

Автоматизация технологических энергоустановок для эффективного транспорта газа

О.В. Крюков

к.т.н., доцент, главный специалист¹
o.kryukov@ggc.nnov.ru

¹ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены особенности аппаратной реализации и программного обеспечения автоматизированных установок в АСУ компрессорных станций. Представлены новые структуры и алгоритмы, обеспечивающие реализацию функциональных возможностей локальных АСУ объектами магистральных газопроводов.

Материалы и методы

Методы систем автоматического управления частотно-регулируемыми электроприводами.

Ключевые слова

магистральный транспорт газа, компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, частотно-регулируемый электропривод, аппарат воздушного охлаждения газа, системы отопления и вентиляции, автоматизация

Важнейшим направлением повышения технико-экономической эффективности, экологической безопасности и надежности функционирования ТП в топливно-энергетическом комплексе является оснащение локальных объектов современным электротехническим оборудованием и интеграция их в АСУ производств. В первую очередь это относится к внедрению автоматизированных систем с частотно-регулируемым электроприводом в технологиях добычи, транспортировки и переработки нефти и газа.

В настоящее время более 70% оборудования нефтегазовой промышленности имеет срок службы свыше 15 лет, оснащено системами на базе нерегулируемых двигателей, без систем мониторинга, что приводит к перерасходу электроэнергии, вредному воздействию на окружающую среду и исполнительные механизмы, снижая их долговечность. Масштабных реконструкций и модернизаций на уровне локальных объектов и систем в период 1986–2003 гг. не проводилось, что привело к устойчивой тенденции увеличения аварийности основного и вспомогательного электрооборудования.

Несмотря на специфику отраслевого применения оборудования топливно-энергетического комплекса, оснащение его автоматизированным электроприводом с преобразователями частоты и интеграция его в рамках АСУТП обеспечивает оптимизацию режимов работы каждого объекта, энерго- и ресурсосбережение, а также их системную безаварийность. Высокая эффективность применения регулируемого электропривода для насосных и вентиляционных установок, работающих с переменными режимами нагрузки, подтверждена многолетним опытом по их проектированию и внедрению в промышленности и на объектах нефтегазовой промышленности.

Главной задачей эффективного транспорта газа является обеспечение требуемой производительности компрессорных станций в условиях изменяющихся условий подачи и потребления газа. Это необходимо для поддержания оптимального давления в магистральном газопроводе и обеспечения надежной работы газотранспортной системы. Данная задача требует системного, комплексного подхода и включает несколько аспектов:

- *технологический* — гарантированное обеспечение транспорта газа в оптимальных режимах в соответствии с непрерывно изменяющимися внешними воздействиями детерминированного (графики поставки) и стохастического (природного, сезонного) характера. При этом АСУ электроприводом должна обеспечивать плавный запуск газоперекачивающих агрегатов и регулирование производительности компрессора в требуемом диапазоне изменения

технологических параметров;

- *экономический* — окупаемость затрат на модернизацию системы электропитания и оборудования за счет эффектов строгого соблюдения графика газоподачи, энергосбережения при регулировании и снижения аварийности. Наивысшая технико-экономическая эффективность АСУ может быть достигнута только с использованием преобразователей частоты с оптимальными законами управления и диагностики;
 - *надежность*, включая долговечность (безаварийность в длительной перспективе) работы каждого элемента силовой схемы нагнетателя и непрерывную диагностику с системой прогнозирования неисправностей. Повышение надежности работы компрессорных станций достигается путем технического перевооружения и реконструкции системы электропитания 10 кВ с использованием современных систем диагностики, управления, релейной защиты и автоматики (РЗИА);
 - *автоматизация* — телемеханизация и диспетчеризация на уровне станции должна содержать полную информацию о состоянии нагнетателей, аппаратов воздушного охлаждения газа и других технологических установках, а также о технологических параметрах компрессорной станции для обеспечения эффективного регулирования производительности газоподачи. Кроме того, она должна иметь возможность обмена информацией с другими станциями, в том числе имеющими газотурбинные агрегаты привода нагнетателей.
- Характерными техническими решениями с использованием программно-технических средств и систем автоматизации в области АСУТП объектов промышленности, в том числе и объектов магистрального транспорта газа, являются:
- автоматизированный мягкий запуск и регулирование производительности турбокомпрессоров средствами высокочастотного частотно-регулируемого электропривода по оптимальному закону $U/f^2 = const$, (где U, f — параметры амплитуды и частоты напряжения питания двигателя), с функциями мониторинга и прогнозирования отказов;
 - инвариантное управление вентиляторами аппаратов воздушного охлаждения газа, обеспечивающее автоматическую стабилизацию температуры газа на выходе компрессорной станции в условиях воздействия нескольких метеорологических и технологических возмущений стохастического характера;
 - автоматизация систем отопления и вентиляции зданий и помещений производственно-энергетического блока компрессорных станций, обеспечивающая комфортные климатические условия

