

## Метод синтеза алгоритма управления балансом газа в региональной газотранспортной системе

А. К. Петрова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

ak72p@yandex.ru

**Аннотация.** Повышение эффективности газотранспортной отрасли является актуальной задачей. Для ее решения газотранспортная система рассматривается как объект управления, построен граф модели системы управления балансом газа, определяется метод синтеза алгоритма управления, решаются задачи топологического, структурного и параметрического синтеза. В статье рассматривается возможность применения метода управления на основе дискретного автомата, а также методов машинного обучения, в частности LSTM-нейронных сетей, определены наборы их входных параметров и гиперпараметров, приведена классификация причин небаланса на основе матрицы критичности, построена модель газотранспортной системы в среде MatLab.

**Ключевые слова:** газотранспортная система, баланс газа, магистральный газопровод, синтез, алгоритм управления, дискретный автомат, причины небаланса, методы машинного обучения, LSTM-нейронные сети

**Для цитирования:** Петрова А. К. Метод синтеза алгоритма управления балансом газа в региональной газотранспортной системе // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 6. С. 42–51. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-42-51.

Original article

## Development of an Algorithm for Controlling the Gas Balance in a Regional Gas Transmission System

A. K. Petrova

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

ak72p@yandex.ru

**Abstract.** Improving the efficiency of the gas transportation industry is a relevant task. In this work, the gas transmission system is considered as a control object. The graph of a model describing a gas balance control system is constructed. A method for synthesis of a control algorithm is determined. Topological, structural and parametric synthesis problems are solved. This article discusses the possibility of using a control method based on a discrete automaton and machine learning methods, in particular, LSTM neural networks. Sets of their input parameters and hyper parameters are determined; imbalance causes are classified based on a criticality matrix. A model of the gas transmission system was built in the MatLab environment.

**Keywords:** gas transmission system, gas balance, main gas pipeline, synthesis, control algorithm, discrete automaton, imbalance causes, machine learning methods, LSTM neural networks

**For citation:** Petrova A. K. Development of an Algorithm for Controlling the Gas Balance in a Regional Gas Transmission System // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 6. P. 42–51. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-42-51.

**Введение.** Эффективность управления транспортировкой газа в системе магистральных газопроводов определяется в том числе балансом газа

в региональной газотранспортной системе (ГТС) [1]. Разница между объемом газа, поступившим и отобраным из системы за отчетный период [2], [3],

или небаланс, может возникнуть вследствие влияния различных внешних и внутренних факторов – изменения глобальных климатических условий, устаревающего оборудования, влияния человеческого фактора, недостатков организационного характера, протяженности трасс, наличия большого количества населенных пунктов и сложной разветвленности теплотрасс в них, – все это может оказывать влияние на течение физических процессов транспорта газа. Для эффективного управления бизнес-процессами добычи, транспортировки, хранения и распределения углеводородов правление ПАО «Газпром» 17 дек. 2021 г. «одобрило Стратегию цифровой трансформации Группы „Газпром“ на период 2022–2026 гг. [4]. Стратегия направлена на дальнейшее повышение гибкости управления бизнесом, создание новых направлений для его развития, а также рост эффективности и безопасности производства». Наличие негативно влияющих факторов, с одной стороны, и необходимость внедрения цифровых технологий в рамках цифровой трансформации, с другой стороны, обуславливают актуальность разработки новых и совершенствования с использованием цифровых технологий, существующих методов, моделей и алгоритмов управления производственными ресурсами ГТС.

**Система управления балансом газа как объект управления.** Модель системы управления балансом газа первого топологического ранга [5]

представлена на рис. 1, где  $Q_{неб}$  – объем небаланса на выходе ГТС;  $Q_{неб. зад}$  – заданная, или допустимая, величина небаланса;  $p_{зад}$  – заданный уровень давления в ГТС;  $p_{кор}$  – корректирующее давление, для поддержания баланса;  $Q_{п}$  – расходы для поддержания баланса, включающие в себя: дополнительный объемный расход газа, возникший вследствие корректирующего давления компрессора, компенсацию расчетно-методической погрешности вычисления запаса, расходы на дополнительные поверки средств измерений, корректировку расчетов, применение системы контроля утечек, проверки попадания в газ влаги или кислорода, наличия врезок и т. п., закрытие вентиля до устранения утечки;  $Q_{п. зад}$  – заданный уровень усилий для поддержания баланса на основе критерия минимизации затрат;  $\sigma$  – параметр внешних воздействий, объединяющий факторы-причины небаланса:  $T_{окр}$  – температуру окружающей среды,  $p_{атм}$  – атмосферное давление,  $K_{тр}$  – состояние трубопровода,  $K_{орг}$  – организационные факторы (ошибки операторов, нарушение договоров поставок и процедур учета, незаконный отбор, корректность расчета величин запаса и собственных нужд),  $\Delta_{с.и}$  – погрешности средств измерения, а также факторы, характеризующие состояние рабочей среды (газа): компонентный состав  $K_{г}$ , температуру  $T$  и коэффициент сжимаемости  $Z$ .

