель по экспоненциальному закону. При этом пусковой момент может снижаться примерно в 10 раз по сравнению с прямым пуском.

В режиме пуска с отсечкой тока, значения пусковых токов (токов отсечки) можно устанавливать в пределах $I_{\text{пуск}} = I_{\text{н}} + 6I_{\text{ном}}$, где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток двигателя.

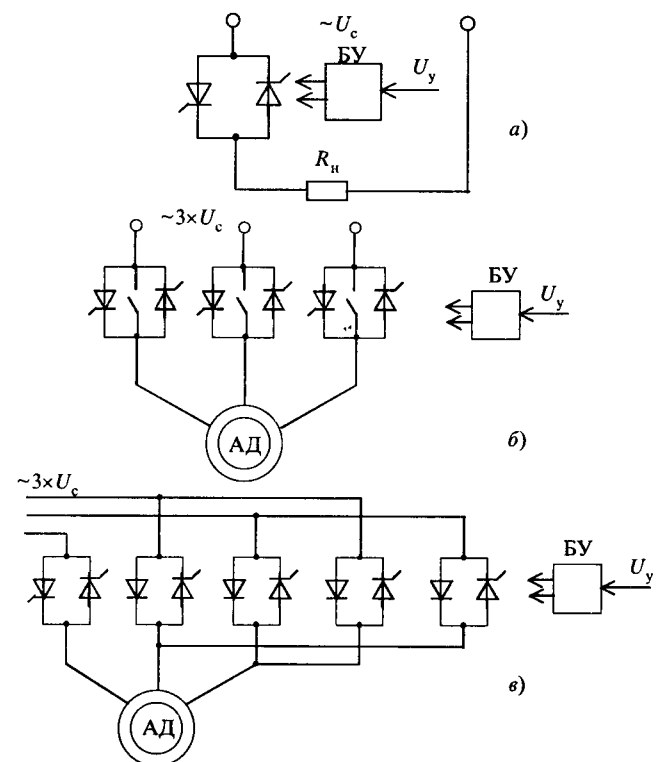


Рис.1. Основные упрощенные схемы ПБ:

а — пускатель бесконтактный однофазный; б — пускатель бесконтактный трехфазный нереверсивный; в — пускатель бесконтактный трехфазный реверсивный

¹ В разработке ПБ непосредственное участие принимали Богданов В.М., Ванштейн П.Г., Гофман В.А.

Наименование параметра	Значение параметра								
Коммутируемые напряжения: трехфазное и однофазное напряжение переменного тока частоты 50, 60 Гц, В	220			380			440		
Количество каналов коммутации	1			2			3		
Номинальный ток, А	0,5; 1; 4	10	25	63	100	160	250	400	630
Режим работы	Продолжительный, повторно-кратковременный								
Габаритные размеры, мм	100×100×65	275×160×160	275×160×180	245×180×190	560×265×360	600×280×360	800×320×650	800×320×800	
Масса, кг	1,5	5,5	5,5	7,0	29,0	35	43	75	100

Конкретные механизмы требуют индивидуального подхода к выбору электропривода.

При пуске вентиляторов нагрузочный момент находится в квадратичной зависимости от частоты вращения ($M \sim n^2$).

Вентиляторы в большинстве случаев имеют большой момент инерции (от 10- до 200-кратного значения момента инерции двигателя). Аналогичные характеристики имеют воздухоподувки, машины с центробежным принципом управления, корабельные приводы, центрифуги и т.д.

Режим пускателя должен быть настроен так, чтобы во всем диапазоне скоростей момент двигателя был выше нагрузочного момента примерно на 15% номинального момента. Пусковой ток и правильный выбор режима торможения решают проблему этих механизмов.

На шаровых мельницах, токарных станках, мотальных и луцильных машинах момент, требуемый от двигателя, обратно пропорционален частоте вращения ($M \sim 1/n$). Для таких устройств предусмотрена возможность пуска электродвигателя по сложному алгоритму (рис.2).

Особенность алгоритма заключается в том, что на время t_1 производится повышение напряжения до заданного значения U_1 , поддержание напряжения, затем уменьшение напряжения и плавное увеличение напряжения до номинального. Диапазон изменения времени t_1 "толчкового режима" от 0,02 до 3 с. По амплитуде выходное напряжение меняется от $0,3U_{ном}$ до $U_{ном}$.

Процесс плавного пуска (разгона) начинается при начальном значении напряжения, устанавливаемом от 20 до 50%. Диапазон времени в режиме плавного изменения выходного напряжения t_2 — до 60 с.

В подъемниках, поршневых насосах, компрессорах, работающих с постоянным давлением, вальцевых дробилках, ленточных транспортерах, в станках с постоянной силой резания, эскалаторах и т.д. нагрузочный момент сохраняется постоянным ($M = const$) во всей области частот вращения. В этих механизмах может возникать также необходимость использования "толчкового режима".

Пускатели позволяют организовать несколько вариантов останова двигателя. На рис.3 показаны кривые изменения скорости при:

1 — свободном выбеге (естественное торможение при отключении двигателя от сети);

2 — затынутом торможении (плавный останов) — торможении с плавным снижением питающего напряжения; при этом время останова может меняться в пределах от 0,3 до 60 с;

3 — динамическом торможении с изменяемой интенсивностью (торможением выпрямленным напряжением);

4 — динамическом торможении с неизменной интенсивностью (торможением с неизменным выпрямленным током).