работы обслуживающему персоналу и оборудованию;

- внешнее электроснабжение компрессорных станций (вводные электросиловые шкафы, агрегатные электрощиты, аппараты ввода резерва и другое оборудование) с дистанционным управлением и мониторингом, обеспечивающее гарантированное питание всех систем, быстрое подключение резервных и аварийных источников электроснабжения;
- автоматизация станции управления технологическими линиями подготовки и нанесения защитных покрытий на стальные трубы с координацией работы семи электроприводов в энергоэффективном режиме с максимальной производительностью;
- оптимальное управление вспомогательными системами (насосами собственных нужд и охлаждения агрегатов, штатным и аварийным освещением и т.п.) с мониторингом в рамках АСУ компрессорной станции.

Рассмотрим некоторые из этих характерных реализаций.

Автоматизация электроприводных газоперекачивающих агрегатов. В настоящее время наиболее актуальной задачей эффективного транспорта газа является разработка и внедрение современных автоматизированных систем регулируемого электропривода компрессорных станций, обеспечивающих высокие характеристики по энергосбережению, увеличения ресурса и срока службы оборудования [1]. Особенно она важна для мощных энергоёмких механизмов, к которым относятся турбокомпрессоры газоперекачивающих агрегатов, составляющие значительную часть оборудования, применяемого при транспортировке газа. Аппаратные и программные средства преобразовательной и микропроцессорной техники позволяют рационально решать эти задачи.

В настоящее время в ОАО «Газпром» решается актуальная задача по реконструкции компрессорных станций с электроприводными газоперекачивающими агрегатами. В этом случае предпочтение отдается частотно-регулируемым приводам с асинхронными электродвигателями, хотя данный вопрос требует глубокой проработки и проведения серьезных исследований. В этом направлении в ОАО «Газпром» уже имеется определенный опыт. Так, в 2004–2006 гг. был разработан проект реконструкции одной из электроприводных компрессорных станций [2], на которой установлены 10 электроприводных газоперекачивающих агрегатов. При реконструкции была предусмотрена замена существующих нерегулируемых электроприводов СТМ-4000 на регулируемые. В ходе предпроектной подготовки были выделены и проработаны следующие варианты реконструкции:

- замена существующих электродвигателей СТМ-4000 на КРЭП-6300 поставки ХК «Привод» (двигатели СТД-6300 и высоковольтные многоуровневые преобразователи);
- модернизация существующих электродвигателей (замена подшипников, изоляции и т.д.) с установкой регулируемого

электропривода;

- установка трех (2+1) новых мотор-компрессоров вместо группы из пяти существующих СТМ-4000 (плавное регулирование производительности по одной нитке газопровода);
- установка пяти (4+1) новых мотор-компрессоров вместо существующих СТМ-4000.

Перспективным и целесообразным был признан вариант с установкой оригинальных мотор-компрессоров, собранных в едином корпусе. Наиболее рациональным вариант реконструкции предполагает замену пяти существующих двигателей на три новых мотор-компрессора. Конструктивно каждый данный агрегат состоит из асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и двух нагнетателей, выполненных в корпусе на одном валу. Оригинальными решениями такой конструкции является реализация системы активного магнитного подвешивания ротора двигателя и валов нагнетателей, обеспечивающей за счет эффекта левитации вращающихся частей и отсутствия подшипников значительное увеличение ресурса всего газоперекачивающего агрегата. Кроме того, применение высококачественной изоляции позволило производить охлаждение двигателя перекачиваемым газом. В результате данная система позволяет: плавно регулировать производительность газоподдачи в широких пределах; оптимизировать капитальные вложения при максимальных технико-экономических показателях; отказаться от систем маслосмазки и уплотнений в подшипниках; в два раза сократить площади под привод при реконструкции с установкой высоковольтного преобразователя частоты и АСУ.