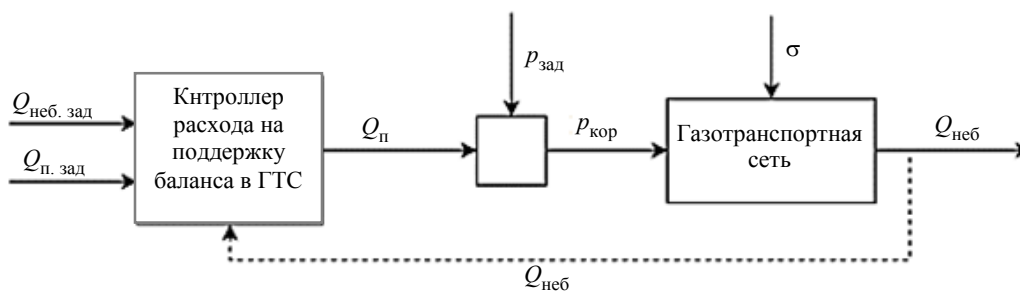


Рис. 1. Модель первого топологического ранга системы управления балансом газа в ГТС

Fig. 1. First topological rank model of a gas balance control system in GTS

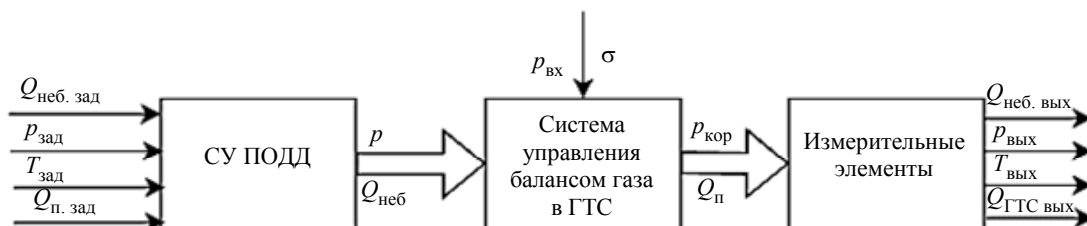


Рис. 2. Система управления балансом газа как объект управления

Fig. 2. Gas balance management system as a control object

Система управления балансом газа как объект управления представлена на рис. 2. Здесь объект управления дополнен исполнительными органами (СУ ПОДД) и измерительными элементами.

Управляющими служат воздействия системы поддержания баланса  $Q_{\text{неб. зад}}$ ,  $Q_{\text{п. зад}}$  и системы подачи газа с заданными давлением  $p_{\text{зад}}$  и температурой  $T_{\text{зад}}$ ,  $p$  – давление на выходе ГТС.

В качестве измерительных элементов используются физические датчики, с которых поступают данные о параметрах газа, давлении  $p_{\text{вых}}$  и температуре  $T_{\text{вых}}$ . Данные технологического процесса учета расхода газа, проходящего через элементы ГТС (газоизмерительные и газораспределительные станции), а также о небалансе, расходах на поддержание баланса, запасе в магистральном газопроводе, затратах на собственные нужды, здесь обобщенно показаны как  $Q_{\text{ГТС вых}}$ . Объем запаса газа в магистральном газопроводе, расход на собственные нужды и расход на устранение небаланса непосредственно не измеряются, а определяются через виртуальные датчики, т. е. вычисляются по данным физических датчиков.

Для эффективной работы системы транспорта газа необходимо решить задачу оптимизации [6]. Цель оптимизации управления балансом газа состоит в определении с учетом технологических ограничений режима работы сети магистрального газопровода, обеспечивающего максимальное значение критерия оптимизации и удовлетворяющего заданным граничным условиям на входах и выходах сети.

