

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ

УДК 621.398

В.В. Никаноров, к.т.н., ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург, Россия), v.nikanorov@adm.gazprom.ru

М.А. Омелянцев, ПАО «Газпром», M.Omeliantsev@adm.gazprom.ru

С.Г. Марченко, ООО «Газпром трансгаз Москва» (Москва, Россия), marchenko@gtm.gazprom.ru

Л.И. Бернер, д.т.н., проф., АО «АтлантикТрансгазСистема» (Москва, Россия), berner@atgs.ru

Ю.М. Зельдин, к.т.н., АО «АтлантикТрансгазСистема», zeldin@atgs.ru

Оперативное диспетчерское управление газотранспортными системами является крайне сложной задачей из-за особенностей технологического объекта, который характеризуется большим количеством входов и выходов, существенной инерционностью, изменением граничных условий в процессе работы, сложностью критериев оптимальности. Для оказания помощи диспетчеру в их управлении предназначены системы поддержки принятия диспетчерских решений. В статье описаны такие системы для управления газотранспортными сетями в штатных и нештатных режимах, разработанные в 2007–2020 гг. в составе систем оперативного диспетчерского управления СПУРТ. Прослежена эволюция системы поддержки принятия диспетчерских решений от экспертных систем с жесткой логикой до систем управления с прогнозирующей моделью, представлены дополнительные подсистемы, улучшающие точность моделирования – подсистема прогнозирования газопотребления, программный комплекс выявления проблемных данных. Описан процесс управления газотранспортной системой с прогнозирующей моделью (проактивного управления), выбор горизонта прогноза и определение наилучшей стратегии управления для повышения эффективности работы газотранспортного предприятия. Переход к проактивному управлению газотранспортной системой возможен при гарантированной адекватности математической модели, что достигается применением нестационарных моделей в режиме онлайн с идентификацией условно-постоянных параметров газотранспортной сети. Показано, что эффективность работы газотранспортного предприятия является многокритериальным понятием, которое включает минимальные энергозатраты, обеспечение режимов работы оборудования, исключающих его ускоренный износ, сохранение запаса газа в системе при соблюдении технологических и контрактных ограничений и т.п. Для выбора стратегий управления, обеспечивающих наилучшую эффективность работы предприятия, предложено использовать методы искусственного интеллекта – нечеткую логику и нейронные сети. Обучение нейронных сетей должно производиться с использованием математического моделирования газотранспортной системы и экспертных знаний диспетчерского персонала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГАЗОТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА, ОПЕРАТИВНОЕ ДИСПЕТЧЕРСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ, СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА, УПРАВЛЕНИЕ С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ.

Основной задачей ГТП является выполнение плана транспорта газа, надежное и бесперебойное газоснабжение потребителей, которое необходимо обеспечить при максимально возможной эффективности работы ГТП [1]. При этом понятие «эффективность ГТП» включает не только минимум

топливно-энергетических затрат, но и обеспечение режимов работы оборудования, исключающих его ускоренный износ. Решать поставленные задачи приходится в условиях многочисленных технологических и контрактных ограничений (максимально допустимое давление в трубопроводе, максимально

допустимая скорость изменения давления, наличие резервных мощностей ГПА, минимально допустимое давление на входе ГПА и газораспределительных станций, контрактное давление в точках передачи контрагенту и т.п.), а также проводимых работ по техническому обслуживанию и ремонту

V.V. Nikanorov, PhD in Engineering, Gazprom PJSC (Saint Petersburg, Russia), v.nikanorov@adm.gazprom.ru

M.A. Omeliantsev, Gazprom PJSC, M.Omeliantsev@adm.gazprom.ru

C.G. Marchenko, Gazprom transgaz Moscow LLC (Moscow, Russia), marchenko@gtm.gazprom.ru

L.I. Berner, DSc in Engineering, prof., AtlanticTransgasSystem JSC (Moscow, Russia), berner@atgs.ru

Yu.M. Zeldin, PhD in Engineering, AtlanticTransgasSystem JSC, zeldin@atgs.ru

Application of artificial intelligence techniques for efficiency improvement of supervisory control and management of gas transmission system

Operational supervisory control of gas transmission systems is an extremely difficult task due to the peculiarities of technological facility, which is characterized by a large number of inputs and outputs, significant inertia, changes in boundary conditions during operation, and optimality criteria complexity. To assist operators in their management, dispatching decision support systems have been provided. Such systems for managing of gas transmission network in normal and abnormal regimes, developed as part of SPURT operational supervisory control systems in 2007–2020 years, are described in this article.

