МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И СВЯЗИ им. А.С.ПОПОВА

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

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ» ИСТ–2021

Сборник материалов XXVII Международной научно-технической конференции

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

УДК 621:681 ББК 32.97 И650

Информационные системы и технологии - 2021: [Электронный ресурс]: сборник материалов XXVII Международной научно-технической конференции – Электрон. дан. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2021. – 1 электрон. диск (CD-ROM): зв., цв., 12 см. – Систем. требования: ПК с процессором 486; ОЗУ 8 Мб,; операц/ сис-тема Windows 95; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана. – 200 экз.

В сборнике представлены материалы докладов XXVII Международной научнотехнической конференции ИСТ-2021, проведенной 23, 24 апреля 2021 г. дирекцией Института радиоэлектроники и информационных технологий при поддержке, оказанной ректоратом НГТУ им. Р.Е. Алексеева и Нижегородским областным правлением РНТОРЭС им. А.С. Попова.

Конференция проведена в смешанном режиме: очно и с дистанционным доступом в формате вебинара на специализированной электронной платформе в сети Интернет.

Публикуемые материалы представляют тематику, круг научных интересов и состояние исследований представителей научных и высших учебных заведений Белоруссии, Украины и 13 городов РФ - преподавателей, научных сотрудников, докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов - участников НИРС, а также сотрудников МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ, МГТУ Высшей Владимирского «СТАНКИН», школы экономики, государственного университета, Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Волжского государственного университета водного транспорта, Волго-Вятского филиала МТУСИ; представителей более 25 предприятий и НИИ: ИПУ РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИПФ РАН, ИФМ РАН, НИИИС им. Ю.Е. Седакова, НИФТИ, НПП «Полет», АПЗ им. П.И. Пландина, АПКБ и других организаций.

Организационный комитет:

А.В. Мякиньков (председатель), В.П. Хранилов (зам.председателя), А.А. Куркин, Н.Ю. Бабанов, В.Г. Баранов, О.Г. Берестнева, Д.В. Жевнерчук, В.Ю. Карпычев, В.В. Кондратьев, В.Р. Милов, Д.А. Ляхманов, С.Л. Моругин, А.С. Раевский, А.Г. Рындык, Э.С. Соколова, Ю.М. Туляков, М.В. Ульянов, А.Д. Филинских, В.Л. Ягодкин

ISBN 978-5-9902087-8-0

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

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарное заседание
СЕКЦИЯ 1 ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ29
СЕКЦИЯ 2 ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (ИНФОРМАЦИОННОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ) 251
СЕКЦИЯ З ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (автоматизация проектирования) 357
СЕКЦИЯ 4 ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ И СЕТЕЙ463
СЕКЦИЯ 5.1 ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА (системы обработки информации) 569
СЕКЦИЯ 5.2 ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА (интеллектуальные системы управления)643
СЕКЦИЯ 5.3 ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА (ИНФОРМАЦИОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГНИТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ)
СЕКЦИЯ 6 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ
СЕКЦИЯ 7 РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА1007
СЕКЦИЯ 8 ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ВЧ И СВЧ
ДИАПАЗОНОВ

УДК 621.3:62-52-83

Д.А. БЛАГОДАРОВ, Ю.М. САФОНОВ, О.В. КРЮКОВ

НОВЫЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХПРИВОДАХ

Московский энергетический институт (ТУ), г. Москва, ООО «ТСН-электро», г. Н. Новгород

Предложен анализ конструкций электроприводов с машинами переменного тока мегаваттного класса для интегрированных исполнений агрегатов нефтегазовой отрасли. Проведен обзор основных преимуществ капсулированных машин в электроприводах газоперекачивающих агрегатов. Рассмотрены особенности конструкций интегрированных электродвигателей с турбокомпрессорами на магистральных газопроводах России. Показаны эффективные результаты реализации безредукторных и безмасляных технологий для повышения функциональных возможностей, надежности, ресурса, энергоэффективности и экологичности наиболее ответственных электромеханических систем.

Ключевые слова: электродвигатель, конструкция, электрическая машина, ось вращения, надежность, электропривод, турбокомпрессор.

Введение

Перспективы дальнейшего повышения надежности и энергоэффективности основных технологических установок ТЭК связаны с реализацией всей совокупности инновационных достижений электроприводной техники в рамках мировых тенденций интеграции приводных электрических машин с исполнительными турбомеханизмами [1-3]:

- капсулированное исполнение,
- ликвидация редуктора (мультипликатора) и системы уплотнений,
- внедрение системы активных электромагнитных подшипников (ЭМП),
- использование устройств плавного запуска электроприводных агрегатов (ЭГПА),
- подключение преобразователей частоты для регулирования скорости.

Следует учитывать, что проектирование и строительство новых электроприводных компрессорных станций (КС) сопровождается ужесточением условий работы агрегатов в более сложных климатических (северные регионы и шельф) и технологических ограничений (морские платформы и подводные добычные комплексы). Это предполагает необходимость обеспечения новых возможностей по парированию стохастических возмущений [4-6], а также требований безопасной работы ЭГПА в статике и динамике [7-9]. В этой связи уже сегодня согласно нормативной документации каждый ЭГПА должен быть оснащен системами непрерывной диагностики [10-12] и прогнозирования технического состояния электропривода и агрегата с использованием технологий искусственных нейронных сетей [13-15].

Этим направлениям развития способствуют возможности современных электроприводных двигателей мегаваттного класса, которые связаны со сменой технологий электромашиностроения, силовой и микропроцессорной техники и переходом к интеллектуальным системам управления и мониторинга [16-18]. Однако наиболее существенные изменения произошли в конструкциях исполнительных машин и нагнетателях, что и позволило объединить их интегрированном (капсулированном) корпусе [19-21].

Обоснование целесообразности применения капсулированных ЭГПА

В современных ЭГПА именно характеристики приводной машины, ее энергетические и динамические характеристики, функциональные возможности,

надежность и ресурс эксплуатации определяют конкурентоспособность и технико-экономические показатели транспорта газа по магистральным газопроводам (МГ) и его конкурентоспособность по сравнению с газотурбинными вариантами привода.

Отечественными предприятиями, связанными с разработкой высоковольтных машин для ЭГПА, являются ЗАО «РЭП Холдинг» (СПб) и ООО "Электротяжмаш-Привод" (г. Лысьва). Среди зарубежных фирм мегаваттные двигатели производят ABB, консорциум Alstom (Converteam) — MAN Turbo, MELCO (MitsubishiElectricCorporation), GeneralElectric (GE), Siemens. Опыт промышленной эксплуатации данных машин в нефтегазовом комплексе для мощных и энергоёмких механизмов доказал перспективность их применения.

Разработка новых конструкций приводных электродвигателей ЭГПА обусловлена новыми требованиями надежности, энергоэффективности и экологичности на КС МГ в соответствии с отраслевыми нормативными документами. Модернизация и замена конструкций приводных двигателей, существующих ЭГПА на новые интегрированные с исполнительным турбомеханизмом, позволяет получить конкурентные преимущества:

- Исключение из компоновки установок ЭГПА мультипликатора.
- Прямое соединение «двигатель-нагнетатель» на базе высокоскоростных электрических машин.
- Значительное сокращение площадей под установку ЭГПА.
- Исключение системы смазки подшипников двигателя и компрессора и необходимости запасов масла, его охлаждения и рисков возгорания.
- Применение ЭМП роторов повышает показатели надежности и ресурс ЭГПА, снижаются затраты на обслуживание и ремонты.
- Снижение износа механического и электротехнического оборудования благодаря снятию ограничений на число пусков и остановов.
- Снижение вероятности возникновения поломок и помпажа, благодаря плавному изменению режимов работы компрессорных цехов.
- Повышение готовности агрегата к пуску, снижение времени и энергетических затрат пуска.
- Повышение точности отработки задания при дистанционном управлении ЭГПА с переходом к безлюдным технологиям обслуживания оборудования и улучшение условий труда.

Анализ реализации капсулированных ЭГПА «МОПИКО»

Рассмотрим результаты работ по технико-экономическому обоснованию применения капсулированного ЭГПА «МОРІСО» (рис. 1) при реконструкции КС Карталинская ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург».

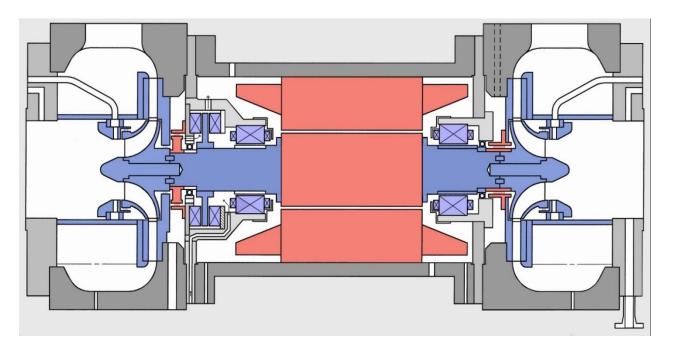


Рис. 1. Конструкция ЭГПА типа МОПИКО

В ходе предпроектной подготовки были выделены и проработаны следующие варианты реконструкции:

- 1. Замена существующих электродвигателей СТМ-4000 на комплектный электропривод КРЭП-6300 XK «Привод» (двигатели СТД-6300, преобразователи частоты «Ансальдо-ВЭИ»).
- 2. Модернизация существующих электродвигателей (замена подшипников, изоляции и т.д.) с установкой регулируемого электропривода.
- 3. Установка трех (2+1) мотор-компрессоров «МОРІСО» вместо группы из пяти существующих СТМ-4000 (плавное регулирование производительности по одной нитке МГ).
 - 4. Установка пяти (4+1) мотор-компрессоров «МОРІСО» вместо СТМ-4000.

Однако наиболее перспективным признан вариант с установкой оригинальных капсулированных мотор-компрессоров «МОРІСО» мощностью 7500 кВт со скоростью вращения 12000 об/мин. Данный наиболее рациональный вариант реконструкции предполагает замену пяти существующих двигателей на три мотор-компрессора «МОРІСО» производства фирмы «Альстом» (Германия). ЭГПА «МОРІСО» состоит из АД и двух нагнетателей, выполненных в едином конструктиве на одном валу, с активным ЭМП ротора двигателя и валов нагнетателей. Охлаждение двигателя осуществляется перекачиваемым газом, позволяяя:

- плавно регулировать производительность в широких пределах;
- минимизировать капитальные вложения при максимальных ТЭР;
- отказаться от систем маслосмазки и уплотнения в подшипниках;
- в два раза сократить площади под привод при реконструкции.

Результаты технико-экономического сопоставления вариантов ЭГПА по КС Карталинская МГ «Бухара-Урал» приведены на рис. 2.

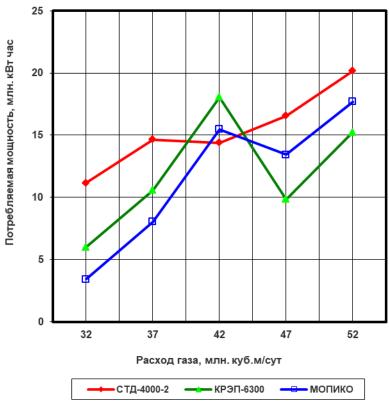


Рис. 2. Энергозатраты вариантов ЭГПА на КС Карталинская

Расчетные значения энергозатрат этих вариантов приведены в табл. 1. Расчеты выполнены при условии работы ГПА 6000 час/год там же получены итоговые значения энергозатрат для заданных суточных объемов газа в диапазоне значений от 32 до 52 млн. м³/сут (для каждого из расчетных значений принято равномерное распределение времени работы, принятое 1200 час).

Таблица 1 Годовые энергозатраты вариантов ГПА КС Карталинская

Оснащение ГПА	Годовые энергозатраты,	Годовой расход топливного газа,	
	млн. кВт∙час	млн. м ³	
СТД-4000-2	76,92	-	
КРЭП-6300	59,70	-	
ГПА-Ц-6,3	-	46,0	
МОПИКО	58,08	-	

Таким образом, применение капсулированных частотно-регулируемых ЭГПА более чем на 20 % уменьшает потребление электроэнергии КС по сравнению с нерегулируемыми системами, что значительно снижает нагрузку на питающие сети, стабилизирует выходное давление газа, снижает его себестоимость и надежность работы трубопроводной арматуры.

Система управления капсулированным ЭГПА

Эффективность применения ЭГПА с быстроходными асинхронными двигателями (АД) достигается в системах векторного управления с преобразователями частоты:

- на основе автономного инвертора тока и АД;
- на основе автономного инвертора напряжения и АД;
- по схеме «вентильный двигатель» с быстроходным СД.

Наиболее перспективным вариантом является частотно-регулируемый ЭГПА с автономным инвертором и быстроходным АД на магнитном подвесе. Схема управления капсулированного ЭГПА представлена на рис. 3.

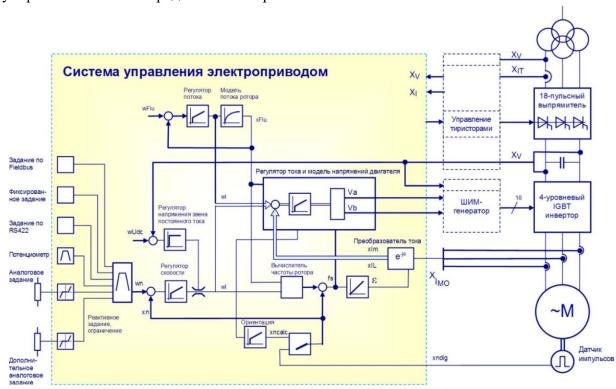


Рис. 3. Система управления капсулированным ЭГПА

Современный, высокоскоростной частотно-регулируемый ЭГПА «МОРІСО» выполнен на основе инвертора напряжения на интеллектуальных IGBT-модулях (1300 В, 1600 А), с оригинальным многоуровневым ШИМ-формированием напряжения АД. Применение новых силовых модулей совместно с конденсаторами, выполненных конструктивно с малыми индуктивностями рассеивания, позволяет ограничить пики напряжения на транзисторах.

Система управления "МОРІСО" выполнена по векторному принципу организации САР, ориентированной по вектору потокосцепления ротора. Очень важно, что современная мультипроцессорная САУ позволяет интегрировать привод в АСУ ТП и электроснабжением (АСУ ЭС) КС. Системные решения при реализации АСУ КС с ЭГПА позволяют оптимально и плавно регулировать производительность агрегатов с максимально возможными технико-экономическими показателями.

Интеграция электроприводов в АСУ ЭС через систему управления микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики дает возможность автоматического дистанционного управления высоковольтными выключателями ЭГПА, позволяя:

- формировать оптимальные переходные процессы и снижать ударные значения моментов при резких и значительных изменениях нагрузки в МГ;
- обеспечить точный график газоподачи путём компенсации случайных возмущений климатического и технологического характера путём создания инвариантных систем с регрессионными алгоритмами;
- реализовать систему предстартовой и оперативной диагностики и прогнозирования неисправностей на базе нейро-сетей с эволюцией технического состояния ЭГПА по лингвистическим величинам текущих параметров;

- обеспечить функции стартовой самонастройки системы управления, а также возможностей переналадки и адаптации к новым режимам работы ЭГПА;
- получить экспертную поддержку для рационального выбора конкретного технического решения модернизации ЭГПА и комплексного исследования выходных характеристик на экспериментальном автоматизированном стенде.

Высокооборотный двухполюсный асинхронный электродвигатель с КЗ кованым высокопрочным ротором на ЭМП при номинальной скорости до 9.500 об/мин имеет отвод тепла посредством перекачиваемого газа, схема которого приведена на рис. 4.

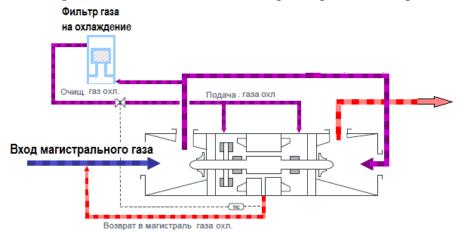


Рис. 4. Конструкция системы охлаждения моноблока ЭГПА

Выводы

Таким образом, новые конструктивные решения электродвигателей переменного тока мегаваттного класса в капсулированном исполнении позволяют значительно повысить показатели надежности, энергоэффективности и экологичности систем электроприводов агрегатов в важнейших электроэнергетических отраслях промышленности.

Библиографический список

- 1. Благодаров Д.А., Сафонов Ю.М., Крюков О.В. Энергосберегающие системы автоматизированного электропривода турбокомпрессоров // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2020. XXVI МНТК. НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2020. С. 269-276.
- 2. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.
- 3. Туганов Р.Б., Благодаров Д.А., Крюков О.В. Перспективы автоматизации объектов машиностроения // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2020. Сборник материалов XXVI МНТК. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 323-330.
- 4. Kryukov O.V., Blagodarov D.A., Dulnev N.N., Safonov Y.M., Fedortsov N.N. Intelligent control of electric machine drive systems // Всборнике: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 Conference Proceedings 10. 2018. C. 8571670.
- 5. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. МатериалыХІІМНПК. 2017. С. 153-158.

- 6. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 7. Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 8. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК под редакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 9. Крюков О.В. Моделирование и микропроцессорная реализация электромеханических систем // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. №3. С. 55-61.
- 10. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. № 7. C. 473-478.
- 11. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.
- 12. Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В. Электроприводы на основе машины двойного питания и АВК с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.
- 13. Степанов С.Е., Васенин А.Б., Крюков О.В. Цифровое моделирование синхронных электрических машин при работе на турбокомпрессорную нагрузку // Наука и техника в газовой промышленности. 2020. № 4 (84). С. 84-90.
- 14. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 15. Благодаров Д.А., Крюков О.В.Повышение надежности энергетических установок путем прогнозирования состояния электроприводов // В сборнике: Великие реки' 2018 Труды научного конгресса. Отв. редактор А.А. Лапшин. 2018. С. 36-39.
- 16. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 17. VaseninA.B., KryukovO.V., SerebryakovA.V. Adaptivecontrolalgorithmsofautonomousgeneratorcomplexes // В книге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.
- 18. Благодаров Д.А., Крюков О.В.Показатели энергосбережения в системах интеллектуального электропривода // В сб.: Великие реки' 2019 труды научного конгресса. 2019. С. 28-31.
- 19. Крюков О.В., Степанов С.Е. Новыеконструкции электроприводных ГПА // В сборнике: Труды XVII Международной конференции "Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты". 2018. С. 177-180.
- 20. Крюков О.В., Леонов В.П., Федоров О.В. Применение микропроцессорной техники в нагружающих устройствах // Двигателестроение. 1987. № 7. С. 37-43.
- 21. Крюков О.В., Серебряков А.В. Экологические направления электроснабжения и задачи энергосбережения при реконструкции объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. № 8. С. 23-33.

D. A. Blagodarov¹, Yu. M. Safonov¹, O. V. Kryukov² NEW DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN ENERGY-SAVING DRIVES

¹Moscow power engineering Institute (TU), Moscow, ²TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod

An analysis of the designs of electric drives with megawatt class AC machines for integrated versions of oil and gas industry units is proposed. The main advantages of encapsulated machines in electric drives of gas pumping units are reviewed. The design features of integrated electric motors with turbochargers on the main gas pipelines of Russia are considered. The effective results of the implementation of gearless and oil-free technologies for improving the functionality, reliability, resource, energy efficiency and environmental friendliness of the most critical electromechanical systems are shown.