Высокоскоростной частотно-регулируемый электропривод ЭГПА выполнен на основе инвертора напряжения на интеллектуальных IGBT-модулях (1300 В, 1600 А) с оригинальным многоуровневым ШИМ-формированием напряжения питания асинхронного двигателя. Применение новых силовых модулей совместно с конденсаторами, выполненными конструктивно с малыми индуктивностями рассеивания, позволяет ограничить пики напряжения на транзисторах. В электроприводе предусмотрена фильтрация высших гармоник на входе/выходе, а также контроль dU/dt .

АСУ электропривода ЭГПА выполнена по принципу организации САР, ориентированной по вектору потокосцепления ротора на базе мультипроцессорной системы управления, которая позволяет интегрировать локальные приводы в АСУТП и АСУ электроснабжением компрессорных станций. Системные решения при реализации АСУТП компрессорной станции с электроприводом 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.

Разработанные адаптивные алгоритмы регулирования позволяют формировать

оптимальные переходные процессы и снижать ударные значения моментов при резких и значительных изменениях нагрузки с недопустимым ускорением (например, при гидравлическом ударе в газопроводе). Разработаны алгоритмы управления и диагностирования оборудования, которые могут найти свое применение при реализации проектов по реконструкции КЦ с электроприводными газоперекачивающими агрегатами.

В 2012 г. успешно завершилась разработка отечественного комплектного электроприводного газоперекачивающего агрегата ЭГПА-6,3/8200-56/1,44-Р, опытный образец которого прошел заводские приемочные испытания в соответствии с требованиями программ и методик испытаний электроприводных нагнетателей и их САУ.

Аппараты воздушного охлаждения газа со стабильной выходной температурой. Компрессирование газа за счет политропной работы сжатия приводит к повышению его температуры на выходе. Высокая температура компримированного газа разрушает изоляционное покрытие, возникают продольные температурные напряжения и деформации трубопровода. Кроме того, снижается газоподдача магистралей, ее пропускная способность и увеличиваются энергозатраты компримирования из-за роста объемного расхода.

Определенные специфические требования к охлаждению газа предъявляются в северных районах страны, где газопроводы проходят в зоне вечнотермальных грунтов. В этих районах газ необходимо охлаждать до отрицательных температур с целью недопущения протаивания грунтов вокруг трубопровода, что приводит к вспучиванию грунтов, смещению трубопровода и возникновению аварийной ситуации.

Таким образом, стабилизацией температуры на оптимальном уровне (вне зависимости от метеорологических, природных и технологических факторов) путем охлаждения газа после компримирования достигается [3]:

- увеличение производительности газопровода;
- улучшение работы антикоррозионной изоляции трубопровода;
- улучшение условий работы за счет снижения температурных напряжений в трубе;
- снижение вредного экологического воздействия на почву («растепление грунтов»).

Помимо этого, модернизация аппаратов воздушного охлаждения газа (АВОГ), связанная с оснащением их частотно-регулируемым электроприводом, исключает из конструкции вентиляторов отклоняемые направляющие аппараты — элемент, снижающий экономичность и надежность аппаратов. Основные преимущества от использования частотно-регулируемых приводов в АВОГ:

- повышение надежности и экономичности систем воздушного охлаждения;
- стабилизация температурного режима и увеличение срока службы трубопроводов;
- экономия электроэнергии;
- адаптивные режимы работы и

увеличение ресурса вентиляционного оборудования;

- исключение самовращения лопастей под действием конвекционных потоков.

Охлаждение технологического газа в АВОГ происходит за счет теплообмена между горячим газом в трубах и наружным воздухом. Глубина охлаждения компримированного газа ограничена температурой наружного воздуха, что особенно сказывается в летний период эксплуатации. Опыт эксплуатации АВОГ показывает, что снижение температуры газа в них достигает значений 15...25°C.