Время динамического торможения можно задавать от 0,1 до 10 с. При этом ток торможения регулируется в пределах $I_{торм} = (0,5-6)I_{ном}$. Интенсивность динамического торможения задается установкой выпрямленного тормозного напряжения от 50 до 220 В.

Благодаря функциям "Управляемый пуск", "Управляемый останов", "Толчковый режим" можно обеспечить плавный пуск и останов ленточных транспортеров, лифтов, эскалаторов.

В каландрах, транспортных шнеках, бумагоделательных машинах и т.д. нагрузочный момент нарастает линейно с увеличением частоты вращения ($M \sim n$). В этих механизмах (имеющих также большие значения моментов инерции) использованием функций "Управляемый пуск", "Управляемый останов" можно снизить пусковые токи, предотвратить разрыв бумаги или ткани.

Многие механизмы после плавного пуска продолжают длительно работать с номинальным напряжением на статорной обмотке АД. Силовая часть пускателя постоянно включена в цепь двигателя и радиаторы должны быть рассчитаны на полную мощность пускателя. Из-за потерь в пускателе перегревается шкафовое оборудование и снижается КПД электропривода.

Есть исполнение пускателей, когда после разгона двигателя силовые элементы пускателя шунтируются контактами малогабаритных контакторов. В исполнениях ПБ на токи 63—600 А это приводит к существенному уменьшению массы и габаритов пускателя и повышению КПД электропривода.

Защитные функции выполняет узел защиты. Узел защиты может быть встроенным или поставляться в виде самостоятельного изделия. Узел защиты реализует следующие виды защит:

- тепловую защиту (перегрев двигателя или пускателя);
- защиту от перегрузки по току (интегральная защита);
- защиту от токов короткого замыкания;
- защиту от перекоса и обрыва фаз;
- защиту от пробоя коммутирующих элементов.

Зависимость временного срабатывания защиты t_c от кратности тока показана на рис.4, где I — факти-

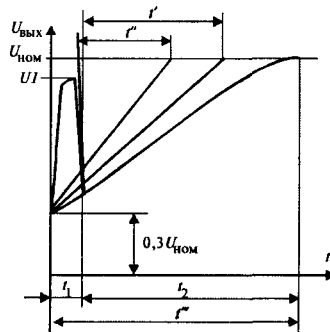


Рис.2. Диаграмма пуска электродвигателя по сложному алгоритму:

$U_{вых}$ — напряжение на выходе пускателя; $U_{ном}$ — номинальное выходное напряжение; U_1 — амплитуда напряжения «толчкового» импульса; t_1 — время двигателя напряжения трогания; t_2 — время выхода двигателя на рабочий режим

ческий ток через пускатель.

В механизмах с длительным пуском двигателей (мощные вентиляторы и др.) и пусковым током равным $(2-3)I_{ном}$, интегральная защита на время пуска отключается.

ПБ позволяют подключать двигатели меньшей мощности.

При этом дискретно переключками устанавливаются токи срабатывания устройства защиты равные $I_{ном}$, $0,8I_{ном}$ и $0,5I_{ном}$. В каждом диапазоне можно плавно менять значение $I_{ном}$ в пределах до 15%.

На рис.5 приведены различные варианты работы АД при управлении от ПБ.

Пускатель с микропроцессорным управлением ПБМ позволил унифицировать схемные решения управления различными пускателями, расширить функциональные возможности, упростить режим настройки на различные режимы работы.

Настройка выходных параметров пускателя осуществляется оператором в диалоговом режиме. Последовательность настройки задается на дисплее микропроцессорным устройством.

Кроме базовых функций с указанными выше параметрами (прямой пуск, управляемый пуск и останов, реализация всех видов защит) ПБМ позволяет реализовать разгон и торможение с заданным током, организовать следящий режим, регулировать частоту вращения двигателя (есть возможность вводить обратную связь по регулируемому параметру, поддерживать заданную температуру и давление, осуществлять ограничение пускового тока, производить плавное снижение напряжения). В ПБМ в следящем режиме выходной параметр может регулироваться П-, ПИ- или И- регулятором. Ток динамического торможения контролируется датчиком тока, что позволяет избежать динамических ударов в конце торможения.

На базе ПБМ разработан энергосберегающий электропривод, алгоритм оптимизации потребления в котором, реализуется по двум параметрам: $\cos\phi$ и току статора. Этот электропривод в механизмах с переменной нагрузкой позволяет экономить от 10 до 30% электроэнергии.

ПБМ управляется напряжением ± 10 В. Оператор может менять коэффициент усиления регуляторов по цепи управления и по цепи обратной связи в пределах от 1 до 25.

ПБМ в следящем режиме обеспечивает с обратной связью по скорости диапазон регулирования частоты вращения 1:10 с точностью поддержания в соответствии с нормами (1% вверху и 4% внизу).

На рис.6 приведен наиболее интересный алгоритм работы ПБМ — алгоритм динамического торможения.

ПБМ предусматривают местное и дистанционное управление.