Keywords: electric motor, design, electric machine, rotation axis, reliability, electric drive, turbocharger.

С.В. ВОРОБЬЕВ, О.В. КРЮКОВ, Д.А. БЛАГОДАРОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЯ

ООО «ТСН-электро», г. Н. Новгород, НИУ «МЭИ», г. Москва

Рассмотрены современные подходы к использованию парадигмы искусственного вопросах управления мониторинга различными интеллекта И электромеханическими системами автоматизированными электроприводами И технологических установок. Предложена классификация методов и сравнительная оценка их возможностей. Приведены примеры практической реализации методологии искусственных нейронных сетей для прогнозирования технического электроприводов турбокомпрессоров.

Ключевые слова: электромеханическая система, искусственные нейронные сети, электропривод, искусственный интеллект, автоматическое управление, прогнозирование.

Введение. Применение методов искусственного интеллекта (ИИ) позволяет осуществить попытку найти новые подходы к решению проблемы адекватного прогнозирования технического состояния мощных и дорогостоящих машин, на основе применения знаний и опыта экспертов, теории распознавания образов, обучения, адаптации к изменяющимся внешним условиям, принятия решения при дефиците информации, наличии шумов [1-4].

Как известно, методы ИИ разделяются на два подхода: детерминированные и эволюционные. К первым относятся системы на базе нечёткой логики [5-8]. К эволюционным методам — генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети (ИНС) [9-12]. Сравнительные характеристики различных методов ИИ и их возможное применение при решении задач диагностирования технического состояния (ТС) электромеханических систем (ЭМС), включая синхронные двигатели (СД) [13-16] представлены в таблице 1.

Таблица 1 Спавнительная характеристика метолов искусственного интеллекта

	Сравнительная характеристика методов искусственного интеллекта				
Метод	Особенности	Недостатки (для	Использование при		
		решаемой задачи)	оценке ТС		
Нечеткая	Распознавание образов, принятие	Не могут решать задачи	Использование		
логика	решений	генеза и	совместно с другими		
		прогнозирования ТС	методами ИИ на этапе		
			решения задач		
			классификации		
Генетиче	Универсальная оптимизация	Напрямую не	Использование		
ские		применимы к задачам	совместно с другими		
алгоритм		диагностирования	методами ИИ на этапе		
ы			настройки параметров		
			систем		
Нейронн	Типовые элементы, параллельная	От выбора оптимальной	Подходят для решения		
ые сети	обработка, универсальная	структуры НС зависит от	всех типов задач		
	аппроксимация, классификация,	качества решения задачи	диагностирования		
	распознавание образов				

Методы нечеткой логики могут быть эффективны на стадиях распознавания и классификации тех или иных отказов, например, в работах [17-21], но не отвечают

требованиям решения задач генеза и прогнозирования состояния объекта в среднесрочной перспективе.

Перспективность моделей искусственных нейронных сетей

Искусственные нейросетевые (ИНС) модели являются универсальными вычислительными структурами, поэтому могут быть наиболее эффективны для всех необходимых задач оценки ТС ЭМС. Такие свойства ИНС как универсальная аппроксимация должны оптимальным образом решать задачи генеза. Широкие возможности по классификации и распознаванию образов позволяют выделять различные классы состояний при решении задачи оценки ТС ЭМС. Экстраполирующие свойства вычислительных нейронных структур могут обеспечить решение задач прогнозирования ТС ЭМС. Широкое применение ИНС нашли для решения задач изучения сложных процессов, где отсутствуют способы формального описания исследуемых объектов и явлений. При решении технических задач, таких, например, как:

- идентификация объектов управления,
- структурно-параметрический синтез регуляторов,
- диагностирование неисправностей, и др.

Применение НС до сих пор достаточно ограничено. Отчасти это объясняется наличием развитого математического аппарата, описывающего процессы и явления, происходящие в объектах, а также наличием большого количества методов решения указанных задач.

Несмотря на это, в последние годы наблюдается положительная динамика в плане применения ИНС для решения задач идентификации и диагностировании неисправностей технических объектов (авиационных газотурбинных двигателей, асинхронных двигателей и СД, мехатронных автономных модулей движения, различных роботов для внутритрубной диагностики магистральных нефтегазопроводов и технологических внутриплощадочных систем), а также проблем оперативного прогнозирования состояния оборудования с целью повышения их эффективного функционирования. Однако области применения этих исследований ограничиваются простыми объектами, не учитывают эмерджентность эксплуатационных свойств всей ЭМС. Кроме того, усложнение технологий требует совершенствование систем диагностирования, современных повышающих быстродействие при поиске отказов и оценке ТС и достоверность прогнозирования ТС, которые не могут быть обеспечены существующими методами и средствами.

Необходимо отметить, что ИНС лишены недостатков, присущих другим методам ИИ:

- им не требуется большая база знаний об объекте, как экспертным системам;
- для них не нужно описывать логику работы и функции принадлежности, как в методах нечёткой логики. ИНС имеют в себе резервы для дальнейшего развития задач оценки работоспособности. Возможна комбинация ИНС с другими методами ИИ, например, в качестве дополнительной помощи при распознавании неисправности, или на завершающей стадии в системах принятия решений (СПР), помогая человеку принять единственно верное решение.

Существует тенденция в научных исследованиях по реализации различных моделей ИИ на основе ИНС: нейронные экспертные сети, гибридные НС, лингвистические НС, нейронные семантические сети. Это подтверждает перспективность дальнейшего совершенствования теории ИНС для ЭМС.

Таким образом, на сегодняшний день ИНС являются уникальным и универсальным инструментом, который можно использовать на всех стадиях процесса диагностирования.

Аппарат ИНС позволяет реализовать программно-математическое обеспечение, позволяющее, не только выполнять однажды запрограммированную последовательность действий над строго определенными данными, но и способное обобщать вновь

поступающую информацию, находить в ней закономерности, и т.д. Нейросетевое моделирование позволяет ответить на вопрос поискового прогноза ТС ЭМС "что будет, если?". Создание обучающей выборки, ее корректность, подбор обучающих параметров одна из основных задач разработчика нейросетевой модели для оценки ТС ЭМС. Например, разработчику экспертной системы не требуется устанавливать взаимосвязи между входными данными и необходимым решением, тратя время на разнообразную статистическую обработку, подбор математического аппарата, создание и длительную проверку математических моделей. Основная задача состоит в нахождении параметров "серого ящика", оптимальных в смысле точности отображения входных обучающих векторов в выходные. Главным критерием работы нейросетевых экспертных систем является практика - многократные испытания и проверки в самых различных условиях управления.

Преимущество применения нейросетевых технологий в электромеханике и электроприводе может быть обусловлено следующими соображениями:

- возможность оценки TC не одного элемента (двигателя, электромеханической конструкции), а функционально связанного множества элементов (элементов управления двигателей, кабеля, трансформатора и т.д.) с помощью интеллектуальных моделей. Учетом прецедентности (регистрация фактов нахождения электромеханического оборудования в тех или иных TC) в процессе эксплуатации больших ЭМС;
- быстроте параллельной обработки высокоразмерных векторов контролируемых данных, реализующих нейросетевые модели контроля, прогнозирования ТС и поиска неисправности элементов ЭМС, с встройкой сложных программ диагностирования ТС в контур управления ЭМС;
- возможность программного обучения ИНС, при котором она приобретает "знание" об исследуемом предмете на основании сигналов, что его описывают, поэтому наученную НС можно применять к решению задачи без необходимости знания алгоритма, нахождение решения;
- правильно наученная ИНС имеет способность к обобщению, то есть ее можно использовать для решения задач интерполяции и экстраполяции, т.е. она способная сгенерировать правильное решение для ситуаций, которые не были предусмотрены за время обучения.

Применительно к ЭМС нейросетевые технологии способны найти применение в качестве средств распознавания (при контроле TC ЭМС), прогнозирования и моделирования процессов развития предаварийных ситуаций и поиске неисправности. Анализ показал, что имеется необходимость построением эффективных методов комбинаторного поиска (комбинаторной оптимизации) при диагностировании состояния системы "параметры технического состояния ЭМС - внешние факторы" для класса экстремальных задач. ИНС в перечисленных системах используется в качестве самостоятельной системы представления знаний, и в практических приложениях выступает, как один из компонентов системы управления либо модуля принятия решений и может быть принята для оценки ТС ЭМС.

Техническая реализация систем искусственного интеллекта на базе ИНС

В настоящее время, наиболее массовым и доступным направлением использования ИНС является моделирование нейронных сетей на обычных компьютерах, прежде всего персональных, которые можно разместить в операторских кабинах. Априорная информация об алгоритмических возможностях нейросетевых архитектур, таких как, отсутствие вычислительных сложностей при росте размерности задачи распознавания, способность разделять в пространстве признаков выпуклые и несвязанные области, а также высокие аппроксимационные возможности нейросетевых моделей позволяет сделать заключение о перспективности и доступности нейросетевых технологий в диагностировании ТС ЭМС. В современной литературе по оценке ТС ЭМС практически

отсутствуют основы теории применения ИНС для целей оценки ТС, прогнозирования ТС и поиска неисправности. Таким образом, высокая размерность пространства состояний СД в комплексе с высокими требованиями к оперативности диагностических решений в контуре управления режимами ЭМС, требуют применения нейросетевых технологий.

В настоящее время исследованиями в этой области занимается свыше 300 зарубежных фирм, причем число их постоянно увеличивается. Наблюдается тенденция перехода от программной к программно-аппаратной реализации нейросетевых алгоритмов со значительным увеличением производства нейрочипов и нейроконтроллеров. Существенно увеличилось число военных разработок, ориентированных на создание сверхбыстрых, «умных» суперЭВМ. Нейросетевые алгоритмы являются попыткой моделирования способности человеческого мышления, в частности способности, обучаться и решать задачи распознавания по прецедентам. Доступность и возросшие вычислительные возможности современных компьютеров привели к широкому распространению программ, использующих принципы нейросетевой обработки данных на последовательных ЭВМ. Этот подход не использует преимуществ параллелизма, присущих нейро-вычислениям и ориентируется исключительно на возможность с помощью моделей ИНС решать слабоформализуемые задачи, так или иначе связанных с обработкой образов.

Методология разработки ИНС ТС СД

Решение проблемы разработки методологических основ построения методов диагностирования сложных ЭМС на основе нейросетевых технологий связано с обоснованием и экспериментальной проверкой в условиях действующего производства их информационного, математического и программного обеспечения. При этом необходимо обеспечить повышение эффективности процессов диагностирования состояний сложных ЭМС путем научного обоснования и практического подтверждения методологии применения новых методов, моделей, алгоритмов и программного обеспечения на базе распространенных архитектур ИНС. В соответствии с этим последовательный алгоритм решения следующий:

- 1. Анализ существующих методов контроля и прогнозирования технических состояний электромеханического оборудования и обоснования целесообразности создания интеллектуальной системы диагностирования сложных ЭМС на базе распространенных архитектур нейронных сетей.
- 2. Разработка концепции совершенствования систем диагностирования сложных электромеханических систем с учетом применения ИНС в условиях нестационарности и многофакторности воздействий внешней среды.
- 3. Создание методов и моделей контроля технических состояний сложных ЭМС в нейросетевом базисе при иерархической системе распознавания.
- 4. Разработка методов, моделей и алгоритмов для решения задачи прогнозирования технических состояния электромеханических систем на основе экстраполяции в пространстве возможных прецедентов их эксплуатации.
- 5. Синтез алгоритмического и программного обеспечения и создание аппаратного комплекса технического диагностирования электромеханических систем в режиме эксплуатации.
- 6. Экспериментальная проверка, разработанных методов, моделей и алгоритмов диагностирования состояний электромеханических систем.

Перспективные направления развития технологий ИНС для электроприводов Анализ состояния вопроса в области теории и практики диагностирования

электромеханических систем показал следующее:

1. Новые требования оценки эффективности функционирования состояний ЭМС связаны главным образом с переходом к получению и использованию результатов не

отдельных измерений, а потоков информации о десятках однородных или разнородных величин, большая часть из которых может быть недоступной для прямых измерений. Использование ЭМС в опасных условиях функционирования делают участие человекаоператора вообще недопустимо. Таким образом, при диагностировании ЭМС необходимо создание новых средств, позволяющих исключить человека из процесса сбора и обработки интенсивных потоков измерительной информации и принятия решений о состоянии электромеханической системы.

- 2. В результате анализа состояния исследований в областях оценки ТС сложных объектов установлено, что наиболее перспективным является направление с использованием ИНС, которые позволяют в едином методологическом базисе формулировать задачи оптимального управления, и в реальном масштабе времени решать задачи контроля ТС, поискового прогнозирования ТС и поиска неисправности ЭМС, а современная компьютерная элементная база, позволяет реализовать нейросетевой вычислительный базис диагностических моделей ЭМС, с учетом жестких ограничений на массовые, габаритные и энергетические характеристики средств обработки, в неблагоприятных условиях применения ЭМС.
- 3. Изучение состояния исследований в области создания систем диагностирования ТС ЭМС выявило состав подсистем, при которых эта оценка максимальна по достоверности и полноте: контроля готовности технологического оборудования; оперативного контроля и прогнозирования ЭМС; контроля функционирования ЭМС и поиска неисправностей ЭМС.
- 4. На основе анализа состояния вопроса представлено описание решения второй задачи диагностирования ЭМС прогнозирования ее технического состояния в нейросетевом алгоритмическом базисе.
- 5. Классификация методов поиска отказов ЭМС выявила три основных направления:
- проверки элементов ЭМС последовательно с анализом TC после каждой проверки;
 - проверки групп элементов ЭМС с анализом ТСс гибкой программой поиска;
- проверки групп элементов ЭМС с анализом ТС после проведения полной группы проверок, обеспечивающей однозначное определение неисправного элемента.

Таким образом, проведенная классификация позволяет произвести количественную оценку методов, а, следовательно, их сравнение и выработку действенных практических рекомендаций. Синтез оптимальных поисковых процедур позволяет совершенствовать систему поиска и определения причин неисправностей, по двум направлениям разработок: выбор оптимального объёма контрольных проверок элементов ЭМС и разработка алгоритма выбора оптимальной последовательности проверок. Частично решить проблемы, связанные с экспоненциальным ростом числа возможных комбинаций в последовательности проверок, позволяют параллельные реализации методов поиска мест, и причин неисправностей ЭМС.

- 6. Предлагается для диагностирования состояний ЭМС использовать распространенные архитектуры НС, которые обладают рядом важных свойств:
- решать плохо формализуемые традиционными математическими методами задачи, к числу которых относится идентификация ТС ЭМС, причем решать их в режиме реального времени за счет высокой скорости работы ИНС, при дефиците измерительной информации и наличии шумов в измерениях, большом количестве измеряемых параметров;
- в процессе своей работы ИНС способна самообучаться в соответствии с изменяющимися в процессе эксплуатации ЭМС параметрами;
- позволяют учесть не только изменения технологических режимов работы, но и изменения состояния ЭМС;

- обладают большим быстродействием по сравнению с моделями, построенными на основе дифференциальных или алгебраических уравнений.

Выводы

Анализируя перспективы развития и использования современных систем автоматизации для задач машиностроения в России, можно прогнозировать рост потребности в них в связи с модернизацией и созданием нового технологического оборудования. Применение интеллектуальных модулей и микропроцессорных средств с IT- алгоритмами позволяет:

- идентифицировать параметры объектов, осуществлять самонастройку регуляторов, адаптацию к изменению параметров, мониторинг, что делает систему контролируемой;
- реализовать новые способы управления и прогнозирования на базе нейронных сетей и генетических алгоритмов, что делает систему обучаемой;
- использовать информационный обмен и сетевые технологии, обеспечивая связь между модулями и с системами управления высокого уровня, что делает ее интеллектуальной.

Библиографический список

- 1. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 2. Kryukov O.V., Blagodarov D.A., Dulnev N.N., Safonov Y.M., Fedortsov N.N., Kostin A.A. Intelligent control of electric machine drive systems // Всборнике: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 Conference Proceedings 10. 2018.
- 3. Туганов Р.Б., Благодаров Д.А., Крюков О.В. Перспективы автоматизации объектов машиностроения // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2020. Сборник материалов XXVI МНТК. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 323-330.
- 4. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 5. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.
- 6. Крюков О.В. Моделирование и микропроцессорная реализация электромеханических систем // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. №3. С. 55-61.
- 7. Крюков О.В., Леонов В.П., Федоров О.В. Применение микропроцессорной техники в нагружающих устройствах // Двигателестроение. 1987. № 7. С. 37-43.
- 8. VaseninA.B., KryukovO.V., SerebryakovA.V. Adaptive control algorithm so fautonomous generator complexes // Вкниге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.
- 9. Мещеряков В.Н., Крюков О.В., Туганов Р.Б. Применение методов искусственного интеллекта для управления и мониторинга электромеханических систем и электроприводов // Автоматизация и ІТ в энергетике. 2020. № 3 (128). С. 10-16.
- 10. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 11. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.

- 12. Степанов С.Е., Васенин А.Б., Крюков О.В. Вейвлет-преобразование в задачах анализа и синтеза АЭП // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2020. XXVI МНТК. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 307-314.
- 13. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.
- 14. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК под редакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 15. Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В. Электроприводы на основе машины двойного питания и АВК с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.
- 16. Серебряков А.В., Крюков О.В. Новые возможности гибридных энергетических установок на платформе SMARTGRID // В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики. Материалы ВНТК. Нижний Новгород, 2012. С. 135-137.
- 17. Крюков О.В., Серебряков А.В. Экологические направления электроснабжения и задачи энергосбережения при реконструкции объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. № 8. С. 23-33.
- 18.Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 19. Благодаров Д.А., Крюков О.В. Показатели энергосбережения в системах интеллектуального электропривода // В сб.: Великие реки' 2019 труды научного конгресса. 2019. С. 28-31.
- 20. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. № 7. C. 473-478.
- 21. Благодаров Д.А., Сафонов Ю.М., Крюков О.В. Энергосберегающие системы автоматизированного электропривода турбокомпрессоров // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2020. XXVI МНТК. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 269-276.

S. V. Vorobyov¹, O. V. Kryukov¹, D. A. Blagodarov² INTELLECTUALIZATION OF POWER ENGINEERING FACILITIES

¹OOO "TSN-Elektro", N. Novgorod, ²National research UNIVERSITY "MPEI", Moscow

Modern approaches to the use of the artificial intelligence paradigm in the management and monitoring of various complex electromechanical systems and automated electric drives of technological installations are considered. A classification of methods and a comparative assessment of their capabilities are proposed. Examples of practical implementation of the methodology of artificial neural networks for predicting the technical condition of electric turbocharger drives are given.

Keywords: electromechanical system, artificial neural networks, electric drive, artificial intelligence, automatic control, forecasting.

Е.В. БЫЧКОВ, В.Г. ТИТОВ, О.В. КРЮКОВ

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ТЭК И МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, OOO «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

Представлены результаты создания системы автоматизированного диспетчерского контроля и управления технологическими объектами нефтепроводов в рамках комплекса работ по проектированию системы магистральных нефтяных трубопроводов Республики Казахстан. Рассмотрены инновационные решения, обеспечивающие автоматическое управление всеми объектами нефтеперекачивающих станций, повышение уровня безопасности и энергоэффективности эксплуатации нефтепроводов и обеспечение качества транспортируемых нефтепродуктов. Предложено описание особенностей функционирования структурной схемы автоматизированной системы управления технологическим процессом транспорта нефти на основе концепции открытых международных стандартов всех уровней IT-взаимодействий компонентов.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, мониторинг, контроль, магистральный трубопровод, нефтеперекачивающая станция.