The evolution of dispatching decision support system is traced from the expert systems with rigid logic up to the model-based predictive control systems. Additional subsystems are presented, which improve the accuracy of modeling, such as predicting gas consumption subsystem and software for identifying problem data. The control process for gas transmission system with a predictive model (proactive management), the prediction horizon selection and determination of the best management strategy to improve the efficiency of gas transmission facility are described. The transition to the gas transmission system proactive management is possible only while the appropriateness of the mathematical model is guaranteed, which can be achieved by using in online mode the non-stationary models with identification of the conditionally constant parameters of gas transmission network. It is demonstrated that the efficiency of a gas transmission facility is a multi-criteria notion, which includes minimum energy consumption, ensuring of the equipment operation modes that exclude its accelerated wear, maintenance of gas amount in the system subject to technological and agreement restrictions, etc. It is proposed to use artificial intelligence techniques, such as fuzzy logic and neural networks, in order to select a management strategy which will ensure the best efficiency of the company operation. In this case the neural network training should be carried out using both mathematical model of gas transmission system and expert knowledge of the dispatching personnel.

KEYWORDS: GAS TRANSMISSION SYSTEM, OPERATIONAL SUPERVISORY CONTROL, DECISION SUPPORT SYSTEM, EXPERT SYSTEM, MODEL-BASED PREDICTIVE CONTROL.

ГТС. Повышение эффективности ГТП является многокритериальной задачей, не имеющей единственно верного решения. Диспетчер при управлении ГТС вынужден учитывать различные критерии, ранжируя их по важности [2], а также принимать во внимание инерционность газотранспортной системы. Решение, эффективное в моменте, может существенно отличаться от решения, эффективного за выбранный период, причем показатель эффективности становится известен только в конце периода.

В нештатном режиме работы ГТС – при разрыве газопровода – для уменьшения потерь и предотвращения аварийного останова оборудования требуется максимально быстро локализовать аварийный участок и обеспечить резервные пути движения газа. При этом необходимо учитывать текущий режим работы ГТС, отключенные

на ремонт участки, исправность запорной арматуры, наличие связи с контрольным пунктом линейной телемеханики и другие факторы. Принятие решения дополнительно осложняется наличием стрессовой ситуации, а также редкостью подобных событий. Скорее всего диспетчер будет локализовывать аварию единственный раз за все время работы.

Из-за приведенных выше особенностей оперативное управление ГТС в штатных и нештатных режимах требует от диспетчерского персонала высочайшей квалификации и опыта. Для уменьшения влияния человеческого фактора активно разрабатываются и внедряются СППДР [3]. В настоящей статье описаны СППДР, разработанные для объектов ПАО «Газпром» в 2006–2020 гг. Прослежено развитие СППДР от систем с жесткой логикой, предназначенных в основном для ликвидации нештатных

ситуаций, до систем, основанных на нестационарных математических моделях ГТС в режиме онлайн, позволяющих перейти к проактивному управлению газотранспортной системой.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ МЕЖПРОМЫСЛОВОГО КОЛЛЕКТОРА ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА УРЕНГОЙ»

Первой из систем, разработанных АО «АТГС» совместно со специалистами ООО «Газпром добыча Уренгой» для оказания помощи диспетчеру, была СППР межпромыслового коллектора ООО «Газпром добыча Уренгой», удостоенная премии ПАО «Газпром» в области науки и техники за 2010 г. [4].

Межпромысловый коллектор ООО «Газпром добыча Уренгой» представляет собой закольцованную систему газопроводов. Он состоит из двухниточного