Одновременно, на базе пускателей типа ПБН и ПБР разработаны и находятся на стадии внедрения новые модификации единой

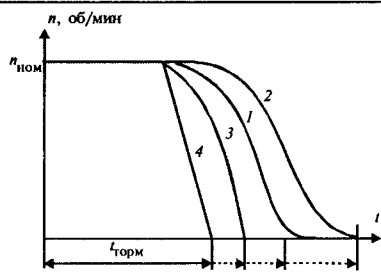


Рис.3. Кривые изменения частоты вращения АД при различных способах торможения

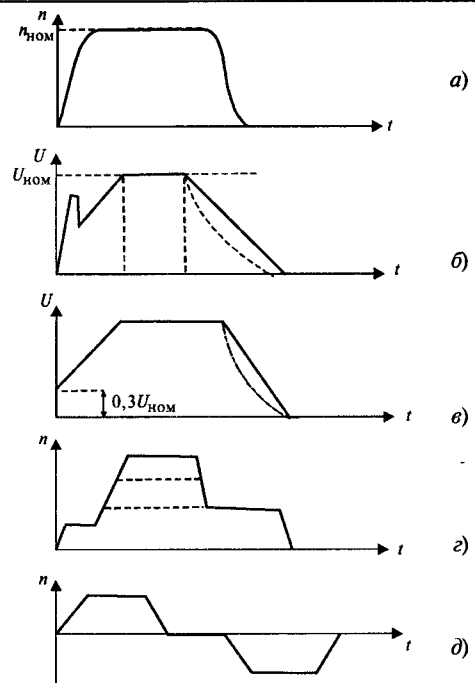


Рис.5. Различные варианты работы АД при управлении ПБ: а — прямой пуск и динамическое торможение; б — сложный пуск; в — плавный разгон и плавное торможение; г — разгон и торможение по заданному закону; д — разгон, торможение и реверс

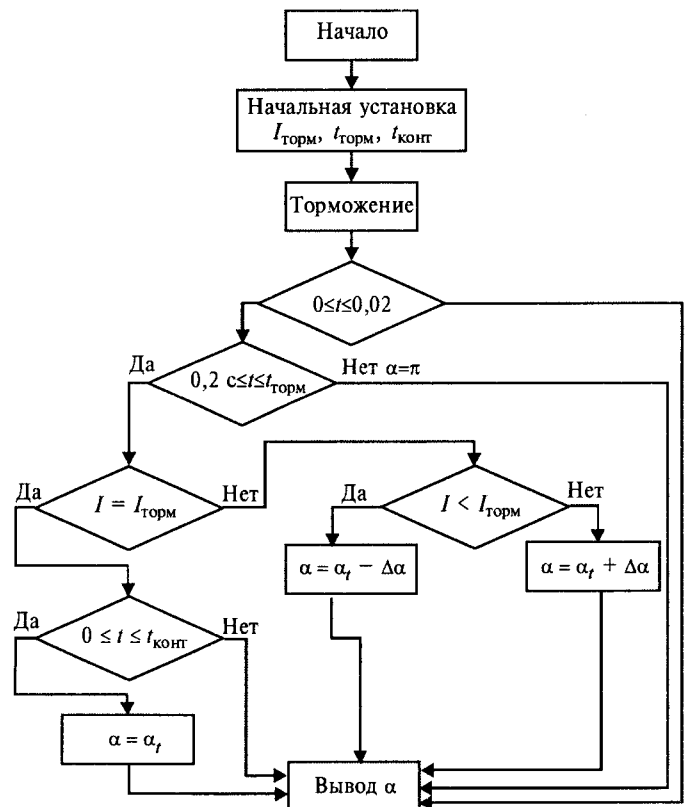


Рис.6. Алгоритм работы ПБМ в режиме динамического торможения

$t_{конт}$ — контрольное время торможения; I — действующее значение тока двигателя; α — угол отпирания тиристора; α_t — текущее значение угла отпирания тиристора; $\Delta\alpha$ — изменение угла отпирания тиристора за текущий отрезок времени; t — текущее значение времени торможения

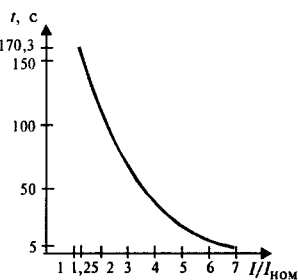


Рис.4. Зависимость времени срабатывания защиты от кратности тока

серии пускателей, объективно ориентированных на конкретного потребителя.

Таковыми модификациями являются:

— пускатели для пунктов питания сетей наружно-освещения на токи от 63 до 240 А;

— блоки управления электроприводом трубопроводной запорной арматуры типа БУЭТЗ на токи от 0,5 до 10 А и выдерживающие ударный ток до 1500 А.

Основные преимущества ПБН, ПБР и ПБМ:

- высокая надежность, превышающая надежность контактных пускателей более чем в 50 раз;

- снижение эксплуатационных расходов не менее чем в 5 раз;

- обеспечение большого количества включений в единицу времени;

- обеспечение целого ряда функций, осуществить которые невозможно на базе контактных пускателей (различные виды пуска, торможения, регулирование скорости и других параметров, ограничение пусковых токов и т.д.);

- функции защиты и контроля;

- уменьшение износа всех механических деталей электропривода;

Опыт применения бесконтактных пускателей позволил качественно улучшить процессы управления асинхронными электродвигателями.

Список литературы

1. Бродский Ю.А., Швец С.А., Новогрудский Ф.Д. Унифицированная серия тиристорных устройств управления асинхронными приводами типа ТСУ-2//Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. 1985. № 3. М.: Энергоатомиздат, 1986.

2. Брагилевский Е.Л., Гофман В.А. Бесконтактные пускатели переменного тока на базе полупроводниковой техники//Электротехника. 1994. № 7. С. 60.