При проектировании число АВОГ выбирается в соответствии с отраслевыми нормами ОНТП 51-1-85 и руководящими документами РД 153-39.0-112-01. На основании этих норм температура технологического газа на выходе из АВОГ должна быть <15°C от средней температуры наружного воздуха. Уменьшение температуры технологического газа, поступающего в газопровод после его охлаждения, приводит к уменьшению средней температуры газа на линейном участке трубопровода и увеличению давления газа на входе в последующую станцию. Это приводит к уменьшению степени сжатия и энергозатрат на компримирование газа. В соответствии со статистическими данными средних температур окружающего воздуха для различных регионов разработаны точные графики оптимальных температур газа линейно-производственных управлений.

Однако процедура реализации данного технологического регламента и задач регулирования температуры газа на выходе не автоматизирована и решается путем включения определенного числа вентиляторов. Во многих случаях управление АВОГ производится по командам диспетчера вручную с местных пультов управления, расположенных перед аппаратами. Контроль состояния АВОГ также производится путем обхода и осмотра оборудования с фиксацией отказов и наработки по записям в формулярах и оперативных журналах. Эффективность управления АВОГ при такой организации эксплуатации компрессорных станций зависит от опыта и квалификации персонала, то есть субъективных факторов. В условиях значительных колебаний температуры и влажности воздуха (даже в течение суток), влияющих на процесс охлаждения газа, такое управление приводит к ошибкам поддержания оптимальной температуры газа и нерациональным затратам электроэнергии.

Суммарная мощность, потребляемая двигателями вентиляторов АВОГ в номинальном режиме одного компрессорного цеха, составляет сотни киловатт, что оказывает существенное влияние на общее энергопотребление магистрального газопровода, особенно с приводом нагнетателей от газотурбинных двигателей. Ежегодный расход электроэнергии на охлаждение компримированного газа может составлять 60...70% общего потребления на транспорт газа. Поэтому повышение эффективности и надежности работы АВОГ путем автоматической оптимизации температурных параметров средствами автоматизированного частотно-регулируемого

электропривода вентиляторов является важным фактором экономии топливно-энергетических ресурсов и снижения стоимости транспорта газа.

Разработанная АСУ вентиляторов АВОГ позволяет обеспечить:

- 1) непрерывность работы (суточную, сезонную, годовую) в продолжительном режиме SI со спокойным характером нагрузки. При этом исключаются пуско-тормозные режимы, которые даже при наличии мягких пускателей приводят к дополнительному энергопотреблению и снижению срока службы изоляции обмоток двигателей;
- 2) высокий технико-экономический эффект при регулировании вентиляторной нагрузки по закону $U/f^2 = const$, который обусловлен квадратичным снижением момента и кубическим снижением потребляемой мощности при снижении скорости вращения вентилятора АВОГ. Так, при требуемом снижении скорости вентилятора в 3 раза, нагрузка на привод падает в 9 раз, а потребляемая мощность — в 27 раз. То есть двигатель вместо 100 кВт будет потреблять только 3,7 кВт, а 96% мощности экономится;
- 3) возможность автоматически отслеживать случайные метеорологические и технологические изменения параметров, действующих на АВОГ и адекватно им задавать скорость ω_3 вентиляторов. Это позволяет корректировать охлаждающую способность АВОГ по управляющим алгоритмам в функции основных стохастических возмущений и обеспечить ее инвариантность при любых параметрах воздействий;
- 4) возможность работы вентиляторов даже в зимний сезон на низких («ползучих») скоростях, т.к. остановка их даже на непродолжительное время крайне нежелательна из-за переувлажнения обмоток двигателя, возможности разрушения подшипников и редуктора, а также «схлопывания» воздушного потока над АВОГ и образования наледи на лопастях вентиляторов;
- 5) стабилизацию главного технологического параметра АВОГ — температуры газа на выходе компрессорной станции путем ПИ-регулирования скорости вращения вентилятора в замкнутой САР при установленном оптимальном режиме охлаждения;
- 6) непрерывный мониторинг, диагностирование и прогнозирование работы оборудования АВОГ с использованием алгоритмов *fuzzy-logic*, реализованных на объектно-ориентированном языке Visual Basic с использованием среды разработки ADAMView;
- 7) возможность интегрирования локальных АВОГ в единую АСУТП и транспорта газа в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 14764-2002 и средой ОС Windows NT для мониторинга и управления с рабочего места оператора на ПК аппаратной частью комплекса автоматизации (рис. 1).