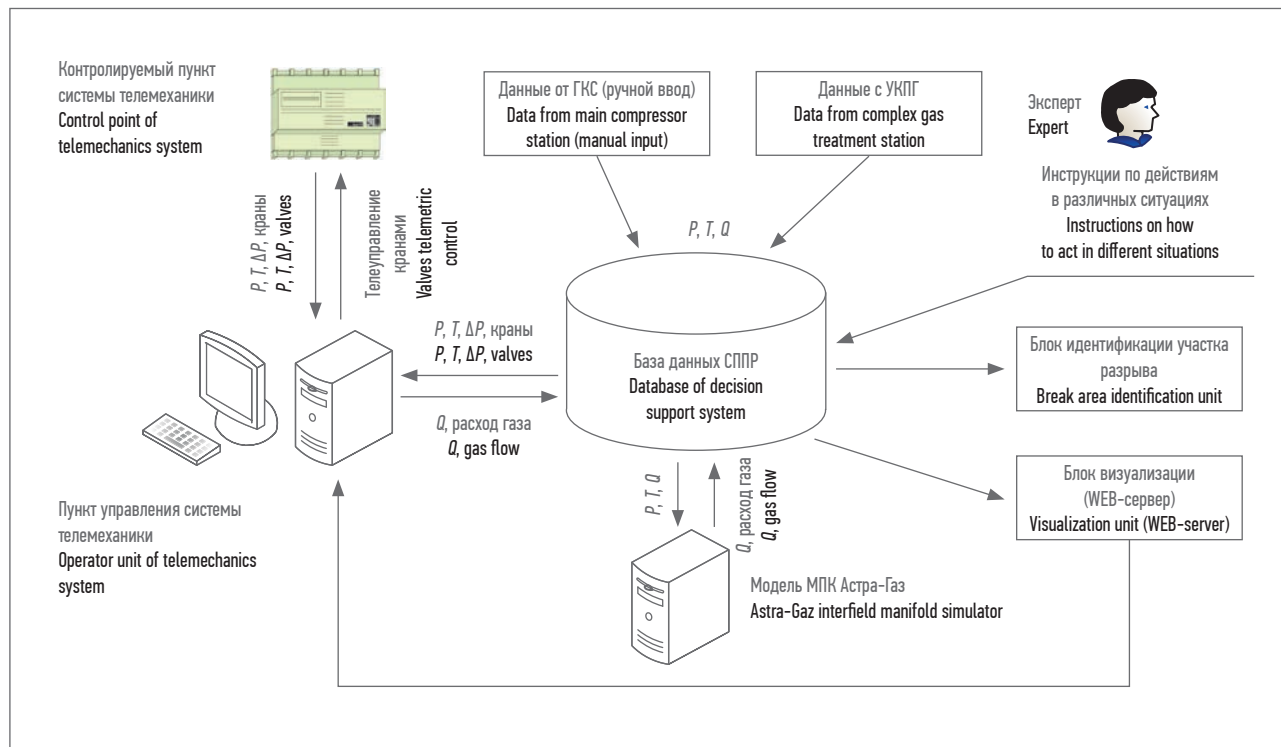


Рис. 1. Структура СППР МПК
 Fig. 1. The structure of decision support system for interfield manifold

Западного коридора и одно-, двухниточного Восточного коридора, соединенных четырьмя двухниточными перемычками. Протяженность коллектора с севера на юг составляет около 200 км, ширина от 20 до 50 км. Поступление газа в коллектор обеспечивают более двадцати УКПГ, соседние газодобывающие предприятия ПАО «Газпром», а также независимые поставщики. Отбор газа осуществляют четыре ГКС. Общее количество кранов в коллекторе – более тысячи. Это один из наиболее сложных в плане структуры и управления объектов единой системы газоснабжения России.

Целью диспетчерского управления МПК является надежная и эффективная подача заданного объема газа с газовых промыслов на ГКС. Оптимизация затрат осуществляется правильным выбором режима ДКС, которые, в свою очередь, работают в соответствии с объемами отбираемого из месторождений газа и величины пластового давления. Сложность управления МПК в штатном и не-

штатном режимах обусловлена следующими причинами:

- давление газа приблизительно одинаково по всему коллектору. Величины и направления потоков газа в участках коллектора изменяются в зависимости от режима и не всегда могут быть однозначно определены по давлениям;
- большое количество возможных режимов работы МПК, в том числе режимы с последовательной работой ДКС и разделением коллектора на несколько гидравлически не связанных частей;
- в нештатном режиме необходимо не только локализовать аварийный участок, но и обеспечить пути движения газа от всех УКПГ к ГКС. При этом из 43 крановых площадок МПК телемеханизировано только 13, что ограничивает возможности диспетчера по дистанционному переключению кранов.

В штатном режиме СППР визуализирует текущий режим работы МПК. Дополнительно к давлению и температуре на АРМ диспетчера отображаются величины и направления потоков газа в каж-

дом из участков коллектора, запас газа, а также состояние участков «в работе» или «перекрыт». Это позволяет оптимизировать работу МПК за счет более полного использования всех участков коллектора и избежать ошибок при смене режимов работы МПК. Расчет потоков производится ПВК моделирования «Астра-Газ» каждые 15 мин. В нештатном режиме система телемеханики МПК производит идентификацию возможного участка разрыва, СППР выдает диспетчеру рекомендации о действиях в сложившейся ситуации в текстовом и графическом видах. Рекомендации выбираются из базы знаний, в которой хранятся заранее разработанные экспертами правила для каждого участка, отличающиеся в зависимости от текущего режима. Структура СППР МПК приведена на рис. 1.