Введение

Стабильное развитие топливно-энергетического комплекса России является одним из стратегических направлений в экономике России и Казахстана [1-4]. В этой связи особую актуальность приобретает дальнейшее развитие нефтетранспортной инфраструктуры для обеспечения роста экспорта нефти, а также ее поставок на внутренние рынки. Для этого, например, компания ЗАО «КазТрансОйл» как основной оператор поставок казахстанской нефти на экспорт выполняет целый комплекс работ:

- оптимизацию поставок нефти,
- объединение системы нефтяных трубопроводов в единую технологическую систему,
- обеспечение взаимодействия с операторами, потребителями и поставщиками нефти,
- организацию менеджмента качества нефти и воздействия на окружающую среду в соответствии с требованием международных стандартов ISO.

Поставленные задачи решаются на основе современных информационных технологий [5-9], которые уже успешно апробированы в смежных отраслях промышленности России [10-14]. В частности, по заказу компании АВВ (Германия) выполнен комплекс проектных работ по созданию АСУ ТП нефтеперекачивающих станций (НПС) магистральных нефтепроводов (МН), проходящих по территории Республики Казахстан. Состав работ определялся в соответствии с ГОСТ 34.601-90 "АСУ. Стадии создания". Необходимостьв комплексном обследовании объектов с выработкой предложений по подготовке технологических процессов на объектах к автоматизации обусловило разработку проекта и рабочей документации, включая информационно—алгоритмическое обеспечение, проведение авторского надзора и подготовку документации "Как построено" [15-18].

В данном проекте задача создания системы автоматизированного диспетчерского контроля и управления нефтепроводами и технологическими объектами ЗАО «КазТрансОйл» должна обеспечить автоматизированное управление всеми технологическими объектами, повышение уровня безопасности эксплуатации нефтепроводов, обеспечение качества нефти в соответствии с требованиями стандарта ISO, мониторинг

технологического оборудования, обнаружение и локализацию утечек [19-23]. Объекты,

для которых выполнялось проектирование АСУ ТП, выделены на рис. 1.

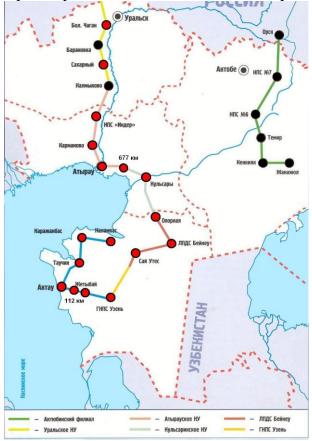


Рис. 1. Схема трубопроводов Западного и Актюбинского филиалов «КазТрансОйл»

Основными объектами автоматизации явились головные нефтеперекачивающие станции (ГНПС), линейные НПС и станции подогрева нефти (СПН).

Особенности проекта автоматизации

В составе вышеназванных объектов вошли магистральные насосные, подпорные насосные, резервуарные парки, наливные/ сливные железнодорожные эстакады и танкерные причалы, узлы пуска и приема устройств очистки и диагностики трубопроводов, пункты подогрева нефти, узлы регулирования давления нефти с запорной арматурой, узлы учета нефти, вспомогательные системы, обеспечивающие функционирование НПС.

При разработке проекта была решена задача использования однородных ПТС на каждом из уровней управления. Для автоматизации НПС, нефтехранилищ и СПН были использованы программно-технические средства Freelance 2000 (поставки ABB AutomationSystemsGmbH), которые обеспечивают высокий уровень масштабирования, резервирование, диагностирование до уровня канала, простоту обслуживания, функции мониторинга и контроля.

Функциональность АСУ ТΠ обеспечила создание автоматизированной многоуровневой системы на базе современных ПТС, реализацию принципа управления «сверху» путем приема в автоматическом режиме плановых заданий и установок работы НПС с вышестоящего уровня, обеспечение непрерывного контроля работы основного технологического оборудования и систем жизнеобеспечения станции, оптимизацию режиработы станций, повышение технико-экономических показателей

своевременного определения, локализации и устранения утечек, а также сокращения простоев за счет определения оптимального режима перекачки.

Особенностью проектируемой СА являлось внедрение ее на существующих, действующих объектах (НПС, СПН), что предъявляло соответствующие требования к основной технологии и системам жизнеобеспечения. При этом заказчиком были поставлены задачи по замене устаревшего и изношенного оборудования КИП, исполнительных устройств и механизмов, систем локальной автоматики на современные микропроцессорные системы с интеграцией в создаваемую АСУ ТП НПС МН (рис. 2). В составе работ был проведен анализ наличия введенных в действие микропроцессорных систем и современной датчиковой аппаратуры, по результатам которого выработаны решения по их интеграции в АСУ ТП.

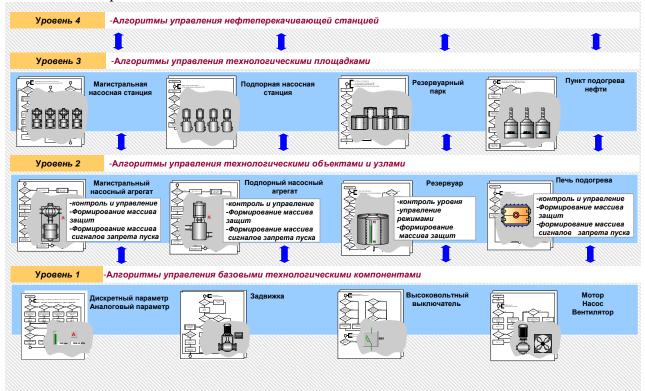


Рис. 2. Функциональная структура алгоритмического обеспечения АСУ ТП

В ходе детального технического обследования определен объем реконструкции морально и физически устаревшего технологического и электротехнического оборудования, а также части трубопроводов. Разработаны предложения по подготовке объектов к внедрению новой современной системы АСУ ТП.

Учитывая динамику изменений технологических задач и развития инфраструктуры объектов, АСУ ТП создавалась изначально с открытой архитектурой позволяющей дополнять систему при вводе в строй новых технологических объектов или участков магистральных нефтепроводов, либо заменять морально устаревшие компоненты системы при минимальных затратах на стыковку с существующим комплексом ПТС.

Система диспетчерского контроля и управления нефтепроводами и технологическими объектами ЗАО «КазТрансОйл» является многоуровневой. Благодаря тому, что технологическое оборудование во многом подобно, были созданы стандартные алгоритмические модули, которые адаптировались для конкретных объектов автоматизации. Таким образом, однородность создаваемой системы была обеспечена не только на аппаратном уровне технических средств, но и на алгоритмическом и программном уровне.

Проиллюстрируем проектные решения на примере АСУ ТП головной НПС (4-й уровень диспетчерского управления), где представлены практически все виды ПТС, примененные в проекте. Структурная схема АСУ ТП ГНПС, представлена на рис. 3.

Структура комплекса программно-технических средств АСУ ТП ГНПС (как и всей АСУ ТП НПС МН ЗАО «КазТрансОйл») базируется на следующих основных принципах построения АСУ ТП:

централизованный, иерархический контроль и управление технологическими объектами и магистральными нефтепроводами;

открытая архитектура IT-взаимодействия компонентов ACУ;

распределенная структура подсистемы сбора и обработки;

оптимизация распределения функций сбора информации, контроля, управления на базе объектно-ориентированного подхода;

простота ТО и высокая степень готовности ПТС;

короткое время восстановления системы;

самодиагностика и выборочное дублирование или резервирование компонентов комплекса ПТС.

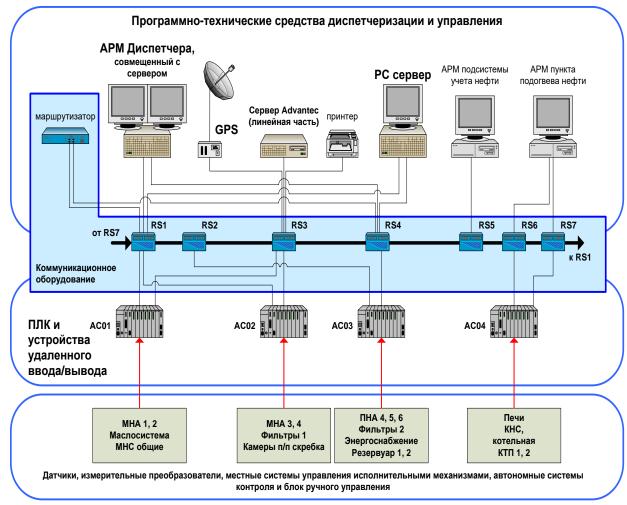


Рис. 3. Структурная схема АСУ ТП ГНПС

Принятая концепция построения структуры комплекса ПТС предусматривает применение открытых международных стандартов для всех уровней ІТ-взаимодействия компонентов СА. Таким образом, обеспечивается будущее расширение и модернизация АСУ ТП.

Принятая концепция построения структуры комплекса ПТС определяет взаимосвязь между устройствами и уровнями ПТК с максимально возможным

приближением к функционально-групповому принципу построения технологического объекта управления (ТОУ).

Структурная схема технических средств АСУ ТП ГНПС разработана по принципам многоуровневой, иерархической информационно-управляющей системы и имеет 3 уровневую иерархию:ПТС диспетчеризации и управления; ПЛК AC800F и устройства удаленного ввода/вывода S800 и Датчики, измерительные преобразователи, местные САУ исполнительными механизмами, автономные системы контроля и блок ручного управления.

Структура реализована в виде распределенной по технологическим объектам системы, с целью образования локальных децентрализованных структур.

ПТС на уровне ДП ГНПС могут функционировать в автоматизированных режимах: в полном составе; с включением резервных элементов системы и не в полном составе.

Первый режим является основным, два последних — резервными для обеспечения живучести системы при возникновении внештатных или аварийных ситуаций. Для повышения надежности задачи диагностики комплекса ПТС выполняются на всех уровнях с использованием функций самодиагностики. На уровне контроллеров формируются диагностические признаки состояния, измерительных каналов, модулей \$800, источников питания. На уровне сервера SCADA диагностируются состояния контроллера и сети Ethernet.

Аппаратура системы диагностируется автоматически в процессе работы. При необходимости может быть организован режим контроля системы для более глубокой диагностики, в этом случае контроль должен запускаться оператором с рабочих мест системы. Данные о неисправности аппаратуры вводятся в базу данных, и отображаются на экране с указанием отказавшего узла системы с точностью до блока и регистрируются в протоколе событий.

В АСУ ТП ГНПС реализованы функции: коммуникационные, информационные, дистанционного управления, формирования отчетов, настройки компонент АСУ ТП.

В число автоматизируемых ТОУ входят СПН, предназначенные для подогрева транспортируемой высоковязкой нефти. При перекачке с подогревом СА должна обеспечивать выполнение соответствующих расчетов и определение условий работы нефтепровода с наименьшим энергопотреблением и поддержание оптимального режима эксплуатации. При этом осуществляется контроль за состоянием с дистанционным управлением печами подогрева, задвижками технологических нефтепроводов, системой внутренней циркуляцией нефти, системой топлив обеспечения горелок печей, системой станционного пожаротушения.

САУ обеспечивают автоматические защиты от недопустимых режимов работы ТП, в т.ч. защиту от перелива нефти в резервуары при достижении в них максимального (аварийного) уровня нефти и переключение потока нефти в специально выделенные емкости.

Одной из важной составляющей внедряемой SCADA является возможность обнаружения утечек (СОУ) для определения дефектов, возникших под влиянием природных факторов или хищений из нефтепровода и позволяющая исключить или значительно сократить катастрофические экологические последствия.

Выводы

Таким образом, комплекс проектных работ ПО созданию АСУ ТΠ нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов, проходящих территории Республики Казахстан, позволил создать интегрированную систему диспетчерского контроля и управления трубопроводами и технологическими объектами. Проектные решения позволили обеспечить выполнение современных требований к созданию подобных больших автоматизированных систем: функциональность, надежность, устойчивость, однородность, совместимость.

Библиографический список

- 1. Крюков О.В., Мещеряков В.Н. Электрооборудование систем электроснабжения автономных объектов нефтегазопроводов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2020. №7. С. 28-36.
- 2. Васенин А.Б., Крюков О.В. Средства оптимизации управления электроприводов магистральных газопроводов // В сборнике: Труды XVII Международной конференции "Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические Компоненты". 2018. С. 180-183.
- 3. Крюков О.В., Серебряков А.В. Экологические направления электроснабжения и задачи энергосбережения при реконструкции объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. № 8. С. 23-33.
- 4. Крюков О.В. Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей ГПА // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С. 14-19.
- 5. Khlynin A.S., Kryukov O.V., Stepanov S.E. Energy optimization of gas compressor units electric drives // Вкниге: Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. ТрудыМКЭЭЭ-2016. 2016. С. 137-139.
- 6. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.
- 7. Крюков О.В. Современные системы электроснабжения с энергетическими установками вдольтрассовых потребителей газопроводов // В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей XXXII региональной научно-технической конференции, посвященной 75-летию проф. С.В. Хватова. НижнийНовгород, 2013. С. 61-69.
- 8. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.
- 9. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 10. VaseninA.B., KryukovO.V., SerebryakovA.V. Adaptivecontrolalgorithmsofautonomousgeneratorcomplexes // В книге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.
- 11. Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 12. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТКподредакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 13. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. T. 90. № 7. C. 473-478.
- 14. Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В. Электроприводы на основе машины двойного питания и асинхронного вентильного каскада с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.
- 15. Крюков О.В. Оптимальное управление технологическим процессом магистрального транспорта газа // В сборнике: XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институтпроблемуправленияим. В.А. ТрапезниковаРАН. 2014. С.4602-4613.

- 16. Kryukov O.V., Blagodarov D.A., Dulnev N.N., Safonov Y.M., Fedortsov N.N. Intelligent control of electric machine drive systems // Всборнике: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 Conference Proceedings 10. 2018. C. 8571670.
- 17. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 18. Степанов С.Е., Крюков О.В. Опыт комплексной автоматизации объектов магистрального газопровода "ЯМАЛ-ЕВРОПА" // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2018 XXIV МНТК к 100-летию Нижегородской радиолаборатории. 2018. С. 732-738.
- 19. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.
- 20. Воронков В.И., Рубцова И.Е., Крюков О.В. Электроснабжение и электрооборудование линейных потребителей МГ // Газовая промышленность. 2010. № 3. С. 32-37.
- 21. Крюков О.В. Моделирование и микропроцессорная реализация электромеханических систем // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. №3. С. 55-61.
- 22. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 23. Хлынин А.С., Степанов С.Е., Крюков О.В. Нейронные сити мониторинга и прогнозирования технического состояния электропривода ГПА // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2020 XXVI МНТК. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 331-338.

E. V. Bychkov¹, V. G. Titov¹, O. V. Kryukov² AUTOMATION SYSTEM FOR FUEL AND ENERGY COMPLEX FACILITIES AND OIL TRUNK PIPELINES

¹ Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev, ²LLC "TSN-electro", Nizhny Novgorod

The paper presents the results of creating computer-aided dispatch and control of technological objects pipelines as part of a complex of works on the design of the system of main oil pipelines of the Republic of Kazakhstan. Innovative solutions that provide automatic control of all objects of oil pumping stations, increase the level of safety and energy efficiency of the operation of oil pipelines and ensure the quality of transported petroleum products are considered. A description of the features of the functioning of the block diagram of the automated control system for the technological process of oil transportation based on the concept of open international standards at all levels of IT interaction of components is proposed.

Keywords: automated control system, monitoring, control, main pipeline, oil pumping station.

А.С. ВОЛКОВ, В.В. ГРУЗДЕВ, О.В. КРЮКОВ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

Рассмотрены принципы формирования достоверных и надежных систем технической диагностики и прогнозирования трансформаторов распределительных устройств подстанций. Представлены теоретически обоснованные процедуры синтеза алгоритмов прогнозирования технического состояния распределительных устройств. Приведены примеры реализации методологии превентивного прогноза параметров трансформатора на одной из цифровых подстанций.

Ключевые слова: техническая диагностика, оперативное прогнозирование, техническое состояние, трансформатор, распределительное устройство, обслуживание по фактическому состоянию, алгоритм, диагностическая экспертная система.

Введение

В настоящее время все электроэнергетические системы (ЭЭС) с трансформаторными подстанциями (ТП) на различных объектах ТЭК относятся к промышленным объектам повышенной опасности [1-4] и независимо от режимов работы комплектных распределительных устройств (КРУ) с каждым годом федеральными и отраслевыми нормативно-техническими документами ужесточаются требования обеспечения повышенной надежности и безаварийности работы всего оборудования[5-8]. Это обусловлено не только объективными причинами (устаревшее оборудование, ненадежное электроснабжение и т.п.), но и нередко наличием неквалифицированного обслуживания и попыток внешнего проникновения. Особенно это актуально в связи с внедрением цифровых и интеллектуальных подстанций (рис. 1)[9-12].



Рис. 1. Комплектная трансформаторная подстанция в утепленной оболочке из сэндвич-панелей

В системах оперативного мониторинга технического состояния (TC) ответственных агрегатов ЭЭС наиболее эффективной процедурой является не традиционное диагностирование трансформаторов КРУ ТП, а достоверное прогнозирование их ТС с оценкой остаточного ресурса агрегата [13-16]. Это позволяет предотвратить внезапные нештатные аварии и перейти от планово-предупредительных процедур технического обслуживания и ремонта (ТОиР) к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования [17-20]. Методологический подход здесь может быть единым для любого электротехнического, электромеханического и электроэнергетического оборудования, технологических установок и систем [21-24].

Общий принцип управления техническим состоянием на основе прогнозирования состояния ТП состоит в том, что данные о состоянии объекта снимаются с датчиков и подаются на подсистему прогнозирования технического состояния.

В случае если формируется решение о наступающем отказе, то подсистема ТОиР выполняет действия, которые направлены на:

предотвращение отказов, включая комплекс мероприятий по обеспечению функционирования системы без прерывания;

минимизацию последствий отказа за счёт подготовки к ожидаемому отказу, что позволяет сократить время ремонта, а, следовательно, и продолжительность неработоспособного состояния.

Известно множество методов, которые основываются на определении объективных закономерностей развития дефектов и повреждений, статистической обработке данных, экстраполяции трендов до предельно допустимых значений и на вероятностной оценке значений показателей.

Методология систем прогнозирования технического состояния трансформаторов КРУ

В подсистеме прогнозирования определяется вероятность наступления отказа на рассматриваемом интервале времени. В условиях априорной неопределенности в решающем правиле используется оценка, которая находится в результате структурнопараметрического синтеза (обучения) предиктора на основе эмпирических данных, составляющих обучающую выборку. Решение о формировании сигнала-предупреждения о наступающем отказе выносится в результате сравнения с пороговым значением найденной вероятности наступления отказа на заданном интервале. Определение этого значения представляет отдельную задачу и связано с используемым критерием, который определяет эффективность прогнозов.