3. Брагилевский Е.Л., Гофман В.А., Лесниковский А.Е., Колин В.В. Бесконтактные пускатели переменного тока//Электротехника. 1995. № 12. С. 42—45.

4. Брагилевский Е.Л., Гофман В.А., Колин В.В., Лесниковский А.Е., Швец С.А. Унифицированная серия тиристорных бесконтактных пускателей типа ПБР, ПБН//Тез. докладов II международной (VIII Всероссийской) конференции «Проблемы автоматизированного электропривода». Ульяновск, 23—25 сентября, 1998.

5. Брагилевский Е.Л., Швец С.А. Бесконтактные пускатели реверсивные и неревверсивные серии ПБР и ПБН//Электротехника: Промышленный каталог. 07.14.13-99.

Некоторые вопросы защиты асинхронных электродвигателей от перегрузки

ИВАНОВ В.В.

Рассматриваются средства температурной защиты электротехнических изделий, основанные на принципе контроля температуры защищаемых частей, позволяющие защитить электрические машины и изделия от чрезмерного повышения температуры, включая случаи, когда рост температуры вызван неисправностью системы охлаждения или очень высокой температурой окружающей среды, в то время как системы защиты, основанные на принципе контроля потребляемого тока, не могут обеспечить такой защиты.

Современные асинхронные электродвигатели можно считать одними из наиболее простых по конструкции и надежных механизмов. Вместе с тем опыт их эксплуатации показывает, что значительная часть их выходит из строя, не отработав расчетный срок службы. Не рассматривая вопросы выхода из строя в случае возникновения коротких замыканий и способов и средств защиты от этих режимов остановимся на наиболее вероятных случаях аварийных ситуаций из-за их перегрева.

Наиболее характерные причины перегрева двигателей разделяют на две основные группы.

- Первая группа характеризуется связью тока нагрузки и изменения температуры двигателя из-за увеличения интенсивности использования двигателя по мощности, неисправности механических частей электропривода, отклонения параметров питающей сети.

- Вторая группа причин не вызывает рост тока, но приводит к росту его температуры из-за нарушения системы охлаждения, неудачного размещения двигателя, когда он нагревается солнечной радиацией или другим внешним источником тепла или эксплуатируется в условиях окружающей среды, превышающих расчетные параметры.

По принципу действия основные виды защиты от перегрузки можно представить в виде структуры, приведенной на рис.1.

Действующими нормативными документами уста-

новлены ряд параметров, в соответствии, с которыми должны проектироваться и эксплуатироваться двигатели. Так, [1] определяет, что двигатели мощностью 0,55 кВт и выше должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать перегрузку по току на 50% в течение 2 мин. Этим же документом регламентируются предельные длительно допускаемые превышения температур отдельных частей электрических машин. В [2] устанавливаются общие технические требования к защите электродвигателей от перегрузки, и рекомендуется для двигателей мощностью свыше 2 кВт применять специальные виды защит.

В публикациях МЭК, разработанных техническим комитетом №2, и в разработанных на их основе государственных стандартах [4—9] излагаются правила защиты электрических машин, **распространяющиеся на системы температурной защиты**, основанные на принципе контроля температуры защищаемых частей, создающие простые и эффективные средства защиты от чрезмерного повышения температуры, включая случаи, когда рост температуры вызван неисправностями системы охлаждения или очень высокой температурой окружающей среды и основные требования к тепловым защитным устройствам — термодетекторам, температурно-токовым реле и системам управления на их основе, используемым в устройствах температурной защиты двигателей. В [8] даны определения типов встроенной температурной защиты, типов тепловой

перегрузки, а также основные характеристики систем температурной защиты и рекомендации по установке и соединению детекторов или температурно-токовых реле в электрической машине.

В настоящее время в условиях значительных изменений в практике разработок и производства электродвигателей и коммутационно-защитной аппаратуры, а также электроприводов на их основе возникли новые предпосылки по формам и методам их внедрения. Предлагается рассмотреть вопросы использования в отечественных изделиях современных средств защиты электродвигателей на базе температурно-токовых и температурных реле (термодетекторов).

Анализ современного состояния этой группы защитных средств отечественного и зарубежного производства показывает, что в выпускаемых в настоящее время электродвигателях российских фирм они явно недостаточно используются, что в целом приводит к снижению технических показателей электрифицированных машин и повышению эксплуатационных затрат. Одна из причин — недостаток информации у отечественных разработчиков, производителей и эксплуатационников о технических характеристиках, номенклатуре, параметрах и особенностях использования этих весьма распространенных средств защиты электродвигателей.

В [7,9] подчеркивается, что температурно-токовые реле — это устройства, которые объединены как физически, так и функционально с машинами, которые они предназначены защищать, составляя, таким образом, систему, чувствительную к температуре.

Как известно косвенный контроль температуры обмоток двигателей, осуществляемый электротепловыми токовыми реле по значению тока, не позволяет полностью использовать перегрузочную способность, учесть изменение условий теплообмена и обеспечить надлежащую защиту двигателя во всем возможном диапазоне перегрузок механизмов кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы. В связи с этим рекомендуется использовать для защиты двигателя в таких электроприводах встроенную температурную защиту. Распространению температурных защит способствует и прогресс электромашинострое-

ния, характеризуемый более полным использованием активных материалов двигателя и уменьшением их массы при той же мощности, что делает двигатель более чувствительными к перегрузке.