В настоящее время ведется сопровождение СППР МПК с учетом новых режимов работы коллектора: разделение на несколько гидравлически изолированных частей, работа участков МПК по схеме «ГП

в ГП». При этом было выявлено узкое место экспертных систем – сложность идентификации многочисленных режимов и описания действий диспетчера для каждого из них в заранее созданной базе знаний. Система поддержки принятия решений для нештатных режимов линейной части многониточного МГ свободна от данного недостатка. В ней рекомендации диспетчеру выдаются на основе автоматического расчета целевого состояния ГТС с учетом наложенных ограничений.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ НЕШТАТНЫХ РЕЖИМОВ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МНОГОНИТОЧНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Основной задачей СППР для линейной части многониточного МГ является гарантированная локализация аварийного участка за минимальное время. В этом случае СППР работает совместно с ПУ СЛТМ. На основе данных телемеханики СППР постоянно рассчитывает и отображает режимы работы участков МГ: «в работе» (газ по участку идет), «остановлен» (под газом, без газа), «авария». Возможен ручной ввод режима «проводятся плановые работы» и состояния крана «в ремонте». Отображение состояний участков на мнемосхеме АРМ диспетчера существенно увеличивает наглядность схемы и позволяет избежать ошибок при переключении запорной арматуры.

В нештатном режиме производится идентификация аварийного участка по волне давления, рассчитывается план переключений запорной арматуры для локализации и обхода аварийного участка, а также для сохранения питания ГРС. Разработан алгоритм, который позволяет выбрать необходимые для переключения краны, направление переключений с учетом запрещенных к открытию участков (на которых ведутся плановые работы), неисправных и неуправляемых кранов. При невозмож-

ности полного выполнения задачи алгоритм обеспечивает частичное решение (например, перекрытие аварийного участка, прохождение газа до следующей компрессорной станции, но при отключении питания ГРС). Определение плана переключений базируется на графе ГТС и целевых функциях доставки газа до конечных точек линейного участка МГ с учетом ограничений (локализация аварийного участка, запрет на использование остановленных участков, запрет на переключение кранов «в ремонте» и пр.).

Механизм работы СППР, реализующей указанные алгоритмы, следующий:

- телемеханика по скорости падения давления выявляет разрыв участка ГТС;

- СППР по сигналу «разрыв участка» запускает алгоритм расчета плана переключений для локализации разрыва и обеспечения обходных путей прохождения газа;

- СППР отображает предлагаемый план переключений на мнемосхеме АРМ диспетчера и предоставляет интерфейс для немедленной подачи всех требуемых команд телеуправления в режиме «одна кнопка»;

- если диспетчер согласен с предложенным планом переключений и запускает его, система выдает команды на переключение всех задействованных кранов с контролем максимального времени выполнения операции;

- если целевое состояние не достигнуто за заданное время, СППР рассчитывает и предлагает диспетчеру новое решение.

Разработка и внедрение СППР для линейной части многониточного МГ велись совместно со специалистами ООО «Газпром трансгаз Казань». Описанная выше СППР предназначена для управления ГТС в нештатных режимах. Повышение эффективности работы ГТС в штатных режимах обеспечивают следующие два класса систем: тренажер диспетчера и система управления с прогнозирующими моделями.

ТРЕНАЖЕР ДИСПЕТЧЕРА

Важной частью подготовки и повышения квалификации диспетчерского персонала являются тренажеры диспетчера. Тренажеры предназначены для формирования у диспетчера лучшего понимания того, как ГТС реагирует на различные стратегии управления и управляющие воздействия, какие из них и в каких ситуациях являются наиболее эффективными, в том числе для ГТС конкретного предприятия. Тренажеры диспетчера разработаны совместно со специалистами Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина, установлены в ООО «Газпром трансгаз Чайковский», ООО «Газпром добыча Уренгой», ООО «Газпром трансгаз Казань». В основе тренажеров лежит интерактивная нестационарная модель ПВК «Веста» [5] – цифровой двойник газотранспортной системы и СДКУ СПУРТ. Особенности данных тренажеров являются:

- интерфейс диспетчера, полностью повторяющий штатную СДКУ предприятия, включая видеокадры, тренды, события (тревоги);

- возможность как индивидуальных, так и групповых тренировок. Групповая тренировка предназначена для диспетчера ЦДП предприятия и нескольких диспетчеров филиалов. В ходе групповой тренировки моделируется вся ГТС предприятия, при этом диспетчерам филиалов доступна только часть видеокадров СДКУ, соответствующая зоне их ответственности;

- библиотека начальных режимов тренажера, соответствующая различным реальным режимам ГТС (зима, лето и др.);

- возможность ускорения виртуального времени, позволяющая наблюдать отдаленные последствия управляющих воздействий.