Применение прогнозирующего контроля направлено на сокращение издержек, вызванных простоем технического объекта. Поэтому эффект от внедрения прогнозирующего контроля можно оценить с помощью коэффициента технического использовапрогнозирующего ния. Эффект OT применения контроля охарактеризуем величинойкоторая показывает, во сколько раз изменяется среднее время неработоспособного состояния технического объекта. Эффект от применения прогнозирующего управления техническим состоянием КРУ возрастает по мере уменьшения неотрицательной величины. Для проведения анализа эффективности применения процедур прогнозирования в составе системы управления техническим состоянием, охарактеризуем подсистему ТОиР вероятностью возникновения (не предотвращения) отказа при условии правильного предсказания и вероятностью привнесения отказа, при условии ошибочного предсказания (ложной тревоги).

Подсистема прогнозирования отказов может быть охарактеризована вероятностью ложной тревоги (ошибки первого рода) и вероятностью пропуска наступающего неисправного состояния технического объекта (ошибки второго рода). Если выполненные превентивные действия при правильном предсказании не позволили предотвратить отказ, то, как правило, устранение отказа выполняется за меньшее время.

Эффективность прогнозирования технического состояния возрастает для идеальной подсистемы ТОиР. При этом все правильно предсказанные отказы предотвращаются, а обработка ложных тревог не приводит к дополнительному простою. В этом случае величина выигрыша полностью определяется вероятностью пропуска при прогнозировании отказа.

Достоинство применения прогнозирования технического состояния КРУ возрастает при высокой точности прогнозирования. Целевая функция представляет собой взвешенную сумму вероятностей ошибок первого и второго рода и по своей структуре близка к выражению для среднего риска.

Эффект от перехода к прогнозированию технического состояния КРУ

Выигрыш от применения прогнозирования уменьшается, при уменьшении априорной вероятности отказа на анализируемом интервале времени. При этом повышаются требования к точности прогнозирования. В то же время при использовании оптимального решающего правила не происходит снижения эффективности по отношению к системе ТОиР без прогнозирования технического состоянияи определяется датчиками

регистрации состояния цифровой ТП (рис. 3).

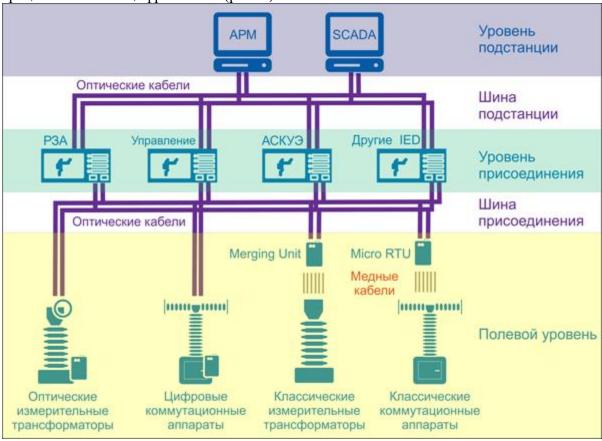


Рис. 3. Датчики регистрации состояния цифровой ТП

В общем случае информация о состоянии технического объекта может быть получена на основе обработки показаний интеллектуальных датчиков или результатов тестов. В случае использования вероятностной модели сложной системы элементарное действие по сбору информации заключается в определении значения одной из переменных. Такие действия характеризуются определенной стоимостью, представляющей затраты на проведение теста и ценностью. Однако на момент вынесения решения о целесообразности проведения некоторого теста его результат является неизвестным. Поэтому ожидаемый эффект от проведения теста определяются с использованием усреднения по множеству возможных исходов.

Проведение теста позволяет получить дополнительную информацию о состоянии технического объекта и, следовательно, приводит к меньшим значениям по сравнению с величиной, обеспечиваемой при использовании показаний датчиков.Сопоставляя сокращение издержек, вызванных простоем оборудования и стоимость теста можно определить ценность теста. Проведение дополнительных тестов завершается, если для любого из тестов их стоимость превышает ценность получаемой информации.

Алгоритм системы принятия решений по прогнозированию ТС ТП

Процедуру принятия решений о проведении процедур ТОиР представим с помощью сети принятия решений, которая содержит три типа вершин, и может рассматриваться как расширение байесовской сети.

Для упрощения используют сеть принятия решений, соответствующую единственному тесту. Вершины жеребьевки, обозначенные овалами, как и в байесовских сетях, представляют переменные (случайные величины). Вершины принятия решений (прямоугольники) представляют возможность лицу, принимающему решение выбрать одно из доступных действий на основе рассчитываемых значений целевой функции. В сетях принятия решений, основанных на критерии минимума среднего риска, вершины, обозначенные ромбами, содержат значения элементов матрицы потерь. В рамках развиваемого подхода последствия ошибочных решений и, соответственно, значения целевой функций зависят от характеристик подсистемы ТОиР.

В качестве примера возможного применения развиваемого подхода для управления техническим состоянием рассмотрим систему трансформаторной подстанции, информация о состоянии силового трансформатора которой регистрируется датчиками (рис. 4).

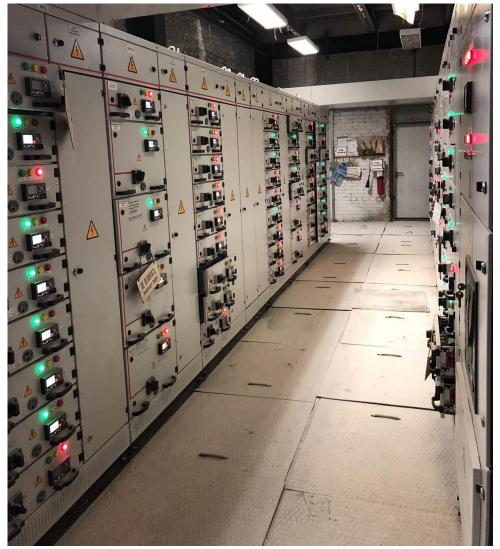


Рис. 4. Мониторинг КРУ ТП на оборудовании «Каскад»

Выделим три состояния такой технической системы: исправное, предотказноеи неработоспособное. Если выносится решение, что система исправна, то действия по управлению состоянием системы не предпринимаются и функционирование системы продолжается.

В предотказном состоянии ДЛЯ предотвращения перехода системы неработоспособное состояние выполняется автоматическое отключение с последующим восстановлением исправного состояния. При наличии существенной неопределенности относительно состояния системы может быть вынесено решение о проведение теста, результаты которого позволяют существенно повысить достоверность определения состояния системы. Реализация функций данных возможна щитовом электрооборудовании «КРУ – Каскад» (рис. 4).

Выводы

Достоверное прогнозирование технического состояния особо ответственных технологических агрегатов с оценкой остаточного ресурса позволяет заблаговременно предотвратить внезапные нештатные аварии на объектах повышенной опасности и перейти от планово-предупредительных ТОиР к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования со значительным экономическим эффектом.

В общем случае информация о техническом состоянии трансформаторных агрегатов КРУ ТП получается на основе обработки показаний интеллектуальных датчиков и результатов тестов. При этом выигрыш от применения процедур прогнозирования

увеличивается, при росте априорной вероятности отказов на анализируемом интервале времени и повышении требований к точности прогнозирования.

Библиографический список

- 1. Репин Д.Г., Крюков О.В. Концепты системы мониторинга технического состояния компрессорных станций // Контроль. Диагностика. 2017. № 12. С. 30-35.
- 2. Крюков О.В., Серебряков А.В., Макриденко Л.А., Волков С.Н., Сарычев А.П., Кобельков Н.О. Мониторинг и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики // М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». 2017.
- 3. Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 4. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.
- 5. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.
- 6. Крюков О.В. Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей ГПА // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С. 14-19.
- 7. Крюков О.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б. Поддержка диспетчерских решений ГТС на базе оценки их энергоэффективности // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 4 (80). С. 71-81.
- 8. Вожаков А.В., Крюков О.В., Лисин Н.Г. О причинах недостаточно эффективного построения и эксплуатации систем автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2012. № 2. С. 38-47.
- 9. Крюков О.В. Система оперативно-диспетчерского управления подстанциями цехов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 1. С. 43-45.
- 10. Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В. Расширение функциональных возможностей автоматизации и мониторинга распределительных устройств КТП «Каскад» // Автоматизация и ІТ в энергетике. 2020. № 12. С. 26-31.
- 11. Реализованные проекты ООО «ТСН-электро». Режим доступа: https://www.tcn-nn.ru/
- 12. KryukovO.V., BlagodarovD.A., DulnevN.N., al. Intelligent control of electric machine drive systems // В сборнике: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 Conference Proceedings 10. 2018. C. 8571670.
- 13. Степанов С.Е., Крюков О.В. Выбор методов мониторинга и прогнозирования технического состояния автоматизированных электроприводов энергетических объектов // Контроль. Диагностика. 2018. № 11. С. 32-39.
- 14. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 15. VaseninA.B., KryukovO.V., SerebryakovA.V. Adaptivecontrolalgorithmsofautonomousgeneratorcomplexes // В книге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.
- 16. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 17. Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В. Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.

- 18. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 19. Бычков Е.В., Крюков О.В. Теоретические и аппаратные возможности перехода на обслуживание по фактическому состоянию // В сб.: Информационные системы и технологии ИСТ-2018. Мат. XXIV МНТК к 100-летию Нижегородской радиолаборатории. 2018. С. 661-667.
- 1. 20.Крюков О.В. Прогнозирование теплового режима двигателей СТД-12500 методом спектрального анализа // В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики XXXII региональной НТК, посвященной 75-летию проф. С.В. Хватова. Н. Новгород, 2013. С. 140-146.
- 2. 21.Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК под редакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 20. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.
- 21. Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В. Электроприводы на основе машины двойного питания и асинхронного вентильного каскада с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.
- 22. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. T. 90. № 7. C. 473-478.

A. S. Volkov, V. V. Gruzdev, O. V. Kryukov FORECASTING OF THE TECHNICAL CONDITION OF TRANSFORMERS OF SWITCHGEARS

TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod

The principles of forming reliable and reliable systems of technical diagnostics and forecasting of substation switchgear transformers are considered. Theoretically justified procedures for the synthesis of algorithms for predicting the technical condition of switchgear are presented. Examples of the implementation of the methodology of preventive prediction of transformer parameters at one of the digital substations are given.

Keywords: technical diagnostics, operational forecasting, technical condition, transformer, switchgear, maintenance according to the actual condition, algorithm, diagnostic expert system.

УДК 621.316

А.Б. КОНОНЕНКО, А.А. КОСОРОТОВ, О.В. КРЮКОВ МОНИТОРИНГ КТП «КАСКАД» ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

Рассмотрены перспективы внедрения новых технологий технического обслуживания для расширения функциональных возможностей и надежности работы комплектных трансформаторных подстанций. Предложены инновационные функции мониторинга и интеллектуального управления автоматизированными системами автоматического ввода резерва распределительных устройств в рамках концепции цифровых подстанций. Приведены примеры новых функций системы комплектных распределительных устройств НКУ «Каскад»на базе контроллеров НМІ с использованием веб-технологий.

Ключевые слова: цифровая подстанция, распределительное устройство, автоматический ввод резерва, техническое обслуживание, интеллектуализация.

Введение

В настоящее время на предприятиях, эксплуатирующих электротехнические шкафы комплектных распределительных устройств (КРУ), распространен способ планового обслуживания электрооборудования (ППР). При этом вне зависимости от реального состояния отдельных элементов и систем электрооборудования оно в установленном плановом порядке выводится из эксплуатации, снижая техникоэкономические показатели. Сегодня подобная технология технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электроэнергических систем является затратной и не обеспечивает адекватную достоверную оценку состояния и остаточного ресурса электрооборудования [1-3].Для повышения надежности, безопасности и энергоэффективности эксплуатации электротехнического оборудования КРУ необходима комплексная система оперативного мониторинга и прогнозирования технического состояния, интегрированная в АСУ ТП цифровой подстанции (ЦТП) в режиме "on-line" [4-6]. Подобная технология ТОиР по фактическому состоянию электрооборудования позволяет за счет постоянного контроля основных (критических) параметров и обработки их в соответствии с интеллектуальными алгоритмами прогнозирования остаточного ресурса выдавать эксплуатационному персоналу превентивные данные о нарастании рисков неисправностей.

Для перехода от ППР электрооборудования КРУ ЦТП к ТОиР по фактическому состоянию требуется не только достоверное отслеживание текущего состояния всего комплекса коммутационных и измерительных аппаратов, установленных внутри шкафов КРУ, но и оперативно информировать операторов о необходимости проведения регламентных профилактических работ конкретных узлов. Это обуславливает поиск инновационных технологий на основе интеллектуализации всех составляющих, включая современные низковольтные (0,4 и 0,69 кВ) КРУ ЦТП [7-9]. Активное внедрение в энергетику сетевых технологий и увеличение доступности средств автоматизации связано с применением программируемых контроллеров и человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) или *Нитап-MachineInterface*, *НМІ*.

Основным компонентом автоматизации КРУ является система автоматического ввода резерва (ABP). Главным интеллектуальным центром ее является контроллер ABP, который представляет собой специализированный блок (например, БМРЗ-0,4 [10]) или систему свободно программируемых устройств (например, ПР [11,12] или ПЛК [13,14]).

Уровни интеллектуализации КРУ

Применение специализированных блоков ABP таких как БМРЗ-0,4, OptiSave или LovatoATL сопряжено с определенными трудностями:

- в случае с блоками БМРЗ-0,4 это высокие стоимость и сложность интеграции;
- в случае с более простыми блоками отсутствие достаточно гибкой настройки конкретные задачи, трудности в случае расширения функциональных возможностей вследствие невозможности вносить изменения в алгоритмы работы данных устройств. Кроме того, при повреждении входа или выхода устройства необходимо менять его целиком.

Использование программируемых реле (ПР) позволяет реализовывать логику работы под каждую конкретную задачу, причем достаточно простыми программными средствами. Также при наличии резерва, можно перепрограммировать входы/выходы ПР в случае выхода их из строя. Практически все подобные ПР имеют на борту коммуникационные интерфейсы (SiemensLogo, OBEH ПР200) или коммуникационные модули расширения (ZelioLogic) для передачи данных в системы диспетчеризации. НоПР подходят лишь для молой мощности.

Применение современных промышленных контроллеров среднего уровня автоматизации (серия ПЛК210 «ОВЕН», М241, М251, М262 «Schneider Electric», Siemens S7-1200, WAGOPF C200) позволяет существенно расширить возможности системы ABP РУ. Обладая достаточно серьезной производительностью, данные контроллеры берут на себя помимо задач непосредственно ABP еще и задачи организации телеизмерения и телеуправления, фиксации аварийных событий, а также взаимодействие с пользователем посредством НМІ. Именно такая перспективная идеология применена в системе автоматизированного мониторинга и диагностики КРУ «Каскад» от компании «ТСН-электро» [15].

Описание системы мониторинга и управления «КРУ-Каскад»

Конструктивно КРУ представляет собой программно-аппаратный комплекс (рис. 1), обеспечивающий мониторинг основных технологических параметров ЦТП, управление аппаратами главных цепей и предоставление рекомендаций о необходимости ТОиР для оборудования в КРУ.

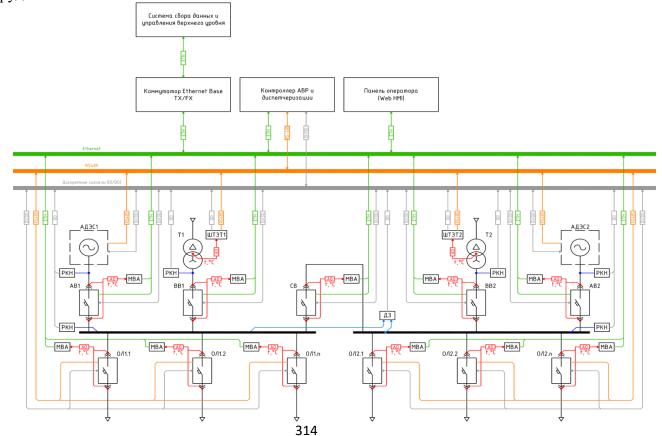


Рис. 1. Структурная схема системы диспетчеризации НКУ РУ «Каскад»

Система устанавливается в каждый шкаф КРУ с вакуумным выключателем и управлением от отечественного ПЛК с сенсорным цветным графическим экраном, обеспечивая непрерывную проверку технического состояния оборудования шкафа. Совокупные функциональные возможности КРУ «Каскад» обеспечивают адекватное оповещение персонала о необходимости профилактического ТОиР оборудования. Данное КРУ представляет собой две секции шин, к которым подключены автоматические выключатели (АВ) отходящих линий (ОЛ). Секции питаются либо от ввода через силовой трансформатор (Т1, Т2), либо от автоматизированных дизельных электрических станций (АДЭС1, АДЭС2). Защиту вводов осуществляют АВ типа ВВ1 и ВВ2 (для вводов от трансформаторов) и АВ1, АВ2 (для вводов от АДЭС). Секционирование происходит выключателем СВ. Контроль нормального напряжения осуществляют реле контроля напряжения (РКН), которые расположены на вводах и секции шин. Дополнительно на секциях шин предусмотрены устройства дуговой защиты для оперативного отключения питания на секции шин при возникновении дуги. Защиту трансформаторов осуществляют устройства тепловой защиты ШТЗТ1 и ШТЗТ2. Для осуществления контроля температуры контактных автоматических выключателей применяются соединений датчики температуры, которые подключены к аналоговым модулям ввода (МВА).

Данные о состоянии электрооборудования РУ поступают в контроллер ABP и диспетчеризации [16-18]. Для этого используются различные каналы передачи информации:

- 1. Дискретные сигналы состояния (состояние коммутационных аппаратов, РКН, блока ДЗ, аварийная температура трансформатора, состояние АДЭС и т.д.) и управления (включение, отключение автоматических выключателей, пуск и останов АДЭС).
- 2. Интерфейс RS-485 (температура обмоток трансформатора, измерения с электронных расцепителей аппаратов отходящих линий, дополнительная информация от АДЭС).
- 3. Интерфейс Ethernet (данные с электронных расцепителей вводных и секционного автоматов, температура контактных соединений от блоков аналогового ввода) [19].

Для взаимодействия с пользователем (визуализация и изменение параметров работы системы) используется панель оператора, которая подключена к контроллеру посредством Ethernet. Для связи с системой верхнего уровня может быть установлен коммутатор (маршрутизатор) с поддержкой интерфейса Ethernet, BaseTX, так и BaseFX (оптический канал).

Функциональные особенности системы. Главными приоритетными преимуществами новой системы НКУ «Каскад» является комплекс инновационных функций, которые дают синергетический эффект от применения КТП:

Визуализация данных на НМІ при помощи веб-технологий. Состояние электрооборудования наглядно отображается на мнемосхеме (рис. 2).