Температурно-токовое реле — электрически изолированное устройство, реагирующее на температуру и ток машины, которое обтекается током машины и которое, когда его температура достигает заданного значения, отключает питание машины. Устройство может быть возвращено в исходное состояние (вручную или автоматически), когда его температура упадет до значения возврата [8].

Широкое распространение получили температурно-токовые реле на основе калиброванных дисков KLIXON типа 15AM, 9700,2MM и т.п. Эти устройства используются для защиты бытовых и общепромышленных электродвигателей. Основная деталь устройства — калиброванный диск KLIXON, способный реагировать на изменение температуры и силу тока. К поверхности диска припаян один из контактов, другой контакт расположен на другой стороне обложки из легированной стали, покрытой изоляционным материалом. На рис.2 изображены общий вид таких устройств (а) и их внутренняя структура (б) и размеры (в). Такие реле могут быть использованы как высокочувствительные средства для одно- и трехфазных двигателей (трансформаторов, дросселей, соленоидов), при этом в однофазных двигателях оно может быть смонтировано в цепь защищаемой обмотки, его небольшие размеры обеспечивают легкость установки даже при малых размерах двигателя. Ток проходит через биметаллический диск KLIXON, обладающий некоторым сопротивлением. При возникновении аварийной ситуации под воздействием увеличивающейся силы тока и повышенной температуры биметаллический диск срабатывает как переключатель и размыкает контакты, которые разрывают непосредственно цепь двигателя. Контакты автоматически возвращаются в исходное состояние при охлаждении устройства до безопасной температуры. Диапазон стандартных температур 70—170°C с шагом 5°C. Максимальная температура окружающей среды 180°C. Допуск на установленное значение номинальной температуры ±5°C. Номинальные токи таких реле могут достигать 30 А. Срок службы до 10000 циклов, $T_{возв} = 85°C$. Масса реле не более 12 г.

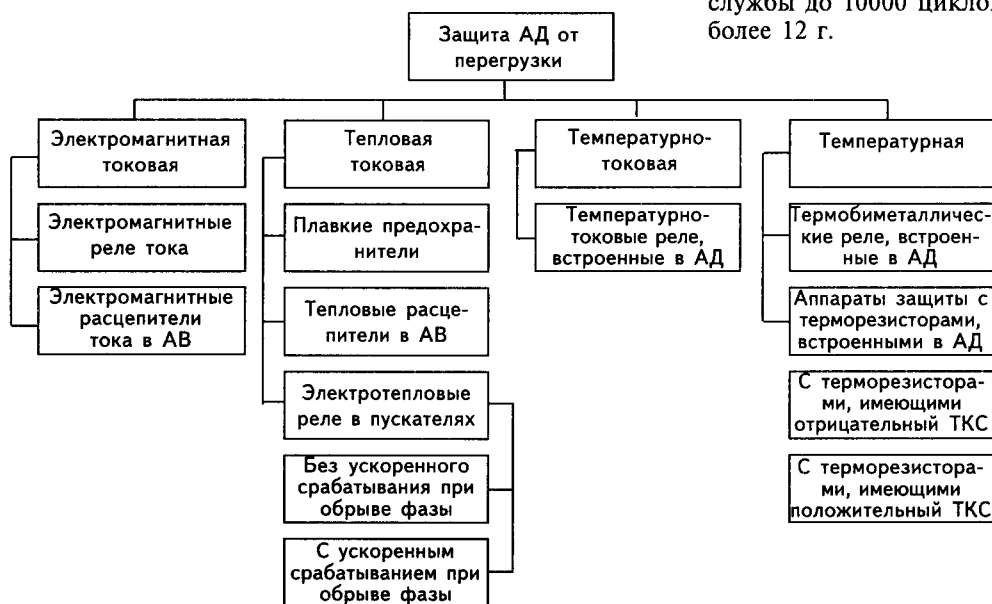


Рис.1. Основные виды и средства защиты АД от перегрузки

Для однофазных мало-мощных двигателей температурно-токовое реле представляет собой наиболее простое и достаточно эффективное средство защиты от перегрузок, в связи с чем они нашли широкое применение. Однако использование таких реле непосредственно для трехфазных двигателей большой мощности невозможно из-за ограниченной коммутационной способности их контактов, поэтому развитие средств защиты двигателей идет по пути использования температурной защиты, основанной на термодетекторах — электри-



Рис.2. Защитное устройство 9700:

A — изолятор; B — изогнутая клемма для изолированных проводов; C —

изолятор; D — контакты; E — стальная клемма; F — калиброванный диск KLIXON; G — корпус из облученной стали

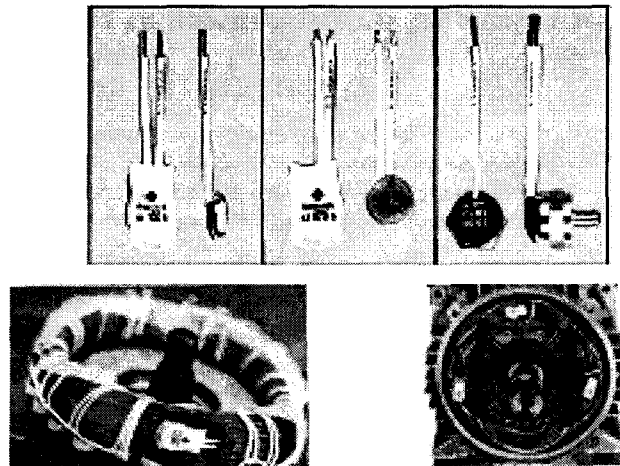
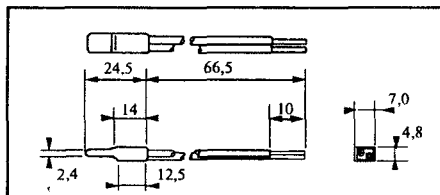


Рис.3. Термодетектор фирмы «Thermik»

чески изолированных устройствах, реагирующих только на температуру, которая вызывает коммутацию в системе управления, когда его температура достигает заданного значения. Оно может быть возвращено в исходное состояние (вручную или автоматически), когда его температура упадет до значения возврата.