Реализация функций инвариантно-го управления является определяющей и предполагает применение для обработки и формализации данных статистических методов, входящих в общую теорию

планирования эксперимента [4]. Опыт эксплуатации АВОГ показывает, что наибольшее влияние на процесс охлаждения газа оказывают колебания значений четырех параметров:

- температуры окружающего воздуха θ , изменяющейся в диапазоне $\pm 40^\circ\text{C}$, и его влажности $\beta = 30 \dots 100\%$;
- температуры газа на входе или перепада температур до и после компримирования $\Delta t = 15 \dots 25^\circ$;
- массового расхода газа (производительность газопровода) Q .

При разработке новых и модернизации существующих АВОГ обработка исходных экспериментальных данных прототипа относится к задачам первого случая, а их анализ на действующей компрессорной станции и корректировка — ко второму. Так как скорость вращения ω вентилятора АВОГ задается в условиях одновременного случайного изменения всех параметров, для получения стабильной температуры охлажденного газа t_2 необходимо: получить и обработать достоверную информацию с соответствующих датчиков в цикле; вычислить оптимальную скорость вращения вентилятора по аналитическим регрессионным алгоритмам; скорректировать ее путем стабилизирующего действия обратной связи по выходной координате, то есть температуре охлажденного газа. Численные значения для индивидуальных АВОГ получают методами регрессионного анализа.

Автоматизация температурных режимов систем отопления и вентиляции. Специфика функционирования станций контроля и управления магистральных газопроводов выдвигает ряд специальных требований к эксплуатации систем зданий, расположенных на территории ЛПУМГ. Например, при срабатывании датчиков пожарной сигнализации часть системы приточно-вытяжной вентиляции должна быть полностью обесточена, и все воздушные заслонки закрыты, а часть системы, подающая воздух в аккумуляторную, должна оставаться в рабочем состоянии. В настоящее время разработаны системы приточно-вытяжной вентиляции для зданий компрессорных станций газопроводов Уренгой-Ужгород и Ямбург-Елец2.

В состав системы входят две подсистемы приточной и вытяжной вентиляции. В техническое задание на систему вентиляции включено (рис. 2):

- дистанционный и автоматический пуск и останов вентиляторов, сигнализация их работы;
- регулирование температуры приточного воздуха изменением теплопроизводительности воздухоподогревателя, то есть управление циркуляционным насосом и регулирование сервопривода смешительного вентиля. Насос обеспечивает постоянную циркуляцию воды в обогревателе. Вентиль с сервоприводом обеспечивает регулирование температуры смешением воды из обратного контура обогревателя и горячей воды. Чтобы во время регулирования не произошло полной остановки потока воды в тепловом контуре, узел оборудован байпасом;
- активная защита воздухоподогревателя от замерзания. При падении температуры

в обратном контуре ниже критической система формирует команду на выключение вентилятора, закрытие заслонки и полное открытие смесительного вентиля для максимального напора горячей воды;

- контроль температуры наружного воздуха перед обогревателем, температуры приточного воздуха после вентиляторов, температуры обратного контура водяного обогревателя;
- контроль засорения воздушного фильтра посредством датчика давления;
- отключение вентиляторов и закрытие воздушных заслонок при срабатывании датчиков пожарной сигнализации, кроме той части системы приточной вентиляции, которая обеспечивает подачу воздуха в аккумуляторный цех;
- запуск резервного вентилятора при аварийном отключении основного вентилятора системы.

В качестве исполнительных механизмов в системе вентиляции использованы компоненты, производимые фирмой Remake: датчики температуры типа Ni 1000 NS 120; дифференциальные датчики давления P33N; смесительные узлы SUMX 40-2,5; водяные обогреватели VO 50-25/3R; воздушные заслонки с сервоприводами LKSF 50-25/230; циркуляционные насосы UPS 25-40.

Работа системы в автоматическом режиме реализована с помощью программируемого контроллера MC8, трех релейных модулей MR8 и интерфейса связи RS-485 между контроллером и исполнительными механизмами, входящими в систему.

Конструктивно это устройство выполнено в виде шкафа, который содержит контроллер, релейные модули, блоки питания. Программирование контроллера производится в графической среде Конграф с помощью функциональных блоков.

Реальные аналоговые и дискретные входы контроллера и релейных блоков обозначаются красными прямоугольниками, а зелеными линиями — виртуальные входы/выходы, передающие команды по интерфейсу RS-485. Реальные входы/выходы контроллера подключаются к исполнительным механизмам системы.