Тренажеры позволяют улучшить эффективность управления ГТС за счет предварительной оценки различных управляющих воздействий в типовых режимах работы конкретной ГТС (вариантное

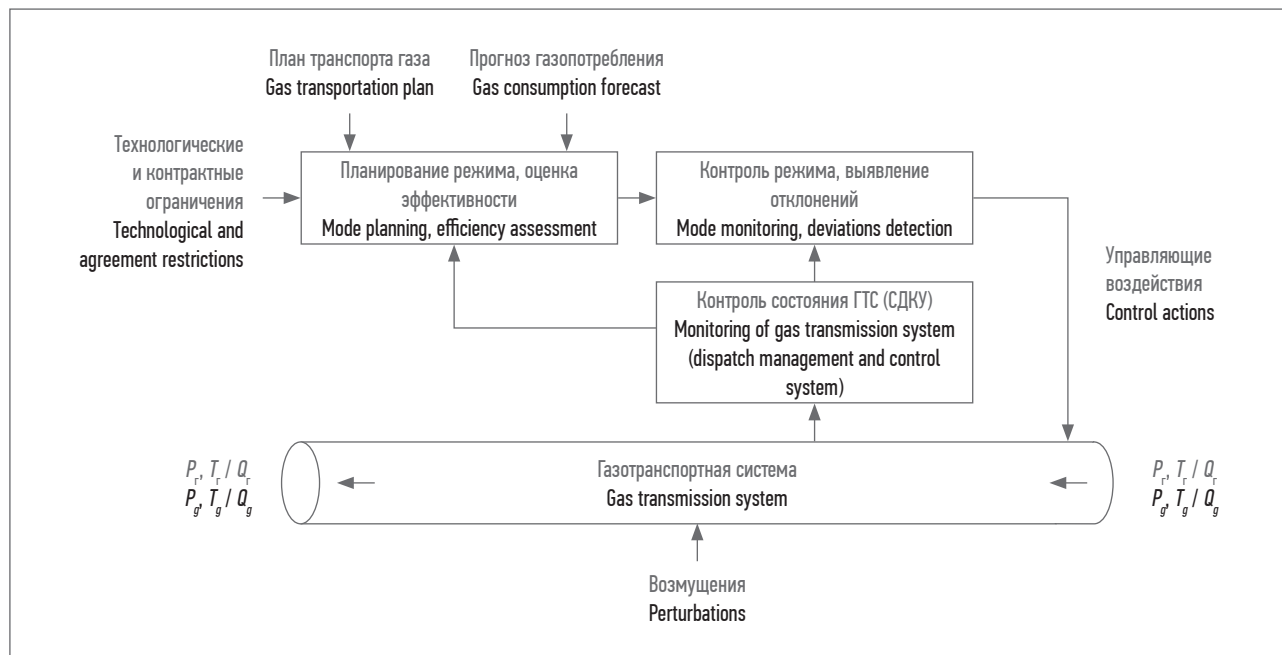


Рис. 2. Процесс оперативного диспетчерского управления ГТС
 Fig. 2. Process of operational supervisory control for gas transmission system

моделирование в режиме оф-лайн) и выбора лучшей стратегии. Разработка и внедрение компьютерных тренажеров подготовили базу для перехода к СППДР следующего поколения, реализующих проактивное управление ГТС, также известное как управление с прогнозирующей моделью.

УПРАВЛЕНИЕ ГТС С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ

Развитие диспетчерского управления ГТС на современном этапе предполагает переход на проактивный метод управления, при котором происходят определение наилучшего прогнозного состояния ГТС с его дальнейшим формированием путем выработки и реализации команд управления технологическими объектами с учетом времени реагирования системы на эти команды [1]. Проактивное управление особенно эффективно для нелинейных инерционных систем со множеством входов и выходов, к которым можно прилагать дискретные и непрерывные управляющие воздействия, разнесенные по времени. Именно таким объектом управления является газотранспортная система.

Работы по разработке системы непрерывного проактивного управления ГТС ведутся совместно с ООО «Газпром трансгаз Томск», а также с ООО «Газпром трансгаз Москва» для ГТС Московского промышленного узла.