Основные требования, предъявляемые к термодетектору, — минимальные габариты и инерционность, высокая чувствительность, надежность срабатывания, стабильность свойств в течение срока службы двигателя и взаимозаменяемость.

На рис.3 представлены общий вид образцов термодетекторов фирмы «Thermik». Стандартный ряд таких термодетекторов от +70°C до +200°C с допуском $\pm 5^\circ\text{C}$, коммутируемый ток 2,5(6) А при напряжении 250 В. Число циклов срабатывания до 10000.

Специалисты ОАО «Электропривод» принимали участие в разработке и внедрении ряда комплектного электрооборудования для различных машин и механизмов с использованием средств температурной защиты на базе позисторов и блоков УВТЗ. В течение 1998—1999 гг. были изучены и испытаны образцы температурно-токовых реле и термодетекторов ряда отечественных и зарубежных фирм для использования в различных электротехнических изделиях и подготовлены предложения по их внедрению.

По нашей рекомендации образцы таких терморегуляторов производства фирмы «Thermik» проходили испытания в ОАО «НИИВЭМ» и ООО «Привод-ПЭУ», по результатам которых принято решение об их применении в выпускаемых ими электрических машинах.

Рассматриваемые типопредставители средств температурной защиты срабатывают при повышении температуры обмоток двигателя независимо от причин, его вызвавших, позволяя наиболее полно использовать тепловые возможности двигателя во всех режимах при любых температурах среды и повысить надежность работы электроприводов. Такая защита нечувствительна к кратковременным перегрузкам и коротким замыканиям в цепи двигателя, имеет одно исполнение для двигателей различной мощности, назначения и режима использования.

К положительным качествам термобиметаллических реле относится их простота, дешевизна и взаимозаменяемость.

Основные недостатки температурной защиты зак-

лючаются в необходимости монтажа термодетекторов в обмотках двигателя с выводом двух дополнительных проводов для соединения термодетекторов с пускателем (станцией управления), в неизбежной инерционности термодетектора и необходимости специального аппарата защиты — промежуточного реле, контактора или усилительно-релейного блока (при использовании бесконтактных термодетекторов). Последний недостаток в известной мере компенсируется тем, что при использовании аппаратов защиты из состава электроприводов исключаются электротепловые реле. Отсутствие в большинстве случаев средств регулирования температуры срабатывания защиты нельзя отнести к ее недостаткам, так как в реальных условиях для двигателей с определенным классом изоляции необходимость такого регулирования практически возникает редко или не возникает совсем.

Другие виды термодетекторов — манометрические, дилатометрические, металлические термометры и термодары — в аппаратуре защиты двигателей сколь угодно заметного применения не получили.

Применение вышперечисленных современных средств контроля теплового состояния электроизделий позволит повысить ресурс их работы, снизить затраты на текущую эксплуатацию.

Список литературы

1. ГОСТ 183-74. Машины электрические. Общие технические требования.
2. ГОСТ 27487-87. Электрооборудование производственных механизмов.
3. ГОСТ 28330-80. Машины электрические. Асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Общие технические требования.
4. Публикация МЭК 34-1. Машины электрические вращающиеся. Ч.1. Номинальные данные и рабочие характеристики.
5. Публикация МЭК 34-11. Ч.11. Встроенная температурная защита. Гл.1. Правила защиты электрических машин.
6. Публикация МЭК 34-11-2(1984). Гл.2. Термодетекторы и вспомогательная аппаратура управления, используемые в устройствах температурной защиты.
7. Публикация МЭК 34-11-3(1984). Гл.3. Общие правила, касающиеся тепловых защитных устройств, используемых в тепловых системах защиты.
8. ГОСТ-27888-88. Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита. Правила защиты.
9. ГОСТ-27895-88. Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита. Основные правила, распространяющиеся на температурно-токовые реле, используемые в системах температурной защиты.
10. ГОСТ 16264.1-85. Двигатели асинхронные. Общие технические условия.

Особенности сертификации низковольтных комплектных устройств

РУМЯНЦЕВ А.Н., БАТАНОВ В.Е., КОЧЕГАРОВА Л.М.

Рассмотрены вопросы сертификации низковольтных комплектных устройств, в частности безопасности изделий, имеющей своей целью защитить потребителя и обслуживающий персонал. Приведенные стандарты призваны быть основным критерием, на соответствие которому проверяется параметрами безопасности НКУ.

Низковольтные комплектные устройства (НКУ) представляют собой электротехнические системы, которые реализуют функции управления, распределения, защиты, сигнализации, широко используемые в различных отраслях промышленности. Конструктивно они выполнены в виде шкафов, панелей, щитов и т.д.