Использование автоматизированной системы, учитывающей жесткие требования эксплуатации, позволяет значительно улучшить технические характеристики системы приточно-вытяжной вентиляции зданий компрессорных станций газопроводов. В настоящее время этой системой оснащены два из шести КЦ КС-24 Сеченовского ЛПУМГ.

Итоги

Представлены примеры успешной реализации проектов автоматизации основных и вспомогательных энергоустановок эффективного и энергосберегающего транспорта газа.

Выводы

1. Применение современных частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в качестве локальных систем автоматизации объектов магистрального транспорта газа позволяет обеспечить основные технологические требования и эффективные

показатели энергосбережения и надежности их работы.

2. Автоматическая стабилизация параметров ТП в условиях изменяющихся стохастических возмущений достигается использованием инвариантных структур электроприводов с адаптивными регрессионными алгоритмами.
3. Реализация комплекса требований по обеспечению функциональных возможностей объектов и систем компрессорных станций обеспечивается интеграцией локальных подсистем в рамках АСУ ТП с функциями мониторинга, телемеханики и диспетчеризации.

Список используемой литературы

1. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Крюков О.В. и др. Диагностика оборудования компрессорных станций: Монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр». Н. Новгород: Исток, 2013. Т. 2. 300 с.
2. Крюков О.В. Частотное регулирование производительности ГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 6. С. 39–44.
3. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Крюков О.В. и др. Электроприводы объектов газотранспортных систем: Монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр». Н. Новгород: Исток, 2013. Т. 4/6. 300 с.
4. Крюков О.В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество. 2008. № 9. С. 44–50.

ENGLISH

AUTOMATION

Automation of process power plants for effective gas transport

UDC 65.011.56: 622.691

Authors:

Oleg V. Kryukov — ph.d. in engineering sciences, associate professor¹; o.kryukov@ggc.nnov.ru

¹Giprogazcenter JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract

The features of hardware realization and software of automatic plants in compressor stations' ACS are considered. New structures and algorithms, providing the realization of functional capabilities of local ACS by objects of the main gas pipelines, are presented.

Materials and methods

Methods of automatic control systems of variable frequency electric drives.

Results

Examples of successful projects realization

of automation of the primary and auxiliary power plants of effective and power saving gas transport are presented.

Conclusions

1. The application of modern variable frequency asynchronous electric drives as local systems of automation of main gas transport objects allows to provide the main technological requirements and effective indices of energy saving and operational reliability.
2. Automatic stabilization of process parameters in the conditions of changing stochastic disturbances is reached by use

of invariant structures of electric drives with adaptive regressive algorithms.

3. Realization of a complex of requirements on provision of functional capabilities of objects and systems of compressor stations is provided with integration of local subsystems within the frameworks of APCS with functions of monitoring, telemechanics and dispatching.

Keywords

main gas transport, compressor station, gas compressor unit, variable frequency electric drive, gas air cooling unit, heating and ventilation systems, automation

References

1. Puzhaylo A.F., Savchenkov S.V., Kryukov O.V. and others. *Diagnostika oborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Diagnostics of compressor stations equipment]. Monography of the series Scientific works to the 45-th anniversary of Giprogazcenter. N. Novgorod: Iсток, 2013, Vol.2, 300 p.
2. Kryukov O.V. *Chastotnoe regulirovanie*

proizvoditel'nosti gazoperekachivayushchikh agregatov [Frequency regulation of GCU capacity]. Electric equipment: operation and repair, 2014, issue 6, pp. 39–44.

3. Puzhaylo A.F., Savchenkov S.V., Kryukov O.V. and others. *Elektroprivody ob'ektov gazotransportnykh sistem* [Electric drives of the objects of gas transport systems]. Monography of the series «Scientific works to

the 45-th anniversary of Giprogazcenter]. N. Novgorod: Iсток, 2013, Vol. 4/6, 300 p.

4. Kryukov O.V. *Regressionnye algoritmy invariantnogo upravleniya elektroprivodami pri stokhasticheskikh vozmushcheniyakh* [Regressive algorithms of invariant control of electric drives at stochastic disturbances]. Electricity, 2008, issue 9, pp. 44–50.