Процесс оперативного диспетчерского управления ГТС схематично приведен на рис. 2. Целевой функцией процесса является гарантированное газоснабжение потребителей при максимально возможной эффективности работы ГТП. Процесс управления состоит из следующих циклически повторяющихся действий:

- планирование режима работы с учетом плана транспорта и распределения газа, текущего состояния ГТС, технологических и контрактных ограничений, плановых работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования;
- контроль параметров технологического процесса, выявление отклонений от плановых показателей;
- проведение корректирующих действий для установки и поддержания планового режима.

Проактивное управление ГТС при планировании режима ис-

пользует математическую модель, прогнозирующую поведение системы на выбранном горизонте времени. Процесс прогнозирования и планирование управляющих воздействий периодически повторяются, постоянно смещая границу горизонта [6]. Описанный метод позволяет употребить ресурсы системы на повышение ее запаса устойчивости и/или эффективности. Повышение эффективности достигается также за счет анализа поведения системы за период времени и принятия решений, которые обеспечат не мгновенную, а интегральную эффективность за выбранный период [7]. Как правило, горизонт прогнозирования при оперативном управлении газотранспортными системами составляет несколько суток.

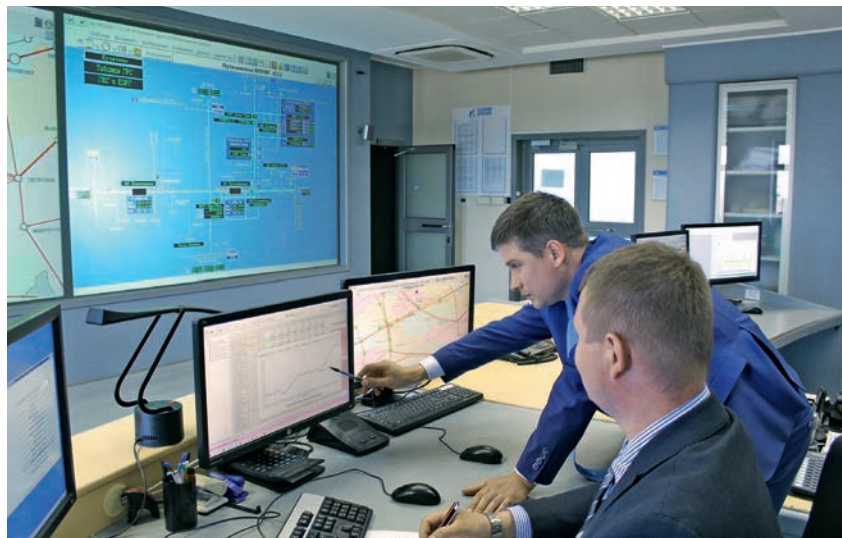
Управление с прогнозирующей моделью дает положительные результаты только при условии высокой точности прогноза, которая обеспечивается адекватной математической моделью ГТС и учетом прогнозных значений параметров на границах. АО «АТГС» совместно с партнерами в течение ряда лет ведет разработку и внедрение инструментов (подсистем), с по-

мощью которых возможен переход к проактивному управлению газотранспортными системами.

Одним из них является математическая модель ГТС «Волна» разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», работающая в нестационарном режиме онлайн [8]. Модель принимает из СДКУ фактические параметры с периодом 30–60 с и производит расчет режима ГТС в темпе процесса. Кроме того, постоянно производится сравнение расчетных и фактических значений, на базе которого корректируются условно-постоянные параметры ГТС (идентификация параметров модели). Совпадение фактических и расчетных параметров ГТС (с заданной точностью) гарантирует адекватность математической модели в каждый момент времени и возможность ее использования для текущего и вариантного прогнозирования состояния ГТС.

В настоящее время ПВК «Волна» в составе СОДУ СПУРТ используется в ООО «Газпром трансгаз Томск», ОсОО «Газпром Кыргызстан». В ходе эксплуатации она показала высокую скорость расчета, устойчивую работу в различных режимах, хорошее совпадение фактических и расчетных параметров как в режиме онлайн, так и при вариантном прогнозировании поведения ГТС по заданному плану переключений.

Для обеспечения адекватности модели необходимо гарантировать качество используемых фактических параметров ГТС при их количестве порядка нескольких десятков тысяч. В реальной системе из-за отказов датчиков, отсутствия связи и т. п. часть фактических параметров постоянно недостоверна. Обычно отбраковка грубых ошибок производится как в СДКУ, так и в ПВК моделирования автоматически. Для отбраковки менее явных ошибок был разработан программный комплекс выявления проблемных данных [9], помогающий избежать их использования в расчетах.