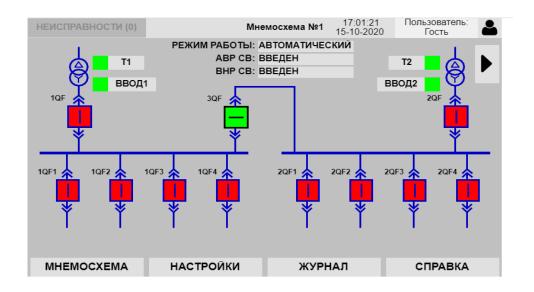


Рис. 2. Мнемосхема РУ-0,4 кВ

При этом можно отслеживать состояние и положение коммутационных аппаратов распределительного устройства, состояние трансформаторов (температура и срабатывание защиты), наличие нормального напряжения на вводах и секциях шин, а также наличие и количество текущих неисправностей. НМІ разработан с применением веб-интерфейса и доступен как с панели оператора на самом распредустройстве так и может быть отображен удаленно на ПК с любым веб-браузером с поддержкой HTML5, что позволяет проводить работы с контроллером даже при отключенной или же неисправной панели оператора.

▶ Реализация различных алгоритмов системы автоматического ввода резерва под существующие схемы энергоснабжения. Опираясь на многолетний опыт изготовления и внедрения КТП с системами АВР авторами проработаны алгоритмы, которые учитывают различные ситуации, схемы аварийного ввода резерва и автоматического возврата нормального режима. Гибкие настройки позволяют адаптировать ПОконтроллера АВР посредством установки режимов подключения, отключения и переключения основных и резервных вводов, режимов пуска и останова АДЭС, а также определения реакции блока АВР на выявление неисправностей (рис. 3). Все это позволяет с минимальными временными затратами корректировать алгоритм работы под конкретные нужды эксплуатационного персонала.



Рис. 3. Настройки АВР

➤ Контроль температуры контактных соединений. Система диагностики КТП «Каскад» может комплектоваться датчиками температуры, которые устанавливаются на

места контактных соединений коммутационных аппаратов, с целью диагностики их состояния. Датчики подключаются к контроллеру, который оценивает абсолютное значение и изменения температуры, и в случае превышения критических параметров, рассчитывает время до отключения коммутационного аппарата. Пороги уровней температуры задаются в настройках.

 \blacktriangleright Журналы текущих неисправностей и журнал событий. Контроллер системы диагностики отслеживает и записывает во внутреннюю энергонезависимую память все события, связанные с изменением состояния электрооборудования и настроек системы (рис. 4, a и δ).

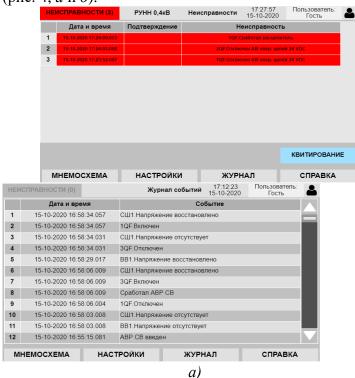


Рис. 4. Список (журнал) неисправностей (событий)

 δ

Каждому событию присваивается метка времени с точной привязанной ко времени скана контроллера. В отличие от журналов, основанных на базе стандартных НМІ, подобная реализация с высокой точностью отслеживает последовательность событий до аварии.

- ➤ Самодиагностика алгоритма ABP и выявление неявных неисправностей. В некоторых случаях может произойти ситуация при которой, контроллер ABP не выявил явных неисправностей оборудования, однако алгоритм отрабатывает некорректно или не полностью («зависает» на полпути). Это может быть, если на контроллер не приходит сигнал, который обычно был. Поэтому реализована возможность просмотра каких же условий.
- *▶* Переназначение входов и выходов контроллера. В случае выявления неисправности входа или выхода контроллера имеется возможность переназначения неисправного канала на неиспользуемый (резервный) вход или выход (рис. 5). Это позволяет оперативно исправлять подобные неисправности без перепрограммирования контроллера.



Рис. 5. Переназначение входов и выходов

- *▶ Разграничение прав пользователей.* Для ограничения доступа к настройкам системы диагностики предусмотрена система прав пользователей по категориям.
- № Интеграция в системы верхнего уровня по различным протоколам связи. Система диагностики «Каскад» поддерживает передачу данных по протоколам связи ModBusRTU, ModBusTCP [20], МЭК 60870-5-104 [21], МЭК 60870-5-101 [22], МЭК 61850-8-1 (ММЅ) [23] в зависимости от выбранной платформы ПЛК. Также контроллер может служить концентратором данных и преобразователем протоколов, собирая данные от других устройств подстанции, а также от устройств тепловой защиты трансформаторов.
- *Применение стандартизированной среды разработки*. Для разработки и отладки программного обеспечения системы диагностики «Каскад» используются ПОна базе системы программирования для ПЛК CODESYS 3.5 с использованием языков программирования описанных стандартом МЭК 61131-3 [24] единой среды разработки.

Таким образом, основными преимуществами системы «КРУ-Каскад» являются:

- Наглядное представление информации о техническом состоянии аппаратов КРУ.
- Повышение надежности работы всего коммутационного оборудования и сокращение расходов эксплуатации за счет непрерывного контроля технического состояния.
- Переход от планового ТОиР к обслуживанию по фактическому состоянию.
- Доступ к документации по регламенту ТОиР и руководствам по эксплуатации.
- Интеграция в Единую систему диспетчеризации ЦТП по ModbusRTU/TCP.

Выводы

Внедрение системы диагностики «КРУ-Каскад» позволяет перейти к ТОиР по фактическому состоянию электрооборудования и продлить срок службы электрооборудования ЦТП за счет предупреждения аварийных ситуаций путем своевременной реакции на них. Кроме того, облегчается поиск причин неполадок (явных и скрытых) персоналом, упрощается наладка и ввод в строй. Широкие коммуникационные возможности позволяют интегрировать систему диагностики в комплекс управления производством предприятия.

Библиографический список

- 1. Стратегия развития электросетевого комплекса РФ: Утв. распоряжением Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 511-р: в ред. постановления Правительства РФ от 29 ноября 2017 г. № 2664-р // Собр. законодательства РФ. 2017. № 49. С. 21027-21029.
- 2. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 3. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.

- 4. Программа инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016-2020 годы с перспективой до 2025 года. [Электронный ресурс] М.: ФСК ЕЭС. 2016. Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/2_2016_PIR_FSK-2016-2020-2025.pdf .
- 5. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 6. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.
- 7. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активноадаптивной сетью. [Электронный ресурс] М.: ФСК ЕЭС. 2012. Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf .
- 8. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 1. 9.Vasenin A.B., Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Adaptive control algorithms of autonomous generator complexes // Вкниге: Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. Труды МКЭЭЭ-2016. М.: МЭИ (ТУ). 2016. С. 133-135.
- 9. Принципиальные электрические схемы защиты и автоматики присоединений 0,4 кВ для КТП-10(6)/0,4 на постоянном оперативном токе, выполненных с применением блоков серии БМР3-0,4. ТИ-031-2018. Электронный ресурс: https://www.mtrele.ru/files/project/albom_shem_zasch_i_avto_prisoed_04_pot_s_primeneniem_bmrz-04.pdf
- 10. Техническая коллекция SchneiderElectric. Выпуск № 18 Типовые схемы ABP с применением интеллектуального программируемого реле ZelioLogic. Электронный ресурс: http://www.netkom.by/docs/N18-Tipovye-shemy-AVR-s-primeneniem-Zelio-Logic.pdf
- 11. Щит автоматического ввода резерва ABP-3-11. Электронный ресурс: https://owen.ru/project/shhit-avtomaticheskogo-vvoda-rezerva-avr-3-11.
- 12. Типовое решение ABP. Электронный ресурс: https://schneider-electric.app.box.com/s/p25u8feunpu42fflpoi80mlg54cof641/file/308512304640
- 13. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок // Известия ТГУ. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.
- 14. Реализованные проекты ООО «ТСН-электро». Режим доступа: https://www.tcn-nn.ru/
- 15. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК под редакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 16. Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: Великие реки' 2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 17. Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В. Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.
- 18. Крюков О.В. Коммуникационная среда передачи данных сети ETHERNET на полевом уровне различных объектов // Автоматизация в промышленности. 2012. № 12. С. 26-30.
- 19. MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b3. Электронный ресурс:
 - 2. https://modbus.org/docs/Modbus Application Protocol V1 1b3.pdf.
- 20. ΓΟCT P MЭK 60870-5-104-2004. http://docs.cntd.ru/document/gost-r-mek-60870-5-104-2004.

- 21. ΓΟCT P MЭK 60870-5-101-2006. http://docs.cntd.ru/document/gost-r-mek-60870-5-101-2006.
- 24. ГОСТ Р МЭК 61850-7-1-2009. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 7. Базовая структура связи для подстанций и линейного оборудования. Раздел 1. Принципы и модели
 - 3. http://docs.cntd.ru/document/1200082215
- 25. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования http://docs.cntd.ru/document/1200135008 .

A. B. Kononenko, A. A. Kosorotov, O. V. Kryukov MONITORING OF KTP "CASCADE" FOR SUBSTATION MAINTENANCE ACCORDING TO THE ACTUAL CONDITION

TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod

The prospects for the introduction of new maintenance technologies to expand the functionality and reliability of complete transformer substations are considered. Innovative functions of monitoring and intelligent control of automated systems for automatic input of switchgear reserve within the framework of the digital substation concept are proposed. Examples of new functions of the system of complete switchgears of the NKU "Cascade" based on HMI controllers using web technologies are given.

Keywords: digital substation, switchgear, automatic reserve input, maintenance, intellectualization.

В.А. ИППОЛИТОВ, Д.В. ПРОСКУРЯКОВ, О.В. КРЮКОВ УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ К НАРУШЕНИЯМСИММЕТРИИ ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

Рассмотрены проблемы устойчивости автоматизированного электрооборудования по отношению к возмущениям в питающей сети как одному из наиболее вероятных видов возмущений. Проанализировано влияние данного вида возмущений на конкретном примере — высоковольтном регулируемом асинхронном электроприводе PowerFlex 7000. Предложены особенности реализации новых оригинальных технико-технологических решений функциональных возможностей электроприводных агрегатов с интеллектуальными системами управления и диагностики.

Ключевые слова: электрооборудование, электроприводной агрегат, системы электроснабжения, нарушения симметрии напряжений, устойчивость.

Введение

Возмущения в питающей энергосети оказывают существенное влияние на работу автоматизированных электроприводов (АЭП), вызывая необходимость применения сложных систем мониторинга [1-4]. Во многих случаях это влияние даже более существенно, чем влияние возмущений со стороны механизма и со стороны оператора — системы верхнего уровня иерархии [5-7]. На работу АЭП оказывают влияние отклонения модуля вектора напряжений, искажения напряжений, нарушение симметрии системы 3-фазных напряжений. Международным и отечественным стандартами в отношении качества питающих напряжений установлены нормально допустимые и предельные отклонения [8-11]. Предельные отклонения нормируются для вероятности 5 % при времени усреднения 24 час, что является на практике достаточно продолжительными отклонениями. Электропривод должен нормально работать с сохранением всех основных характеристик в условиях предельных отклонений. Однако в питающей сети возникают также аварийные отклонения.

Возможности АЭП в отношении устойчивости к аварийным отклонениям мало исследованы [12-14]. Поэтому уставки защит оборудования по отношению к питающей сети обычно недалеко выходят за рамки предельных отклонений, соответствующих стандартам, что зачастую приводит к неоправданному отключению оборудования и остановке технологического процесса. Нахождение допустимых границ уставок защит от возмущений питающей сети, при которых сохраняется работоспособность оборудования, — важная задача, которая поможет сократить потери, вызванные остановкой технологического процесса. В данной работе рассмотрен только один вид возмущения в питающей сети — нарушение симметрии питающего 3-фазного напряжения. Однако этот вид возмущений имеет наивысшую вероятность [15-17]. В этой связи актуальной задачей является разработка предложений в отношении показателей для оценки режимов при возмущении в сети с дальнейшим исследованием режимов на примере высоковольтного АЭП и выработке рекомендаций по выбору уставок защиты от нарушения симметрии.

Показатели для оценки режимов

Очевиден перечень показателей с убывающей приоритетностью:

- 1. Сохранение электропривода в работе.
- 2. Сохранение момента и скорости.
- 3. Сохранение в необходимых пределах пульсаций момента.
- 4. Сохранение в необходимых пределах искажений токов статора и токов, потребляемых от сети.

Рассмотрим векторный показатель искажения тока [18,19], наиболее полно учитывающий искажения. Для тока статора этот показатель определяется формулой:

$$I_{sD} = \sqrt{\frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} \left| \mathbf{i}_s(t) - \mathbf{i}_{F_s}(t) \right|^2 dt}.$$
 (1)

где T_M — время измерения, \mathbf{i}_s — изображающий вектор токов статора в системе координат, вращающейся синхронно, например, с полем двигателя, \mathbf{i}_{Fs} — фильтрованный вектор токов статора в этой же системе координат:

$$\mathbf{i}_{F_S}(t) = \frac{1}{1 + T_F p} \mathbf{i}_s(t). \tag{2}$$

Постоянная времени фильтра T_F также является одним из параметров измерения показателя искажения. Рассмотрим возмущения в сети, возникающие при однофазном (междуфазном) коротком замыкании на одном из ответвлений сети или при подключении к сети мощного двигателя с разрывом в цепи одной из фаз. Именно такой вид возмущений имеет наибольшую вероятность. Так в [11] указано, что 85 % провалов напряжения — именно такого вида. В таком режиме имеет место глубокий провал одного из линейных напряжений и некоторое снижение остальных линейных напряжений. Упрощенная расчётная схема и фазорная диаграмма представлены на рис. 1.

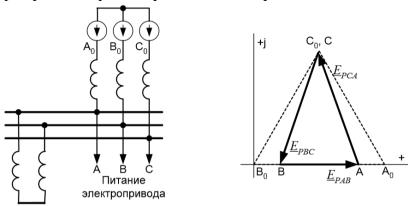


Рис. 1. Расчётная схема и фазорная диаграмма для нарушения симметрии

В данном режиме возникает напряжение обратной последовательности и несколько уменьшается напряжение прямой последовательности. Степень нарушения симметрии определяется относительным напряжением обратной последовательности U_{P2} / U_{PN} . Фазорная диаграмма рис. 1 не учитывает токов от регулируемого электропривода. Поэтому напряжения диаграммы могут рассматриваться как эквивалентные ЭДС трехфазного источника E_{PAB} , E_{PBC} , E_{PCA} , которым может быть представлена сеть по отношению к электроприводу.

Общая структура АЭП

В качестве примера исследован регулируемый асинхронный электропривод насоса, в состав которого входят: асинхронный двигатель и преобразовательно-регулирующее устройство (ПРУ) PowerFlex 7000 на основе инвертора тока с ШИМ, функциональная схема которого представлена на рис. 2.В состав ПРУ входят: мостовые преобразователи VUZL, VUZM на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов, конденсаторные батареи фильтров СL, СМ, сглаживающий реактор выпрямленного тока LD, трансформатор Т, устройство управления АС, а также элементы обратной связи по токам и напряжениям. Преобразователь VUZL преобразует входное напряжение в регулируемый выпрямленный ток; преобразователь VUZM преобразует выпрямленный ток в двуполярные пачки импульсов; высокочастотные составляющие этих пачек

фильтруются конденсаторной батареей СМ. Входные токи преобразователя VUZL также представляют собой двуполярные пачки импульсов; высокочастотные составляющие фильтруются батареей СL.

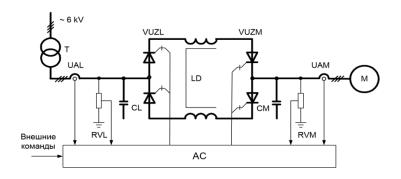


Рис. 2. Функциональная схема исследуемого электропривода

Воздействие нарушения симметрии питающих напряжений

Нарушение симметрии напряжений воздействует на данный АЭП по следующим направлениям:

- 1. В выпрямленном напряжении возникает дополнительная составляющая пульсаций с периодом, равным полупериоду питающих напряжений; соответственно увеличиваются пульсации выпрямленного тока. Это вызывает повышенное искажение токов статора и токов, потребляемых от сети, которое увеличивает пульсации момента.
- 2. При снижении линейных напряжений по расчётной схеме рис. 1 снижается постоянная составляющая выпрямленного напряжения. При достаточно высокой степени искажения сниженное выпрямленное напряжение не позволяет реализовать номинальный режим АЭП. САР снижает поток двигателя и уровень ограничения момента. Если АЭП работал с номинальной скоростью и полной нагрузкой, то при сильном искажении система снижает скорость электропривода.
- 3. Управление преобразователем VUZL синхронизировано с питающими напряжениями. При несовершенстве синхронизации и сильном нарушении симметрии питающих напряжений возможно нарушение синхронизации.

Параметры электропривода для нагрузки — насосе. Номинальные данные асинхронного двигателя: $1600~{\rm kBt}$, $1490~{\rm of/muh}$, $6~{\rm kB}$, $190~{\rm A}$, $50~{\rm \Gamma u}$. Электромеханическая постоянная времени электропривода $T_j=0.8~{\rm s}$. Относительные значения: постоянной составляющей момента нагрузки $M_{c0}=0.1$, квадратичной составляющей момента при базовой скорости $M_{c2}=0.7$.

Методика исследования на виртуальном стенде

Экспериментальное исследование выполнено на виртуальном испытательном стенде высоковольтных АЭП. В состав стенда входят шкаф управления серийного электропривода PowerFlex 7000 и компьютерная модель силовой части электропривода, работающая в реальном времени. Из шкафа управления в компьютерную модель поступают логические команды проводящего состояния для каждого плеча преобразователя частоты. Из модели в шкаф управления поступают аналоговые сигналы обратной связи по напряжениям и токам. В состав компьютерной модели входят модели механизма, двигателя, силовой части преобразовательного регулирующего устройства, питающей сети. Соответствие процессов стенда и реальных электроприводов было подтверждено многократно [20,21].

Все переменные и параметры, кроме времени и постоянных времени, представлены как относительные величины. В качестве базовых значений приняты:

- базовое напряжение амплитуда номинального фазного напряжения двигателя $U_{b} = U_{phNm}$;
 - базовый ток амплитуда номинального фазного тока двигателя $I_b = I_{Nm}$;
 - базовая угловая частота номинальная угловая частота двигателя $\Omega_b = \Omega_N$;
- базовая угловая скорость номинальная синхронная угловая скорость двигателя $\Omega_{MB} = \Omega_{MN}.$

Базовое значение тока трансформатора I_{Tb} связано с током I_b соотношением I_{Tb} / $I_b = U_N$ / U_{T2N} , где U_{T2N} — номинальное вторичное напряжение трансформатора. Следует отметить, что при выбранных базовых значениях номинальный момент двигателя не совпадает с базовым моментом. Относительное значение номинального момента в рассматриваемом примере составляет $M_N = 0.816$.

Результатыисследования статических режимов

Исследованы режимы при скорости электропривода в пределах v = 0.6-1 при искажении питающих напряжений в пределах E_{P2} / $U_{PN} = 0$ -0,16. Режимы при более сильном нарушении симметрии не рассматриваются: в таких случаях общее снижение линейных напряжений сети вызывает отключение электропривода защитой минимального напряжения с выдержкой времени 1-2 периода. На рис. 3, 4 в качестве примера представлены осциллограммы установившегося режима при скорости $v \approx 1$ и симметричном питании. Зарегистрированы переменные: i_D – выпрямленный ток, i_{FSA} – фазная компонента фильтрованного вектора тока статора, i_{sA} — фазный ток статора, M электромагнитный момент, $|\Delta i_T|$ — модуль отклонения вектора первичного тока трансформатора от фильтрованного вектора, $|\Delta i_s|$ — модуль отклонения вектора тока статора от фильтрованного вектора. По данным, представленным на рис. 4, рассчитаны среднеквадратичные отклонения векторов тока статора и трансформатора I_{SD} , I_{TD} , а также среднеквадратичные отклонения выпрямленного тока и момента от их средних значений $\Delta i_{D.RMS}$, ΔM_{RMS} . Время измерения составляет $T_M = 5$ с, число точек на этом интервале N =50000, постоянная времени для фильтров векторов тока $T_F = 1$ с. Такие же процессы, как представленный на рис. 4, зарегистрированы в указанных ранее диапазоне скорости и диапазоне нарушения симметрии питающих напряжений. В табл. 1 представлены результаты измерений для номинальной скорости $v \approx 1$.