Набор условий оптимизации включает в себя:

- необходимость первоочередного устранения причин, которые могут создавать пожарную и взрывоопасность;
- необходимость выполнения договоров поставок;
- необходимость выполнения регламентов по затратам на транспортировку;
- минимизацию расходов на мероприятия по поддержанию баланса.

**Задачи синтеза системы управления балансом газа.** Эти задачи заключаются в построении математической модели, способной достигать цели управления с требуемым качеством технологических процессов. На начальном этапе можно говорить о проектировании системы

управления. Вследствие наличия в модели измерительных элементов процесс разработки системы управления состоит в создании информационно-алгоритмической структуры.

Синтез – это выбор сочетаний элементов системы с целью обеспечения оптимального, с учетом заданного критерия, управления системой [5]. По уровню неопределенности задачи можно классифицировать следующие задачи синтеза:

- топологический синтез обеспечивает выбор топологии системы;
- вследствие структурного синтеза формируется структура системы, т. е. выбор места включения управляющего устройства;
- настройки параметров этой системы являются задачей параметрического синтеза.

В первую очередь необходимо решить задачу топологического синтеза, т. е. выбрать место включения управляющего устройства (УУ), после этого решать задачу структурного синтеза, в которой выбирается тип УУ, и далее – задачу параметрического синтеза, т. е. расчет его настроек [5]. Все три задачи связаны между собой.

В систему управления балансом газа в ГТС необходимо включить следующие задачи для ее подсистем, реализуемые, согласно модели, соответствующими виртуальными датчиками, т. е. синтез:

- компенсации изменений в запасе газа в магистральном газопроводе;
- линии обратной связи для управления расходом на поддержание баланса;
- алгоритма системы контроля за расходом газа на собственные нужды.

На рис. 3 представлен граф модели системы управления балансом газа.

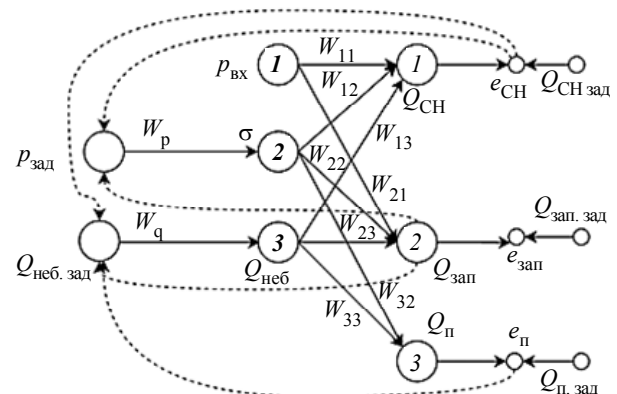


Рис. 3. Граф модели системы управления балансом газа  
Fig. 3. Graph of the gas balance control system model

На рис. 3 топология модели представлена от вершин возмущений  $I$  (давление на входе ГТС,  $p_{вх}$ ),  $2$  (возмущающих воздействий,  $\sigma$ ) и  $3$  (уровень небаланса,  $Q_{неб}$ ) до вершин управляемых переменных  $I$  (расходы на собственные нужды,  $Q_{СН}$ ),  $2$  – запас газа в магистральном газопроводе (МГ),  $Q_{зап}$ ) и  $3$  (расходы на поддержание баланса,  $Q_{п}$ ) на выходе ГТС.

Передачными функциями  $W_{11}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_{13}$ ,  $W_{21}$ ,  $W_{22}$ ,  $W_{23}$ ,  $W_{32}$ ,  $W_{33}$ , представлены отношения между соответствующими вершинами. Дуги  $W_p$ ,  $W_q$  на входе моделируют исполнительные органы, подсистему регулирования давления в ГТС и объема небаланса, который в идеале должен быть равен нулю.

Со стороны выхода в модели находятся виртуальные датчики расхода на собственные нужды, запаса в магистральном газопроводе и расходов на поддержание баланса с заданными значениями. В результате получаются расхождения, инвариантные и к возмущениям, и к заданиям ( $e_{СН}$ ,  $e_{зап}$ ,  $e_{п}$ ). На вход подаются команды управляющего устройства, на выходе принимается информация о состоянии баланса в ГТС и ошибках в подсистемах.