При расчете прогнозного режима ГТС обычно принимают граничные условия (давление, температуру или расход газа) постоянными в пределах прогнозного горизонта. Для ГТС с большой долей распределяемого газа это существенно снижает точность прогноза. Для повышения точности необходимо учитывать суточную неравномерность газопотребления по каждому потребителю, для чего разработан соответствующий программный комплекс прогнозирования газопотребления [10].

В ходе расчета прогнозного режима ГТС может возникнуть ситуация, когда из-за достижения технологических ограничений невозможно обеспечить заданные условия на границах. Например, из-за минимально допустимого давления на входе ГРС невозможно обеспечить прогнозное потребление газа. Обычно в этом случае модель ГТС сигнализирует о невозможности дальнейшего счета и останавливается. Комплекс моделирования «Волна» при достижении ограничений меняет граничные условия с расхода на давление и температуру и продолжает расчет в режиме ограничения потребителя.

Важное значение имеют оценка прогнозных режимов по эффективности и выбор наилучшей стратегии управления. Как было отмечено выше, эффективность управления

ГТС является многокритериальной задачей, не имеющей единственного решения. При оценке необходимо принимать во внимание изменение запаса газа в системе, которое существенно влияет как на текущие, так и на будущие энергозатраты за пределами горизонта прогноза [11]. В настоящее время выбор наилучшей стратегии управления производится диспетчером. В перспективе эта задача должна быть решена с помощью инструментов искусственного интеллекта, таких как нечеткая логика (с различными весовыми коэффициентами для различных критериев эффективности) и нейронные сети. Для обучения нейронной сети потребуется набор хороших и плохих решений, которые могут быть получены с использованием вариантного моделирования ГТС и диспетчеров-экспертов.

Таким образом, разработанные подсистемы позволяют перейти к непрерывному проактивному управлению, при котором в режиме онлайн постоянно рассчитывается прогнозное состояние ГТС с учетом прогноза газопотребления, и управление газотранспортной системой производится с учетом этого прогноза. В 2021–2022 гг. планируются работы по внедрению системы в ООО «Газпром трансгаз Москва», ООО «Газпром трансгаз Томск». ■

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

List of abbreviations

АРМ – автоматизированное рабочее место	AWP – automated workplace
ГКС – головная компрессорная станция	BCS – booster compressor station
ГПА – газоперекачивающий агрегат	CDP – central dispatch point
ГРС – газораспределительная станция	CGTS – complex gas treatment station
ГТП – газотранспортное предприятие	CP – control point
ГТС – газотранспортная сеть	DDSS – dispatching decision support system
ДКС – дожимная компрессорная станция	DMCS – dispatch management and control system
КП – крановая площадка	DSS – decision support systems
МГ – магистральный газопровод	IFM – interfield manifold
МПК – межпромысловый коллектор	GCU – gas compressor unit
ПВК – программно-вычислительный комплекс	GDS – gas distribution station
ПУ – пунктом управления	GTF – gas transmission facility
СДКУ – система диспетчерского контроля и управления	GTN – gas transmission network
СЛТМ – система линейной телемеханики	LTS – linear telemechanics system
СППР – система поддержки принятия решений	MCS – main compressor station
СППДР – система поддержки принятия диспетчерских решений	MGP – main gas pipeline
УКПГ – установка комплексной подготовки газа	SCC – software and computing complex
ЦДП – центральный диспетчерский пункт	VS – valves site