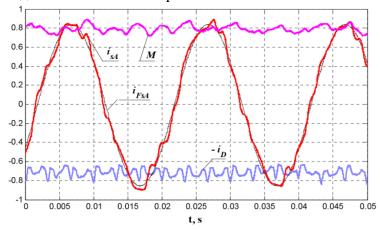


Рис. 3. Установившийся режим при симметричном питании

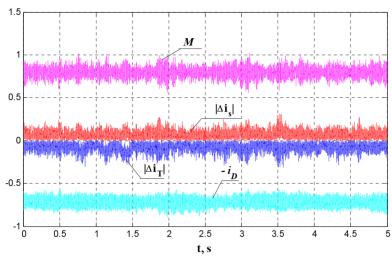


Рис. 4. Осциллограмма для расчёта среднеквадратичных отклонений

Таблица 1 Режимы электропривода при нарушении симметрии питающих напряжений

Показатели режима	Напряжение обратной последовательности			
	E_{P2} / U_{PN}			
	0	0.04	0.10	0.16
Среднее значение момента M_{av}	0.80	0.80	0.79	0.71
Среднеквадратичное отклонение	0.046	0.047	0.063	0.084
выпрямленного тока $\Delta i_{D.RMS}$				
Среднеквадратичное отклонение	0.099	0.106	0.179	0.230
вектора тока трансформатора I_{TD}				
Среднеквадратичное отклонение	0.091	0.094	0.126	0.155
вектора тока статора I_{sD}				
Среднеквадратичное отклонение	0.059	0.060	0.079	0.106
момента ΔM_{RMS}				

Измерения показывают, что режим с нарушением симметрии E_{P2} / $U_{PN}=0.04$, предельно допустимый по отечественному стандарту, практически не отличается от режима с симметричным питанием; АЭП может продолжительно работать в таком режиме. При увеличении напряжения обратной последовательности до значения E_{P2} / U_{PN} = 0.1 среднеквадратичное отклонение выпрямленного тока возрастает примерно в 1.35 раза. Примерно в таком же отношении возрастают среднеквадратичные отклонения вектора тока статора и момента. Среднеквадратичное отклонение вектора тока трансформатора возрастает в 2.3 раза. Электропривод сохраняет момент и скорость. Он в состоянии продолжать работу в течение достаточного времени, пока не восстановится нормальный режим системы электроснабжения. При значительно более сильном нарушении, при E_{P2} / $U_{PN}=0.16$, существенно нарастают искажения токов и момента. Однако под действием системы регулирования снижается скорость АЭП, что отражается в снижении среднего момента. Минимальное линейное напряжение сети в этом режиме составляет всего 68 % номинала. Этого недостаточно для поддержания номинальной скорости при номинальном магнитном потоке двигателя. Режим АЭП не является аварийным, однако он допустим лишь на несколько секунд. Работа АЭП при пониженной скорости имеют такие же особенности, но снижение скорости при повышенном искажении не происходит.

Рекомендации по уставкам защиты от нарушения симметрии.

По результатамисследований возможно задать уровень срабатывания защиты от нарушения симметрии, соответствующий напряжению обратной последовательности $U_2 = 0.1 \ U_{PN}$. Выдержка времени защиты может быть установлена в пределах $T_{UB} = 1-5$ с.

Выводы

Устойчивость электропривода по отношению к возмущениям в питающей сети является одной из важнейших характеристик. Однако данные по противодействию аварийным возмущениям не приводятся для высоковольтных АЭП большой мощности. АЭП может работать продолжительно при напряжении обратной последовательности в 2.5 раза превышающем предельно допустимое значение по ГОСТ. Результаты исследования позволяют изменить уставки соответствующей защиты электропривода и сохранять АЭП в работе при более сильных нарушениях, например, 3.15 МВт шахтных вентиляторов рудника.

Библиографический список

- 1. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 2. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.
- 3. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.
- 4. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 5. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК под редакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 6. Крюков О.В. Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей ГПА // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С. 14-19.
- 1. 7.Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В. Расширение функциональных возможностей автоматизации и мониторинга распределительных устройств КТП «Каскад» // Автоматизация и ІТ в энергетике. 2020. № 12. С. 26-31.
 - 7. Реализованные проекты ООО «ТСН-электро». Режим доступа: https://www.tcn-nn.ru/
- 8. International Standard IEC 61000-2-12. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2-12: Environment Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems. 2003.04.
- 9. ГОСТ 13109-1997. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (переиздание, январь 2002).
- 10. Power Quality Newsletter May 2007. Power Standards Lab., California, USA. http://www.powerstandards.com.
- 11. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 12. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. T. 90. N 7. C. 473-478.

- 2. 14.KryukovO.V., BlagodarovD.A., DulnevN.N., al. Intelligent control of electric machine drive systems // В сборнике: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 Conference Proceedings 10. 2018. C. 8571670.
- 3. 15. Крюков О.В. Опыт проектирования АСУ ТП нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 1. С. 2-7.
- 9. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // Всборнике: Proceedings 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. C. 444-449.
- 10. Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В. Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.
- 11. Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В. Электроприводы на основе машины двойного питания и асинхронного вентильного каскада с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.
- 12. Vasenin A.B., Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Adaptive control algorithm sofautonomous generator complexes // В книге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.
- 13. Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го Международного научно-промышленного форума. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 14. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.

V. A. Ippolitov, D. V. Proskuryakov, O. V. Kryukov STABILITY OF HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT TO SUPPLY VOLTAGE SYMMETRY VIOLATIONS

TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod

The problems of stability of automated electrical equipment in relation to disturbances in the supply network as one of the most likely types of disturbances are considered. The influence of this type of perturbation is analyzed on a specific example – a high-voltage regulated asynchronous electric drive PowerFlex 7000. The features of the implementation of new original technical and technological solutions of the functional capabilities of electric drive units with intelligent control and diagnostic systems are proposed.

Keywords: electrical equipment, electric drive unit, power supply systems, stress symmetry violations, stability.

А.Б. БУГРЕЗОВ, А.Е. ПУТЕРА, О.В. КРЮКОВ

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ТЭК

ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

Рассмотрены пути повышения искробезопасности ответственного электрооборудования, работающего в нефтегазовой, химической и перерабатывающей отраслях промышленности. Проведен анализ отечественной нормативной базы и международных стандартов в области защиты силового оборудования и измерительных цепей в части защиты от внешних и внутренних перенапряжений. Показана необходимость и даны рекомендации по использованию УЗИП в топливно-энергетическом и нефтегазовом комплексе.

Ключевые слова: искробезопасность, искрозащита, устройство защиты от импульсных перенапряжений, электроприводной газоперекачивающий агрегат.

Введение

Для современных энергетических предприятий важнейшей целью является не только производство продукции высокого качества, но и обеспечение надежной и безаварийной работы всех технологических цепочек на высоком технико-экономическом уровне, отвечающем современным требованиям промышленной безопасности [1-3].

Предприятия нефтегазового сектора, энергетической и горнодобывающей отраслей промышленности характеризуются наличием объектов повышенной опасности (ОПО), взрывоопасных зон, на которых требуется осуществлять непрерывный мониторинг [4-6] с прогнозированием технического состояния в среднесрочной перспективе [7,8]. Надежность и оперативность таких систем играют важнейшую роль в непрерывном производственном процессе, например компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов (МГ) [9-12]. Электрическая инфраструктура всех ОПО очень чувствительна к импульсным помехам, которые способны ограничить работоспособность промышленных установок и в целом производственных объектов по сетям питания и информационным каналам [13,14].

Устройства молниезащиты и защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) призваны обеспечить защиту таких ОПО КС, как электроприводной газоперекачивающий агрегат (ЭГПА) со сложной и дорогостоящей техникой, распределительные устройства (РУ) комплектных трансформаторных подстанций (КТП) различных классов напряжения(рис. 1), серверное и цифровое оборудование систем электроснабжения[15,16]. Для защиты оборудования и всей системы производства в целом и, в частности, предотвращения травм персонала, необходимо, чтобы концепция молниезащиты и защиты от импульсных перенапряжений предприятия отвечала всем действующим стандартам [17-21], что одинаково верно как для взрывоопасных производственных зон ОПО, так и для взрывобезопасных зон.

В настоящее время производимые ООО «ТСН-электро» НКУ предназначены для распределения электроэнергии трехфазного переменного тока напряжением до 690 В частотой 50 Гц в сетях с изолированной и глухозаземленнойнейтралью, для защиты линий при перегрузках и коротких замыканиях, а также для управления (регулирования, автоматики), измерения, сигнализации и защиты оборудования.

Новые системы НКУ типа «Каскад»могут применяться в качестве РУ во всех сферах энергопотребления, где требуется обеспечить ввод и распределение электрической энергии, в частности:в системе собственных нужд всех типов электростанций;для комплектования подстанций электрических сетей;для комплектования подстанций

перекачивающих станций нефтегазопроводов;в системах электроснабжения и автоматики промышленных предприятий и коммунальной сферы.



Рис. 1. Современное электротехническое оборудование НКУ «Каскад» для КТП

Принципы построения и нормативные документы по УЗИП

Для решения указанной задачи во взрывоопасных зонах каналы связи оборудуются искробезопасными цепями. Для сопряжения электрооборудования, расположенного во взрывоопасной зоне и вне ее, используются ограничительные устройства - барьеры искробезопасности, обеспечивающие искрозащиту электрических цепей датчиков, находящихся во взрывоопасной зоне. Устройства применяются в системах автоматического регулирования, сигнализации и аварийной защиты на взрыво, пожароопасных участках, где могут присутствовать взрывоопасные смеси газов, паров, а также легковоспламеняющиеся и взрывчатые вещества.

Безопасность в нефтегазовой, химической и перерабатывающей промышленности должна отвечать самым высоким требованиям. В частности, директива АТЕХ, и соответствующие отраслевые и международные стандарты включают многочисленные инструкции, которые должны быть скоординированы для практического применения. Для новых предприятий это реализуется еще на этапе планирования производства. Директива АТЕХ рассматривает оценку опасностей взрыва и возможных источников зажигания, в их числе помимо прочих упоминаются удары молний, коммутационные всплески и электростатические разряды. Эти же факторы указываются в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ 7). Устройства для защиты от импульсных перенапряжений, вызванные перечисленными факторами, регламентируются действующим стандартом МЭК 61643-1. В России данный стандарт издан в виде ГОСТ Р 51992-2002. Методы защиты от физических повреждений зданий и сооружений, вызванных грозовыми разрядами, регламентируются международным стандартом МЭК 62305. При этом само электрооборудование, установленное во взрывоопасной зоне должно соответствовать следующим стандартам:

• МЭК 60079-0 — Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред;

• МЭК 61241-10 — Электрооборудование для сред с горючей пылью.

Данные стандарты также гармонизированы со стандартами ГОСТ Р.

Оценка риска выполняется для того, чтобы определить необходимость в системе молниезащиты и выбрать защитные меры приемлемые и с технической, и экономической точек зрения. Система молниезащиты включает внешнюю систему молниезащиты, токоотводящие шины, систему заземления, а также внутреннюю защиту от импульсных перенапряжений. В стандарте МЭК 62305 обсуждается обширный перечень факторов с целью калькуляции возможных убытков, а так же чтобы найти пути их избежать и минимизировать риски. Концепция молниезащиты в целом и защита от импульсных перенапряжений в частности должна использоваться в обязательном порядке во взрывоопасном производстве, т.к. возможные последствия этих факторов становятся значительно более критичными как для оборудования, так и для людей.

В приложении к части 3 стандарта МЭК 62305 содержится важная информация о практической реализации и деталях системы заземления и системы выравнивания потенциалов. Выравнивание потенциалов системы молниезащиты представлена, как часть стандарта под пунктом 6.2. Это достигается соединением следующих компонентов, используя проводники выравнивания потенциалов, естественные соединения, устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП):

- металлические части конструкций;
- металлические установочные компоненты;
- внешние проводящие линии, имеющие соединения с аппаратной частью системы;
- электрические и электронные системы с аппаратной частью, которая должна быть защищена.

Цель молниезащиты и защиты от импульсных перенапряжений — повышение безопасности производства и его готовности. Принципы безопасного оборудования системы для перерабатывающей промышленности с привязкой к ЭМС, так же как и опасности, вызванные ударами молний, собраны в стандарте МЭК 61511-1.

Зонная концепция молниезащиты формирует основу системы молниезащиты (рис. 2).

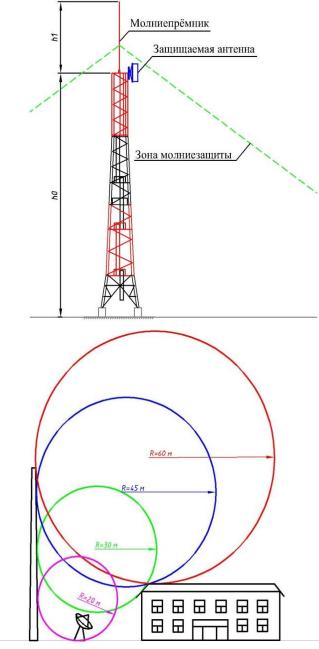


Рис. 2. Примеры защиты АФУ по СТО Газпром с применением метода фиктивной сферы

Ее описание приведено в международном стандарте МЭК, перенесено в российскую «Инструкцию по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122-2003», а также повторяется во многих локальных национальных отраслевых стандартах, в том числе ПАО «Газпром». В соответствии с этой концепцией оборудование классифицируется в соответствии с зонами молниезащиты (LPZ — lightning protection zones) от 0А до 3.

Целью является последовательное уменьшение электромагнитных возмущений от зоны 0A до зоны 2 или 3, вызванных близким или прямым ударом молнии, до допустимого для каждого конкретного случая уровня. Внешние элементы молниезащиты и механические части, окружающие полевые приборы, должны предотвращать оборудование от разрушений, вызванных прямым попаданием разряда молнии. Защита от

импульсного перенапряжения должна защищать электрическое и электронное оборудование от электромагнитных воздействий, вызванных разрядом молнии.

Особенности применения УЗИП в газовой промышленности

В нефтегазовой, химической и перерабатывающей промышленности, где производственные площадки разбросаны на очень больших территориях с длинными линиями сетей передачи данных и питающими линиями, в электрической инфраструктуре появляются значительные разности потенциалов во время грозы при ударах молнии в объекты или близлежащие территории. Также импульсное перенапряжение появляется при коммутации индуктивной нагрузки, такой, как электродвигатели. В результате повреждения оборудования может произойти короткое замыкание в сети или пробой на землю и, как следствие, отключаются целые секции электрической системы.

Также эксплуатационные предприятия должны принимать в расчет последствия аварийного отключения электрооборудования, когда оборудование отключается под нагрузкой, коммутационные операции этого типа могут вызвать возникновение импульсных перенапряжений в несколько тысяч вольт. Даже если в результате не последует немедленного выхода из строя системы, электрооборудование может быть повреждено, что послужит выходу системы из строя через некоторое время. Впоследствии достаточно трудно установить, что причиной этого было воздействие импульсного напряжения из-за удара молнии или аварийного отключения оборудования неделю назад.

УЗИП позволяют существенно повысить степень готовности производственных систем, а зонная концепция защиты облегчает выбор решения. Соответствующие меры защиты от импульсных перенапряжений и последовательное уравнивание потенциалов должны быть приняты на переходах из одной защитной зоны в другую. Для цепей питания принято устанавливать УЗИП классов 1, 2 и 3 на границах соответствующих зон.

Устройства защиты от импульсных перенапряжений для измерительных и информационных цепей — токовые петли, цифровые сигналы, магистральные системы — имеют конструкцию, включающую как минимум два каскада защиты, а, следовательно, обеспечивают защиту устройств при передаче сигнала через разные защитные зоны. Они обладают достаточно высокой способностью отводить разрядные токи и при этом имеют низкий уровень защиты (напряжение, при котором происходит срабатывание устройства) и маленькое время срабатывания.

В измерительных линиях, следует принять во внимание, что в защите нуждаются с одной стороны полевые устройства, а с другой — устройства контроля и управления. УЗИП для измерительных цепей, как известно, работают по принципу предохранительного короткого замыкания. В случае перегрузки они замыкают сигнальную цепь на линию защитного заземления, чем предотвращают повреждение соответствующего интерфейса.

С точки зрения экономической эффективности производства, одним из важнейших вопросов является стоимость эксплуатации, ремонта и времени простоя системы. Опыт показывает, что предприятия, применяющие в своих системах УЗИП, значительно повышают степень надежности своего оборудования. Поэтому в ОПО помимо повышения уровня экономической эффективности, огромное значение имеет уровень безопасности всего производства.

Компенсация опасных стохастических возмущений на электрооборудование

Совокупность случайных факторов, действующих на рабочие органы агрегатов, определяет не только случайный характер нагрузки, потребляемой мощности электрооборудование агрегата, но и его КПД, а также коэффициент мощности. Так как случайный процесс нагружения не может быть достоверно описан традиционной детерминированной диаграммой, для адекватного расчета основных параметров технологического электрооборудования в этом случае необходимо использовать статистические методы

теории планирования эксперимента. Исследования с привлечением аппарата теории вероятности показали, что процесс нагружения приводов обычно распределен по закону Райса.

При отсутствии непосредственного воздействия совокупности стохастических возмущений на электрические и механические органы агрегатов (системы 2-го рода) наиболее целесообразным является организация инвариантной системы управления, адекватно учитывающей все частные влияния возмущений на объект. Для этого все влияющие возмущения после формализации вводятся в закон управления, обеспечивая адекватность задания момента и скорости текущему состоянию объекта. При этом реализуются замкнутые САР по возмущению, отклонению и комбинированные.

Помимо основных ЭГПА характерными примерами агрегатов КС со случайными возмущениями 2-го рода являются локальные приводы, входящие в АСУ КС: аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа после его компримирования в ЭГПА, АВО масла всех основных систем и агрегатов КС, а также насосы и вентиляторы вспомогательных систем, параметры которых подвержены климатическим воздействиям. Для рассматриваемой группы механизмов и технологических процессов возможны два метода идентификации и расчёта, используемые при проектировании АСУ ТП.

- 1. Идентификация с последующим автоматизированным расчетом алгоритмов управления. В этом случае идентификация модели объекта управления осуществляется один раз, после чего рассчитывается алгоритм управления с постоянными параметрами в режиме *on-line*или *off-line*. Преимуществами метода является возможность расчёта и оценки любого алгоритма с дальнейшим моделированием и созданием общей модели. Поэтому данный метод следует применять при выборе структуры системы управления и расчёта регуляторов с фиксированными параметрами или адаптивных регуляторов с прямой связью.
- 2. Разработка самооптимизирующихся (самонастраивающихся) адаптивных алгоритмов управления агрегатами. В этом случае идентификация модели объекта производится периодически и после очередного получения оценок модели объекта в режиме *on-line*определяются параметры алгоритма управления с переменными коэффициентами. Достоинствами метода является возможность непрерывного слежения алгоритма за медленно меняющимися параметрами объекта и меньшее время обработки в ПК.