Электрические схемы, состоящие из электрических аппаратов и электронных компонентов, построены в зависимости от назначения НКУ. Множественные функции, выполняемые НКУ, их комбинации и ряды исполнений по мощности управляемых нагрузок вызывают необходимость четкой идентификации изделий, их типопредставителей для получения представительных результатов и оценок при проведении испытаний. Эта задача, требующая достаточно высокой квалификации и контроля за ее выполнением на всей цепочке: идентификация — испытания — оценка, по нашему мнению, под силу специализированным центрам сертификации.

Технические требования, в том числе параметры безопасности НКУ, изложены в ряде отечественных стандартов, которые в основном соответствуют международному уровню. В том числе:

ГОСТ 9413-78. Щитки осветительные для жилых зданий. Общие технические условия.

ГОСТ 8709-82. Щитки осветительные для промышленных и общественных зданий. Общие технические условия.

ГОСТ 19734-80. Устройства вводно-распределительные для жилых и общественных зданий. Общие технические условия.

ГОСТ 22789-94. (МЭК 439-1-85) Устройства комплектные низковольтные. Общие технические условия и методы испытаний»

ГОСТ 28668-90 (МЭК 439-1-85). Низковольтные комплектные устройства распределения и управления. Ч. 1. Требования к устройствам, испытанным полностью или частично.

В случаях, когда заявителем для проведения обязательной или добровольной сертификации представляется совокупность изделий класса НКУ, органом по сертификации выполняются следующие процедуры.

При рассмотрении заявки анализируется представленная заявителем документация с целью классификации данных НКУ и определения их типов, а затем выбора типопредставителей для проведения испытаний.

Классификация и определение типа НКУ осуществляется с учетом раздела 2 (Термины и определения) и раздела 3 (Классификация НКУ) ГОСТ 22789-94 (МЭК 439-1-85) и Общероссийского классификатора продукции ОК 005-93 (подкласс 34 3000) по следующим критериям:

- единство изготовителя;
- единство нормативного документа на НКУ (ГОСТ, ОСТ, ТУ и др.);
- общее наименование и обозначение;
- единство нормативных документов для сертификации;
- единый код ОКП (до шестой цифры включительно);
- общее функциональное обозначение;
- однотипность применения элементной базы и комплектующих изделий;
- единство видов конструкции;
- единство технологического процесса изготовления;
- учет условий установки и эксплуатации НКУ у потребителя;
- наличие дополнительных функциональных блоков, агрегатов, узлов и т.п.

После выделения типов, представленных для сертификации НКУ, по каждому типу необходимо выбрать для проведе-

ния испытаний по одному или более типопредставителей для распространения затем результатов испытаний типопредставителей на весь тип НКУ.

Под типопредставителем в данном случае понимается изделие, в котором наиболее полно представлены характеристики и показатели безопасности всего ряда (типа) изделий.

Порядок выбора типопредставителя (типопредставителей) для проведения испытаний следующий.

- Из ряда НКУ выбираются изделия, отвечающие критериям:
- наибольшее количество примененных в типе комплектующих изделий;
 - наибольшее количество выполняемых изделием функций;
 - наиболее тяжелые режимы функционирования (температурные, нагрузочные);
 - наибольшая (наименьшая) степень защиты (IPXX);
 - наибольшие (наименьшие) меры защиты обслуживающего персонала.

При выборе типопредставителей принимается во внимание наличие изделий в производстве, уровень потребительского спроса и другие экономические соображения.

Широкое применение НКУ определяет устойчивый спрос на них на рынке. Наметившееся в последнее время оживление производства в стране вызвало рост потребности НКУ и, как следствие, на рынок вышел ряд новых изготовителей этой продукции. Зачастую у них отсутствуют необходимые инженерные службы, подготовка и контроль производства. В этом случае обязательная сертификация призвана оградить потребителей от небезопасной продукции.

Не допустить несовершенные, небезопасные в эксплуатации изделия — это основная задача, которая стоит перед обязательной сертификацией в Системе сертификации ГОСТ Р, принятой в России.

Основными параметрами НКУ, которые в наибольшей степени влияют на их безопасность в эксплуатации, являются:

- характеристика изоляции токоведущих частей;
- уровень нагрева частей НКУ, который ограничивается допустимой температурой нагрева комплектующих изделий и температурой частей НКУ, доступных для прикосновения персонала;
- стойкость к токам короткого замыкания;
- правильность выбора схемы и реализация систем защиты от поражения электрическим током;
- соответствие степени защиты оболочки НКУ условиям эксплуатации.

Обязательным требованием к документам НКУ, представляемым на сертификацию вместе с изделием, должно быть наличие копий сертификатов соответствия на комплектующие. Это требование направлено на снижение трудоемкости при сертификации НКУ и, следовательно, стоимости ее проведения. Указанное требование иногда пытаются обойти изготовители малых предприятий, приобретающие изделия у случайных продавцов.

Конструктивно НКУ порой представляют собой крупногабаритные щиты, состоящие из нескольких шкафов или панелей массой не одна сотня килограммов, транспортирование которых от изготовителя до аккредитованных лабораторий представляет для заказчика большие трудности и затраты. По нашему мнению, в ряде случаев допустимо проведение сертификационных испытаний громоздких изделий бригадой сертификационного центра в заводских лабораториях, после предварительного обследования их оснащенности. Этим достигается также значительный выигрыш сроков оценки изделий — фактора немаловажного в условиях рынка.