ЛИТЕРАТУРА

1. Никаноров В.В., Видрашку А.С., Якимов О.Е., Мурзенко И.В. Вопросы создания систем оперативного диспетчерского управления в современных условиях // Газовая промышленность. 2012. Спецвыпуск № 680. С. 13–17.
2. Гусев А.В., Киреев А.Ю. Структурный анализ состояния и перспективы развития диспетчерского управления ЕСГ РФ // Газовая промышленность. 2019. № 2 (780). С. 16–22.
3. СТО Газпром 8–005–2013. Диспетчерское управление. Инструменты диспетчерского управления. Системы поддержки принятия диспетчерских решений. Общие требования. М.: ОАО «Газпром», 2014.
4. Ланчаков Г.А., Никаноров В.В., Бернер Л.И. и др. Система поддержки принятия решений в составе системы телемеханики межпромыслового коллектора // Газовая промышленность. 2007. № 5. С. 35–37.
5. Губкинский университет. Программно-вычислительный комплекс «Веста-Тренажер» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://gubkin.ru/general/structure/iiept/practical_realization/supervisory_control/Vesta-Trenajor\(buklet\).pdf](https://gubkin.ru/general/structure/iiept/practical_realization/supervisory_control/Vesta-Trenajor(buklet).pdf) (дата обращения 24.05.2021).
6. Purdue University. Zak S.H. An Introduction to Model-based Predictive Control (MPC). ECE 680. 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://engineering.purdue.edu/~zak/ECE680/MPC_handout.pdf (дата обращения 24.05.2021).
7. Марченко С.Г. Общая схема решения задачи оптимизации поставок природного газа потребителям промышленного кластера // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. № 3. С. 43–47.
8. Анучин М.Г., Анучин М.Г., Анфалов А.А. и др. Моделирование транспорта природного газа в режиме онлайн. Программно-вычислительный комплекс «Волна» // Нефть. Газ. Новации. 2017. № 5(198). С. 27–35.
9. Зельдин Ю.М., Илюшин С.А., Плюснин И.П. Программный комплекс выявления проблемных данных в системах оперативного диспетчерского управления // Автоматизация в промышленности. 2017. № 4. С. 14–16.
10. Никаноров В.В., Марченко С.Г., Бернер Л.И. и др. Подсистема прогнозирования газопотребления // Автоматизация в промышленности. 2017. № 4. С. 20–21.
11. Сухарев М.Г., Попов Р.В. Состояние и перспективы совершенствования математического и компьютерного обеспечения в сфере оперативного управления и среднесрочного планирования режимов крупномасштабных газотранспортных систем // Вести газовой науки. 2018. № 2(34). С. 4–13.

REFERENCES

- (1) Nikanorov VV, Vidrashku AS, Yakimov OE, Murzenko IV. Issues of operational dispatch control systems creation in modern conditions. *Gas Industry [Gazovaya promyshlennost']*. 2012; 5(680): 13–17. (In Russian)
- (2) Gusev AV, Kireev AYU. Structural analysis of the state and prospects of development of centralized control of the unified gas supply system of the Russian Federation. *Gas Industry*. 2019; 2(780): 16–22. (In Russian)
- (3) Gazprom OJSC. STO Gazprom 8–005–2013. Dispatch control. Dispatch management tools. Dispatch decision support systems. General requirements. Moscow: Gazprom OJSC; 2014 (In Russian)
- (4) Lanchakov G.A., Nikanorov V.V., Berner L.I., et al. Decision support system as part of telemechanics system of the interfield reservoir. *Gas Industry*. 2007; (5): 35–37. (In Russian)
- (5) Gukin University. *Software and computing complex "Vesta-Trainer"*. Available from: [https://gubkin.ru/general/structure/iiept/practical_realization/supervisory_control/Vesta-Trenajor\(buklet\).pdf](https://gubkin.ru/general/structure/iiept/practical_realization/supervisory_control/Vesta-Trenajor(buklet).pdf) [Accessed: 24 May 2021]. (In Russian)
- (6) Purdue University. Zak S.H. An Introduction to Model-based Predictive Control (MPC). ECE 680. 2017. Available from: https://engineering.purdue.edu/~zak/ECE680/MPC_handout.pdf [Accessed: 24 May 2021].
- (7) Marchenko SG. General Scheme for Optimization of Natural Gas Supply for Industrial Cluster Consumers. *Information technologies in science, education and management [Informatsionnyye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii]*. 2018; (3): 43–47. (In Russian)
- (8) Anuchin MG, Anuchin MG, Anfalov AA, et al. Online modeling of natural gas transport. Software and computing complex "Volna". *Oil. Gas. Innovations [Neft'. Gaz. Novatsii]*. 2017; 5(198): 27–35. (In Russian)
- (9) Zeldin YuM, Ilyushin SA, Plyusnin IP. Software complex for identifying problem data in operational dispatch control systems. *Automation in industry [Avtomatizatsiya v promyshlennosti]*. 2017; (4): 14–16. (In Russian)
- (10) Nikanorov VV, Marchenko SG, Berner LI, et al. Subsystem for forecasting gas consumption. *Automation in industry*. 2017; (4): 20–21. (In Russian)
- (11) Sukharev MG, Popov RV. Status and prospects for improving math support and software for operational control and medium-term planning of large-scale gas transmission systems. *Gas Science News [Vesti gazovoy nauki]*. 2018; 2(34): 4–13. (In Russian)