Анализ требований показывает, что все онимогут быть реализованы на основе современного серийного электрооборудования. Однако реализация требования по возмущениям предполагает применение ДЛЯ обработки и формализации статистических методов, основанных на приложениях центральной теории общую теоремы вероятности, входящих В теорию планирования эксперимента[3,9,16].

Выводы. Проведен анализ отечественной нормативной базы и международных стандартов в области защиты силового оборудования и измерительных цепей в части защиты от внешних и внутренних перенапряжений. Доказана необходимость и даны рекомендации по использованию УЗИП в топливно-энергетическом и нефтегазовом комплексе.

Библиографический список

- 1. Крюков О.В., Степанов С.Е. Повышение искробезопасности электрооборудования в газовой промышленности // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. 2014. № 8. С. 18-21.
- 2. Крюков О.В. Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей ГПА // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С. 14-19.

- 3. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.
- 4. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.
- 5. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 6. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 7. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.
- 8. Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В. Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.
- 9. Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 10. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТКподредакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 11. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Modern systems of outdoor illumination for compressor stations // Light & Engineering. 2016. T. 24. № 2. C. 128-131.
- 12. Захаров П.А., Крюков О.В. Перспективы развития метрологических расходоизмерительных центров ПАО "Газпром" // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2018. Мат. XXIV МНТК к 100-летию Нижегородской радиолаборатории. 2018. С. 693-699.
- 13. VaseninA.B., KryukovO.V., SerebryakovA.V. Adaptivecontrolalgorithmsofautonomousgeneratorcomplexes // Вкниге: Электромеханика, электротехнологии, электротехническиематериалыикомпоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.
- 14. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 15. Васенин А.Б., Крюков О.В. Вопросы электропитания вдольтрассовых объектов ЕСГ России // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2020. № 2 (44). С. 181-192
- 16. Васенин А.Б., Хлынин А.С., Крюков О.В. Автоматизированные системы собственных нужд КС // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2020 XXVI МНТК. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 293-299.
 - 17. ГОСТ 9.005-72. Допустимые и недопустимые контакты металлов.
- 18. ГОСТ Р 50571.21-2000. (МЭК 60364-5-548-96). Заземляющие устройства и системы уравнивания электрических потенциалов в электроустановках, содержащих оборудование обработки информации.
- 19. ГОСТ 10434-82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования.
- 20. ГОСТ 9.303-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору и обозначения.
- 21. Терентьев Д.Е. Минимизация и стабилизация переходного сопротивления разъемных контактов в системах уравнивания потенциалов и заземляющих устройствах /

Состояние и перспективы развития энергетики и связи - www.commmeng.ru ,www.spres.info .

A. B. Bugrezov, A. E. Putera, O. V. Kryukov OPPORTUNITIES FOR IMPROVING THE INTRINSIC SAFETY OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF FUEL AND ENERGY FACILITIES

TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod

The ways of improving the intrinsic safety of responsible electrical equipment operating in the oil and gas, chemical and processing industries are considered. The analysis of the domestic regulatory framework and international standards in the field of protection of power equipment and measuring circuits in terms of protection against external and internal overvoltagesis carried out. The necessity is shown and recommendations are given for the use of the UZIP in the fuel and energy and oil and gas complex.

Keywords: intrinsic safety, spark protection, surge protection device, electric gas pumping unit.

УДК 62-52-83:656.56

А.Б. ВАСЕНИН, И.В.ГУЛЯЕВ, О.В. КРЮКОВ

ДИНАМИКА ЧАСТОТНОГО ПУСКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ООО «Газпром проектирование», г. Н. Новгород, МГУ им. Н. П. Огарёва, г. Саранск, ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

Рассмотрены высокоэффективные методы частотного запуска двигателей основных технологических агрегатов ТЭК. Анализ схемотехнических вариантов частотного пуска показал возможности значительного улучшения всех основных недостатков прямого пуска. Представлены преимущества автоматической синхронизации с питающей сетью и автоматическое безударное переключение статора двигателя на сеть. Наилучшие практики гладкого переключения на сеть обеспечивается только в варианте с алгоритмом работы без паузы при питании цепи статора с минимумом перерегулирования по току статора и колебаний электромагнитного момента двигателя.

Ключевые слова: частотный пуск, электродвигатель, пусковое регулирующее устройство, пауза, переключения, моделирование.

Введение

Частотный пуск используется для двигателей переменного тока большой мощности, в тех случаях, когда не требуется регулирование скорости приводимого механизма [1-4]. Частотный пуск устраняет неблагоприятные факторы, имеющие место при прямом пуске, в отношении воздействия на двигатель, механизм и питающую сеть [5-8].

Обобщённая функциональная схема системы частотного запуска электроприводного агрегата приведена на рисунке 1 [9-12].

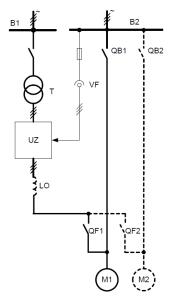


Рис. 1. Функциональная схема системы частотного запуска электроприводного агрегата

На схеме показаны: электродвигатель M1, преобразовательное регулирующее устройство (ПРУ) UZ, трансформатор T, элемент обратной связи по напряжению VF, контакторы (выключатели) QF1, QB1, секции распределительного устройства (РУ) B1, B2. Последнее может быть интегрировано в одну и ту же секцию. При необходимости в некоторых случаях используется дополнительный реактор LO на выходе ПРУ.Одно преобразовательное регулирующее устройство часто используют для частотного пуска нескольких двигателей [13-16]. Часть схемы, относящаяся к двигателю М2, показана на рис. 1 пунктирными линиями. Общий принцип частотного пуска состоит в том, что двигатель вначале подключается (контактором QF1) к выходу $\Pi P Y$, ускоряется в составе регулируемого электропривода до определённой скорости, близкой к синхронной, и синхронизируется с сетью, на которую он должен переключиться. После этого статор двигателя отключается от $\Pi P Y$ и подключается к сети (контактором Q B). Процедура синхронизации на сеть называется синхронным трансфером, основная задача которого – переключение, без заметных толчков момента. Используются синхронного виды трансфера, отличающиеся последовательностью работы контакторов QF1, QB1 и методом синхронизации с сетью.

Переключение при работающем ПРУ

Когда частота напряжения статора в процессе ускорения приближается к частоте сети, замыкаются дополнительные контуры регулирования [17-20]:контур регулирования углового положения вектора напряжения статора и контур модуля вектора напряжения статора. Эти контуры стремятся свести к нулю рассогласование векторов напряжения статора и сети. После того, как погрешности по угловому положению и по модулю входят в заданные пределы, статор подключается к сети контактором QB1. Затем уже запирается ПРУ и отключается контактор QF1. Метод обеспечивает практически идеальное переключение.

Однако недостатком метода является подключение выхода работающего ПРУ к сети, и он в течение определённого времени остаётся подключённым к сети. Это создаёт угрозу сверхтоков в силовых контурах ПРУ по двум возможным причинам: ошибка в начальной синхронизации и повреждение внутри ПРУ на интервале его совместной работы с сетью.

При большой мощности короткого замыкания на шинах, к которым переключается двигатель, мгновенные значения сверхтоков могут превышать значения, допустимые по

условиям даже не повреждения, а разрушения силовых полупроводниковых элементов в составе ПРУ. Для каждого такого элемента в каталоге производителя указывается максимальное мгновенное значение тока по условиям разрушения (SurgeCurrent). При потенциальной возможности таких токов на выходе ПРУ включается токоограничивающий реактор LO (рис. 1).

Переключение с ПРУ на сеть с паузой

По этому методу вначале запирается ПРУ. Только после этого статор подключается к сети. Имеет место пауза продолжительностью T_P , в течение которой статор двигателя отключён от каких-либо источников.К концу паузы скорость вращения вектора напряжения статора становится равной скорости ротора. Модуль вектора напряжения статора к этому моменту определяется потоком ротора АД и основным магнитным потоком СД.За время паузы скорость ротора снизится на величину Δv_P , и произойдёт отставание вектора потока по углу на величину Δv_P .

Последовательность работы контакторов QF1, QB1 может быть различной в различных вариантах данного метода. Возможен, например, вариант, в котором контактор QB1 включается раньше, чем отключается контактор QF1. В этом случае во время паузы статор двигателя подключён к выходу отключенного ПРУ. Если в составе ПРУ имеется выходной фильтр, например, в преобразователе частоты (ПЧ) на основе инвертора тока (ИТ) с ШИМ и выходной конденсаторной батареи, то статор во время паузы подключён к конденсаторной батарее фильтра.

В любом случае, после запирания ПРУ происходит очень быстрое и весьма значительное изменение вектора тока статора. Также большие изменения претерпевает и вектор потокосцепления статора. Если даже в момент подключения к сети вектор эквивалентного потокосцепления сети совпадает с тем значением, которое он должен иметь в новом установившемся режиме, то установившийся режим не может возникнуть мгновенно. Поэтому неизбежен электромагнитный и электромеханический переходный процесс.

В результате при наличии паузы принципиально невозможно идеальное переключение. Неизбежны изменения в токе статора, в моменте и в скорости двигателя. Основная задача состоит только в том, чтобы исключить сверхтоки статора и свести к минимуму колебания момента.

Переключение без начального опережения по скорости представляет собой достаточно простой метод. В процессе ускорения двигателя при подходе к номинальной скорости замыкается контур регулирования фазы вектора потокосцепления статора. Вектор потокосцепления статора сравнивается по фазе с вектором эквивалентного потокосцепления сети. Задаётся угол опережения вектора потокосцепления статора. Регулятор фазы вводит дополнительное задание на вход регулятора скорости.

Желательно также обеспечить регулирование модуля вектора потокосцепления статора воздействием на регулятор магнитного потока. После того, как регулятор фазы вводит систему в установившийся режим, начинаются операции по переключению. Подаётся команда на включение контактора QB1. Поскольку время включения этого контактора довольно значительно, с задержкой запирается ПРУ. Задержка программируется таким образом, чтобы обеспечивалась пауза с заданным малым временем. При использовании стабильного выключателя удаётся работать с паузой порядка $36\text{-}40\ ms$.

На рис. 2 представлена осциллограмма процессов трансфера для электропривода нагнетателя газа мощностью 3 MW, 1490 об/мин. Схема ПРУ — на основе ИТ с ШИМ. Электромеханическая постоянная времени электропривода $T_j = 13.6~s$. Представлены процессы нагруженного привода. Время паузы $T_P = 40~ms$.

Зарегистрированные переменные: i_D — выпрямленный ток ПРУ, i_s — ток статора (модуль вектора), u_s — напряжение статора (модуль вектора). Во время паузы ток статора

не падает до нуля – статор остаётся подключённым к конденсаторной батарее фильтра $\Pi P Y$.

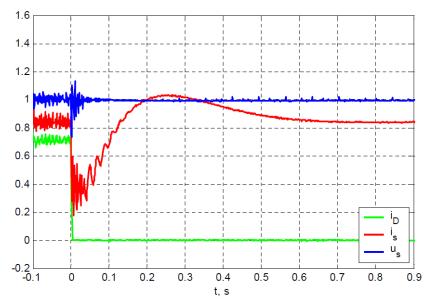


Рис. 2. Результаты моделирования переходных процессов пуска электропривода нагнетателя

Представлен благоприятный случай: к моменту окончания паузы вектор потокосцепления статора совпадает с вектором потокосцепления сети, совпадают также напряжения по модулю. В результате после подключения к сети свободная составляющая процесса практически отсутствует — колебания частоты 50 Гц в модуле вектора тока статора несущественны. Но имеют место переходные электромагнитные и электромеханические процессы: нарастание тока статора и восстановление скорости, — протекают с небольшим перерегулированием по току.

На рис. 3 представлены процессы при таких же условиях, как для рис. 2, но при уменьшенном начальном опережении вектора потокосцепления статора. На рис. 6 показаны процессы при таких же условиях, как для рис. 4, но при увеличенном напряжении сети.

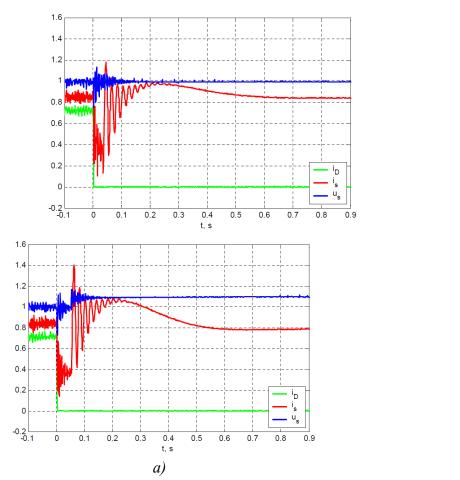


Рис. 4. Динамика процессов: а) при уменьшенном начальном опережении вектора потокосцепления статора, б)при увеличенном напряжении сети

б)

В обоих случаях очень заметна свободная составляющая тока статора. Перерегулирование по току намного выше, чем в благоприятном случае. Следует отметить, что процессы заметно неблагоприятнее в малоинерционных привод ах, например, в приводах циркуляционных насосов ТЭЦ.

Переключение с начальным опережением по скорости

В режим с опережением по скорости начальное опережение по скорости вводится для того, чтобы в момент подключения к сети угловая скорость вектора потока двигателя была близка к таковой для вектора потокосцепления сети. Необходимое опережение по скорости пропорционально моменту нагрузки двигателя. Желательно вводить опережение учётом фактического момента нагрузки. системе регулирования электроприводасуществует сигнал, пропорциональный нагрузке. Например, электроприводе с ПИ регулятором скорости выходной сигнал интегральной части регулятора скорости пропорционален моменту нагрузки. На рис. 5 показаны процессы в системе регулирования со специальным регулятором скорости; это - процессы при скачкообразных изменениях момента нагрузки.

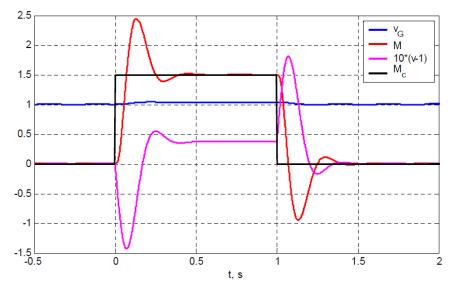


Рис. 5. Динамика процессов в системе регулирования со специальным регулятором скорости

Зарегистрированы: v_G — задание скорости, M — электромагнитный момент двигателя, (v-1) — отклонение скорости от скорости х. х., M_c — момент нагрузки. Посленаброса нагрузки происходит просадка скорости, затем устанавливается режим с превышением задания скорости и фактической скорости над уровнем скорости х. х. Характер процессов практически не отличается от типовых процессов системы подчинённого регулирования с ПИ регулятором скорости. Таким образом, замкнутая система вполне устойчива.

Режимы с перекрытием включённого состояния контакторов QF1, QB1

В этом варианте вначале запирается $\Pi P Y$, затем включается контактор QB1 (статор подключается к сети), после чего отключается контактор QF1 (статор отключается от выхода $\Pi P Y$). Если время TB включения контактора QB1достаточно существенно, вначале должна подаваться команда на включение этого контактора. Команду на запирание $\Pi P Y$ желательно подать с задержкой по времени, чтобы обеспечить малое время паузы TP. Интервал времени TB от подачи первой команды до подключения статора к сети содержит два подинтервала:

- 1. Подинтервал продолжительностью (TB TP), на котором вектор потока двигателя вращается с опережением по скорости $\Delta v0$.
- 2. Собственно пауза продолжительностью ТР, когда вектор потока двигателя тормозится. Соответственно, необходимое опережение по углу в момент подачи первой команды должно составлять:

$$\Delta \gamma_1 = \Omega_b \left(-T_B + \frac{3}{2} T_P \right) \frac{T_P}{T_i} M_c.$$

Режимы без перекрытия включённого состояния контакторов OF1, OB1

В этом случае возможны разные варианты в отношении последовательности команд. Рассматриваем самый неблагоприятный вариант в отношении времени паузы, но зато наиболее надёжный: гарантировано исключается перекрытие включённого состояния контакторов. В этом варианте контакторы QF1, QB1 взаимно блокированы, включение контактора QB1 только начинается после отключения контактора QF1. Чтобы исключить разрыв цепи статора при работающем Π РУ, команда на запирание Π РУ подаётся одновременно с командой на отключение статора от Π РУ (отключение контактора QF1).

В данном случае время паузы приближённо содержит время отключения контактора QF1 и время включения контактора QB1. Оно может оказаться на порядок

больше, чем в варианте с перекрытием включённого состояния контакторов. Необходимое опережение по фазе в этом случае составляет:

$$\Delta \gamma_1 = \frac{1}{2} \Omega_b \frac{T_p^2}{T_j} M_c.$$

И опережение по скорости, и опережение по углу при значительном времени паузы оказываются приемлемыми только для высоко-инерционных электроприводов: вентиляторов, турбокомпрессоров и т.п.. С 1997 г. эксплуатируется система частотного пуска синхронных двигателей 20 МВт турбокомпрессоров, разработанная под руководством авторов[21-23].

Выводы. Частотный пуск — высокоэффективный метод пуска двигателей переменного тока, не нуждающихся в регулировании скорости. Автоматическая синхронизация с питающей сетью и автоматическое безударное переключение статора двигателя на сеть — достаточно сложный, ответственный и, в определённой мере, рискованный режим. Гладкое переключение на сеть обеспечивается только в варианте переключения на сеть без паузы.

Библиографическийсписок

- 1. Sonin Y.P., Bainev V.F., Gulyaev I.V. Static characteristics of contactless asynhronizedthyratron motor // Russian Electrical Engineering. 1994. T. 65. № 9. C. 20-29.
- 2. Kopylov I.P., SoninYu.P.,Gulyaev I.V., Nikulin V.V. Contactless asynhronized synchronous motor // Russian Electrical Engineering. 1999. T. 70. № 9. C. 35-41.
- 3. Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В. Электроприводы на основе машины двойного питания и АВК с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.
- 4. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // Всборнике: Proceedings 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. C. 444-449.
- 5. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.
- 6. Васенин А.Б., Крюков О.В. Оценка эксплуатационных факторов электроприводных ГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 7. С. 6-15.
- 7. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК под редакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 8. Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В. Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.
- 9. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.
- 10. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 11. Сулин В.А., Крюков О.В. Особенности развития метрологических расходоизмерительных центров // Наука и техника в газовой промышленности. 2020. № 2 (82). С. 99-106.
- 13. Крюков О.В., Туганов Р.Б., Мещеряков В.Н. Компьютерное моделирование синхронных машин при эксплуатации на объектах энергетики // Автоматизация и ІТ в энергетике. 2020. № 4 (129). С. 26-31.