Редактор отдела О.В. Кунавина, научный редактор Л.А. Романова

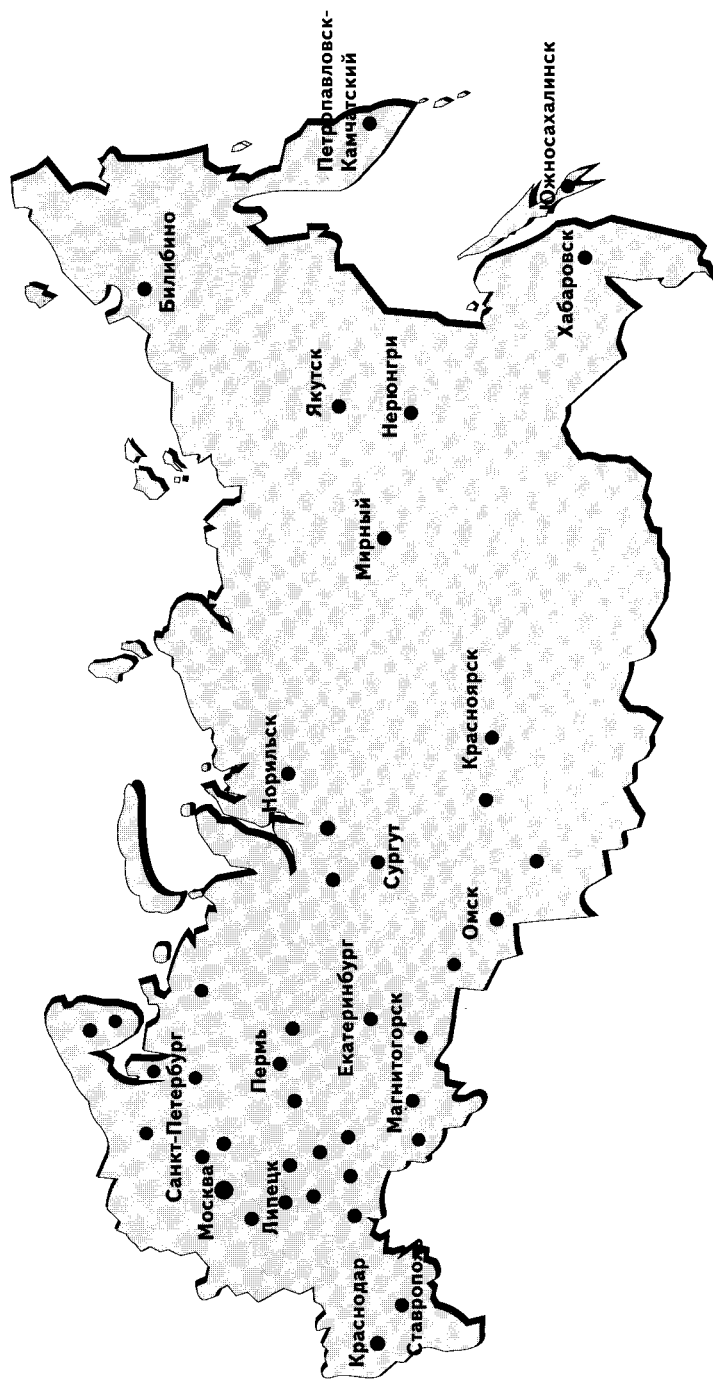
Сдано в набор 30.10.2000. Подписано в печать 21.12.2000. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 64

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

ПОТРЕБИТЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ, ПРОИЗВОДИМЫХ ОАО "ЭЛЕКТРОПРИВОД"



Энергетика - ТЭЦ, ГРЭС, АЭС (вентиляторы, дымососы, транспортеры, питатели топлива, электролизеры, электромагнитные фильтры, системы питания собственных нужд, насосы и др.)

Нефть, газ, нефтехимия (буровые установки, компрессоры нагнетатели, насосы, погружные насосы и др.)

Черная и цветная металлургия - доменные, прокатные станы, электротермические установки, аглофабрики (насосы, вентиляторы, дымососы, транспортеры, скиповый подъем, краны и др.)

Открытые горные разработки (экскаваторы, транспортеры, размольные механизмы и др.)

Шахты (шахтные подъемные установки, вентиляция и др.)

Целлюлозно-бумажная промышленность (бумаго-картоноделательные машины, кalandры, суперкаландры, продольно-резательные станки и др.)

Агропромышленный комплекс - мукомольные предприятия, мясо-молочные комбинаты, фрукто-овоще-хранилища (конвейеры, транспортеры, насосы, вентиляторы, агрегаты и др.)

Коммунальные хозяйства городов и промышленных предприятий (теплоснабжение, водоснабжение, канализации, лифты, метрополитен, строительство и др.)

Машиностроение (станки, краны, компрессоры, насосы и др.)

Текстильная промышленность (ткацкие станки, поточные линии, швейные машины и др.)

ОАО «ЭЛЕКТРОПРИВОД» - МОСКВЕ

ТЭЦ, ГРЭС, водопровод,
канализация, тепловые пункты,
метро, третье транспортное
кольцо, многоэтажные гаражные
комплексы, мэрия, Гостинный
Двор, Манежная площадь,
здания Кремля, мельничные
комплексы, Мосэлектросвет,
лифты, Москабель, Центр
управления полетами, Храм
Христа Спасителя

За 1995-2000 г.г. разработано и поставлено:

- электроприводов и электротехнических комплексов - около 5000
- низковольтных комплектных устройств - около 10000 единиц