- 14. Ilin M.V., Bespalov N.N., Kapitonov S.S., Gulyaev I.V. Selection of power semiconductor devices for parallel connection // Russian Electrical Engineering. 2017. T. 88. № 6. C. 336-341.
- 15. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. T. 90. № 7.C. 473-478.
- 16. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.
- 17. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 18. VaseninA.B., KryukovO.V., SerebryakovA.V. Adaptive control algorithms of autonomous generator complexes // В книге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.
- 19. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Изв. ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 20. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности ЭГПА // Газовая промышленность. 2014. № 6. С. 86-89.
- 21. Kryukov O.V., Blagodarov D.A., Dulnev N.N., Safonov Y.M., Fedortsov N.N., Kostin A.A. Intelligent control of electric machine drive systems // В сборнике: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 Conference Proceedings 10. 2018.
- 22. Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: Великие реки' 2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 1. 22.Крюков О.В. Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей ГПА // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С. 14-19.
- 2. 23.Мещеряков В.Н., Туганов Р.Б., Крюков О.В. Способы интеллектуального управления электроприводными агрегатами газопровода "Парабель-Кузбасс" // Автоматизация и ІТ в нефтегазовой области. 2020. № 1 (39). С. 5-10.

A. B. Vasenin, I. V. Gulyaev, O. V. Kryukov DYNAMICS OF THE FREQUENCY START OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE

Gazprom design LLC, Nizhny Novgorod, Mordovia State University named N. P. Ogarev, Saransk, TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod

High-efficiency methods of frequency starting of engines of the main technological units of the fuel and energy complex are considered. The analysis of circuit design options for frequency start-up showed the possibility of significant improvement of all the main disadvantages of direct start-up. The advantages of automatic synchronization with the supply network and automatic shock-free switching of the motor stator to the network are presented. Best practices of smooth switching to the network is provided only in the version with the algorithm of operation without pause when powering the stator circuit with a minimum of over-regulation of the stator current and fluctuations in the electromagnetic torque of the motor.

Keywords: frequency start, electric motor, starting control device, pause, switching, simulation.

УДК 62-52-83:656.56

О.В. КРЮКОВ, А.В. САУШЕВ, Р.Б. ТУГАНОВ

СРЕДСТВА НАДЕЖНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ДОБЫЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, ВГУВТ, г. Нижний Новгород

Рассмотрена стратегия развития систем энергообеспечения подводных добычных комплексов исходя из специфических особенностей акваторий Арктики РФ. Показана возможность реализации проектов морских месторождений углеводородного сырья на основе новой аппаратной базы электромашиностроения и интеллектуальных алгоритмов управления и мониторинга электроприводными газоперекачивающими агрегатами. Представлены высоконадежные системы электроснабжения, которые обеспечивают создание высокотехнологичных, энергоэффективных и долговечных агрегатов и автоматизированных систем на основе безлюдных технологий. Рассмотрены особенности реализации новых оригинальных технико-технологических решений функциональных возможностей электроприводных газоперекачивающих агрегатов с интеллектуальными системами управления и диагностики.

Ключевые слова: системы электроснабжения, подводные добычные комплексы, электроприводной газоперекачивающий агрегат, интеллектуальные системы диагностики, безлюдные технологии.

Введение

В настоящее время потребление углеводородного сырья в мире возрастает из года в год, месторождения на суше истощаются, а открытие новых происходит в основном в шельфовой зоне материков или в глубоководной части океана. Обустройство таких месторождений требует нового подхода, поскольку шельфовые месторождения РФ (рис. 1) расположены в основном в акватории замерзающих морей Арктики и Дальнего Востока.



Рис. 1. Шельфовая и морская добыча природного газа в РФ

Одной из проблем при обустройстве морских удаленных месторождений нефти и газа является сложность обеспечения надежного энергоснабжения [1-3]. Из-за большого расстояния от берега в силовом кабеле возникают потери, обусловленные использованием систем переменного тока, который нужен для электроприводов технологических агрегатов [4-7]. Существующие системы электроснабжения подводно-добычных комплексов (ПДК) нефтегазовых месторождений в основном реализованы на шельфе

Норвегии. Изучены принципы подводной передачи энергии на большие расстояния с помощью высоковольтных кабелей постоянного тока и особенности применения автономных инверторов и оригинальных конструкций приводных электродвигателей в системе технологических процессов компримирования на ПДК [8-10].

Ввиду большого количества необустроенных месторождений газа в Арктическом регионе России и короткого навигационного периода тема данной работы является актуальной, так как разработка шельфовых месторождений в замерзающих морях возможна только подводным способом. Развитие системы энергоснабжения ПДК позволит в короткие сроки ввести в эксплуатацию труднодоступные месторождения в акваториях Тихого и Северного Ледовитого океана.

В настоящее время электроприводные нефте- и газоперекачивающие агрегаты являются единственным и безальтернативным вариантом реализации энергетических систем обустройства на подводных добычных комплексах (ПДК) [11-13]. Новая аппаратная база электромашиностроения и интеллектуальные алгоритмы управления и мониторинга [14-17] обеспечивают создание высокотехнологичных, энергоэффективных и надежных агрегатов и автоматизированных систем на основе безлюдных технологий [18-21]. Особенно это актуально в сочетании с комплексом систем энергообеспечения промысловых объектов, где высоки требования по живучести объектов обустройства подводных месторождений.

Рассмотрим особенности реализации новых оригинальных технико-технологических решений функциональных возможностей электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) с интеллектуальными системами управления и диагностики (ИСУД): безредукторное и безмасляное исполнение в единоммонокорпусе с нагнетателями; надежный электромагнитный подвес ротора; плавный безопасный пуск под нагрузкой; частотное и частотно-токовое релейное регулирование параметров и автоматическая адаптивная перестройка законов управления; встроенная система мониторинга и прогнозирования технического состояния.

Обустройство подводных добычных комплексов

Сегодня на мировом рынке среди компаний проектантов и изготовителей подводного оборудования мировое лидерство у следующих компаний: FMC KongsbergSubsea AS, AkerSolutions (Subsea), Cameron и GE Vetco. Подводное устьевое оборудование представляет собой комплекс специальных механизмов, устройств и систем, обеспечивающих при бурении разведочных скважин и добычи в штатном режиме механическую связь буровой установки с устьем скважины, расположенном на дне моря.

Технологии подводной подготовки углеводородов существенно расширяют гибкость в добыче продукции скважин. В состав подводного комплекса входит: центробежный газовый компрессор; электропривод с системой охлаждения; оборудование регулирования частоты вращения привода компрессора; оборудование подачи и распределения электропитания для потребителей блока; дистанционно-управляемая запорная арматура; контрольно-измерительные приборы; системы управления, аварийного выключения, мониторинга текущего состояния.

Несомненным лидером в области применения подводных технологий при освоении шельфовых месторождений нефти и газа является Норвегия. Она сумела одновременно создать свою национальную инновационную систему и сделать ее частью глобальной, добиться, чтобы иностранные корпорации, проводили локализацию своих технологий в стране.

Еще в 2001 году в Норвегии была принята национальная стратегия «Нефть и газ в 21 веке» (OG21), которая определила 8 направлений исследований, а в 2008 году Научно-исследовательскому совету выделено 5691 миллион крон (более 28,5 млрд рублей). Один из проектов - WS SeabedRig DEMO2000 по испытаниям полностью автоматизированного ПДК (рис. 2).

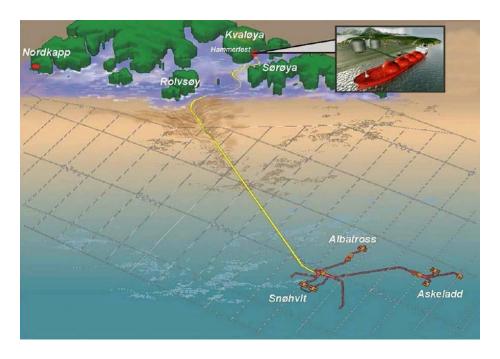


Рис. 2. Схема реализации проекта автоматизированного ПДК

Технологии атомной энергетики для обустройства ПДК

Учитывая удельные капитальные вложения и прогнозируемую себестоимость электроэнергии, можно говорить о целесообразности и экономической эффективности атомных энергоисточников единичной мощности, не превышающей 300 МВт (что по определению МАГАТЭ соответствует диапазону станций малых мощностей (АСММ)), при решении проблемы энергообеспечения перспективных арктических месторождений.

Главное требование к энергетическим установкам в условиях Арктического шельфа – повышенная надежность и минимальное воздействие на окружающую среду. Не менее актуально требование минимального обслуживания вплоть до полной автономности с использованием безлюдных технологий. Таким условиям идеально отвечают судовые атомные энергетические установки (рис. 3).

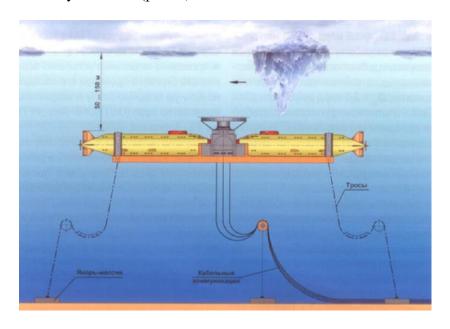


Рис. 3. Атомная энергоустановка на базе реакторной установки «Шельф»

Интегральный опыт эксплуатации малой атомной транспортной энергетики превышает шесть тысяч реакторо-лет. Промышленностью произведено более 500 реакторных установок.

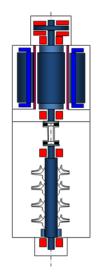
Так, например, предлагается атомная турбогенераторная установка (АТГУ) «Шельф» для энергоснабжения технических средств, работающих на нефтегазовых месторождениях, в том числе удаленных на значительное расстояние от берега и имеющих круглогодичный цикл работы в течение 25–30 лет. Она может поставляться в виде готовой к эксплуатации энергокапсулы в составе наземного или подводного исполнения.

АТГУ «Шельф» включает двухконтурную атомную РУ с водо-водяным интегральным реактором тепловой мощностью 28 МВт, турбогенераторную установку, обеспечивающую выработку электроэнергии мощностью 6000 кВт и систему автоматизированного и дистанционного управления, контроля и защиты техническими средствами установки.

Особенности реализации электроприводных газоперекачивающих агрегатов

Ужесточение требований по реализации новых оригинальных техникотехнологических решений функциональных возможностей ЭГПА с интеллектуальными системами управления и диагностики обусловили создание новой техники: безредукторное и безмасляное исполнение в едином монокорпусе с нагнетателями; надежный электромагнитный подвес ротора; плавный безопасный пуск под нагрузкой; частотное и частотно-токовое релейное регулирование параметров и автоматическая адаптивная перестройка законов управления; встроенная система мониторинга и прогнозирования технического состояния.

Повышение требований к минимизации массогабаритных показателей КС для компактности «пятна застройки», обеспечения безопасности для окружающей среды с «нулевыми выбросами» при работе с грязными газами без внешней спецочистки и увеличение надежности и долговечности работы установок предложен вариант вертикальной компоновки приводных двигателей ЭГПА в капсулированном герметичном корпусе без мультипликатора, муфты и маслосистем (рис. 4).



Осевой магнитный подшипник в герметичном корпусе Радиальный магнитный подшипник в герметичном

Массивный ротор двигателя

Асинхронный двигатель в герметичной оболочке

Общий защитный кожух под давлением

Муфта трубчатого вала

Многоступенчатый центробежный компрессор

Цельный ротор

корпусе

Подмоди и ий модилати ий додинации в совмодились

Рис. 4. Схема вертикальной компоновки ЭГПА.

Конструктивно ЭГПА имеет компактную обмотку статора с жидкостным охлаждением и массивный ротор. Технология с компактными торцевыми обмотками применялась ранее для тихоходных АД специального назначения впервые применена для высокоскоростных электроприводов.

Капсулированные ЭГПА с вертикальной осью вращения имеют следующие параметры:

номинальные мощности 7,5; 9,5; 12,2 и 15 МВт, номинальные скорости 7600 - 20000 об/мин, количество рабочих колес компрессора 6 и 8, схема колес — последовательная и сдвоенная, капсула: длина 4,8 м, ширина 4,1 м, высота 4,6 м, снижение пятна застройки — более 40 %, герметичная оболочка держит 150 бар и 200 °C.

Главным направлением дальнейшего совершенствования мощных электрических машин переменного тока для нужд ПДК сегодня является повышение надежности, ресурса и энергоэффективности установок. Это связано с постоянным ужесточением требований по их эксплуатации на объектах повышенной опасности (ОПО), с одной стороны, и тенденциями интеграции приводных электрических машин с исполнительными механизмами и системами автоматического управления, с другой.

Повышение требований к минимизации массогабаритных показателей ПДК для компактности «пятна застройки», обеспечения безопасности для окружающей среды с «нулевыми выбросами» при работе с грязными газами без внешней спецочистки и увеличение надежности и долговечности работы установок предложен вариант вертикальной компоновки приводных двигателей ЭГПА в капсулированном герметичном корпусе без мультипликатора, муфты и маслосистем.

уникальные Подобные конструктивные решения позволяют малолюдные и безлюдные технологии эксплуатации компрессорных установок с автоматическим дистанционным управлением и оптимизацией работы всего подводного добычного комплекса. Кроме того, имеются практические наработки характерных примеров многолетней успешной промышленной эксплуатации инновационных систем с секционирующими пунктами на базе электроснабжения реклоузеров электроприводных газо- и нефтеперекачивающих агрегатов, обеспечивающих реализацию малолюдных и безлюдных технологий, включая автономные системы энергообеспечения арктических месторождений углеводородов. Предложены модульные инвариантные оптимального управления системами структуры И законы энергообеспечения потребителей обустройства морских месторождений нефти и газа, которые позволяют гарантировать энергоэффективное электропитание основных технологических установок и других потребителей подводного добычного комплекса.

Выводы

Новые конструктивные решения систем энергообеспечения и электроснабжения ПДК на базе электродвигателей переменного тока мегаваттного класса с горизонтальной и вертикальной осями вращения, а также совершенствование систем управления частотно-регулируемым электроприводом, позволяют повысить надежность и энергоэффективность технологических агрегатов в рамках безлюдных технологий для важнейшей топливно-энергетической отрасли промышленности.

Библиографический список

- 1. Захаров П.А., Титов В.Г., Крюков О.В. Информационные технологии реализации энергообеспечения ПДК // В сборнике: Информационные системы и технологии ИСТ-2020. XXVI МНТК. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 300-306.
- 2. Туганов Р.Б., Крюков О.В.Атомные энергоустановки в энергообеспечении подводных добычных комплексов // В сб.: Великие реки' 2019. труды научного конгресса. 2019. С. 47-50.

- 3. Ковтун Л.И., Крюков О.В., Саушев А.В., Антоненко С.И. Аналитикостатистическийметод оценки состояния и прогнозирования рисков сложных технических систем // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза. 2020. Т.1. С. 264-269.
- 4. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. T. 90. № 7.C. 473-478.
- 5. VaseninA.B., KryukovO.V., SerebryakovA.V. Adaptive control algorithms of autonomous generator complexes // В книге: Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133-135.
- 6. Васенин А.Б., Крюков О.В. Проектирование электромеханической части и систем управления энергетических установок газотранспортных потребителей // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 47-51.
- 7. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // В сборнике: Проблемы автоматизации и управления в технических системах. МНТК под редакцией М.А. Щербакова. 2013. С. 29-32.
- 8. Мещеряков В.Н., Крюков О.В.Научные основы и энергосберегающие технологии обеспечения ПДК // В книге: Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2019). Тезисыдокладовпоматериалам VIII МНТК. 2019. С. 41.
- 9. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // Всборнике: Proceedings 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. C. 444-449.
- 10. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52-58.
- 11. Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные электростанции для удаленных промышленных потребителей // Экологические системы и приборы. 2018. № 3. С. 18-25.
- 12. Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В. Электроприводы на основе машины двойного питания и асинхронного вентильного каскада с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.
- 13. Крюков О.В.Особенности энергоснабжения подводных комплексов морских месторождений углеводородов // В сборнике: Фёдоровские чтения-2019. Под общей ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. 2019. С. 357-359.
- 14. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В., Крюков О.В. Приложения теории нечетких множеств для обработки данных и задач прогнозирования в системах АЭП // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII МНПК. 2017. С. 153-158.
- 15. Крюков О.В., Саушев А.В. Методология вейвлет-преобразования при анализеавтоматизированных электроприводов // В сб.: Фёдоровские чтения 2020: L МНПКпод общ.ред. Ю.В. Матюниной. М.: ИД«МЭИ». 2020. С. 174-178.
- 16. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. № 4. С. 39-44.
- 1. 17.Васенин А.Б., Крюков О.В. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го МНПФ. НГАСУ. 2017. С. 93-96.
- 17. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 50-58.
- 18. Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В. Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. 2017. № 8 (756). С. 84-89.

- 19. Крюков О.В., Серебряков А.В. Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // В сборнике: Пром-Инжиниринг. Труды II МНТК. ЮУрГУ. 2016. С. 286-290.
- 20. Крюков О.В. Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей ГПА // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С. 14-19.

O. V. Kryukov, A. V. Saushev, R. B. Tuganov MEANS OF RELIABLE POWER SUPPLY OF EQUIPMENT OF UNDERWATER MINING COMPLEXES

LLC "TSN-electro", Nizhny Novgorod, GUMRF named after adm. S. O. Makarov, St. Petersburg, VGUVT, Nizhny Novgorod

The strategy of development of energy supply systems for subsea mining complexes based on the specific features of the Arctic waters of the Russian Federation is considered. The possibility of implementing projects of offshore hydrocarbon deposits on the basis of a new hardware base of electrical engineering and intelligent algorithms for controlling and monitoring electric gas pumping units is shown. Highly reliable power supply systems are presented, which ensure the creation of high-tech, energy-efficient and durable units and automated systems based on unpopulated technologies. The features of the implementation of new original technical and technological solutions of the functional capabilities of electric gas pumping units with intelligent control and diagnostic systems are considered.

Keywords: power supply systems, underwater mining complexes, electric gas pumping unit, intelligent diagnostic systems, unpopulated technologies.

УДК: 621.311.176

В.Н. МЕЩЕРЯКОВ, П.С. ПОНОМАРЕВ ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПОДСТАНЦИИ ГПП-10 ПАО НЛМК

Липецкий государственный технический университет

«Цифровая подстанция» позволяет получить единый цифровой поток данных, характеризующий состояние управляемого объекта. Абстрагирование от существующей парадигмы построения системы защиты и управления подстанцией и переход к программной платформе, размещаемой на универсальных аппаратных устройствах и имеющей свободное распределение функций дает возможность получать решения, имеющие как полностью распределённую, так и централизованную архитектуру. Применение единой программной платформы позволит видоизменить рынок аппаратных устройств для построения систем защиты и управления подстанцией и перейти к рынку функциональных алгоритмов.

Ключевые слова: цифровая подстанция, релейная защита и автоматика, АСУТП ПС, SCADA, электроснабжение.

Цифровая подстанция — подстанция, оборудованная комплексом цифровых устройств (терминалов) для решения задач контроля и учета качества электроэнергии, регистрации аварийных событий, телемеханики, релейной защиты и автоматики (РЗА) и АСУТП. Передача информации между оборудованием объединяется центральным сервером объекта по последовательным каналам связи на единых протоколах.

Передача сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления подстанцией позволит создать технологическую инфраструктуру для внедрения информационно-аналитических систем, снизить ошибки недоучета электроэнергии, уменьшить затраты на