**Топологический синтез системы управления балансом газа.** Достаточное условие абсолютной инвариантности выходной переменной к возмущению заключается в отсутствии пути в графе системы между вершинами, отвечающими за эти элементы [5]. Анализ сигнального графа на рис. 3 выявляет наличие путей от вершины  $I$  (давление на входе системы  $p_{вх}$ ) и  $2$  (возмущающих воздействий,  $\sigma$ ) до вершин управляемых переменных  $I$  (расходы на собственные нужды,  $Q_{СН}$ ),  $2$  (запас в МГ,  $Q_{зап}$ ) и  $3$  (расходы на поддержание баланса,  $Q_{п}$ ) на выходе ГТС. Таким образом, можно сделать вывод, что неконтролируемые изменения давления и возмущающих воздействий могут влиять на управляемые переменные.

При этом задачей топологического синтеза становится выбор такой структуры, в результате применения которой будет ослаблено влияние возмущающих воздействий, т. е. необходимо выбрать управляющие воздействия, которые обеспечат инвариантность возмущений и управляемых переменных [5], например определить, какое из управляющих воздействий эффективнее ослабляет влияние возмущений на технологиче-

ские параметры процесса управления балансом. Топологический этап синтеза инвариантной системы состоит в том, чтобы выбрать вершину графа на рис. 3, куда должно быть приложено управляющее воздействие. Пунктирные дуги на рис. 3 показывают некоторые варианты организации причинно-следственных связей системы управления балансом газа. Например, управляя расходом на собственные нужды, поддержание баланса и величиной запаса, можно влиять на небаланс и давление в сети.

По результатам топологического синтеза системы управления балансом газа образуются две подсистемы со своими функциями и целями управления: функция поддержания давления в сети и функция сохранения небаланса в заданном допустимом диапазоне. Каждая подсистема преследует свою цель, при этом решения каждой – возмущающие друг для друга, например в случае возникновения небаланса во второй подсистеме одной из возможностей для его компенсации может стать подача дополнительного давления в ГТС, что противоречит задачам первой подсистемы.

В качестве основы для выбора того или иного решения для поддержания баланса по результатам анализа литературных источников и опроса экспертов предложена классификация причин небаланса на основе матрицы критичности, в зависимости от вероятности возникновения фактора-причины и значимости последствий, представленная в табл. 1 [7]. Данная таблица основана на подходе FMEA (Failure modes and effects analysis) – анализе причин и последствий отказов, применяющемся в сфере информационной безопасности, согласно ГОСТ Р 27.303–2021, ФЗ № 149, 187 и другим нормативным документам. Это – метод анализа, применяемый в менеджменте качества для определения потенциальных дефектов (несоответствий) и причин их возникновения в изделии, процессе или услуге. На основе этих данных можно построить матрицу критичности, где классифицируются виды угроз в зависимости от вероятности возникновения и значимости последствий.

Вероятность возникновения причины небаланса складывается из вероятностей неисправности оборудования, ошибок в организации процессов, внешних аномалий и т. п. Вероятность 90–95 % означает, что причина возникновения небаланса почти неизбежна, вероятность 0–10 % означает, напротив, что скорее всего, она не возникнет. Значение по этому критерию определяется на основе анализа мнений экспертов и истори-

ческих данных. Следующие числовые оценки по шкале от 1 до 5 соответствуют описаниям вероятности возникновения каждой причины небаланса:

- 1 – крайне маловероятна;
- 2 – минимальна;
- 3 – иногда может возникнуть;
- 4 – возникает с высокой вероятностью;
- 5 – неизбежна в течение наблюдаемого периода времени.

Значимость последствий описывает конкретные результаты воздействий, возникающие вследствие тех или иных факторов-причин небаланса. Набор числовых оценок значимости последствий по шкале от 1 до 5 сформирует следующие категории:

- 1 – ухудшенный функционал одного из элементов функции или бизнес-процесса ГТС;
- 2 – ухудшенный функционал функции или бизнес-процесса ГТС;
- 3 – прерывистый функционал ГТС;
- 4 – частичный или ухудшенный функционал ГТС;
- 5 – полный сбой, останов транспорта газа в ГТС.

Табл. 1. Матрица критичности причин небаланса  
 Tab. 1. Criticality matrix of imbalance causes

Значимость последствий	Вероятность возникновения причины небаланса				
	1	2	3	4	5
5	ФПН2	ФПН1	ФПН1	ФПН1	ФПН1
4	ФПН2	ФПН2	ФПН1	ФПН1	ФПН1
3	ФПН3	ФПН2	ФПН2	ФПН1	ФПН1
2	ФПН3	ФПН3	ФПН2	ФПН2	ФПН1
1	ФПН3	ФПН3	ФПН3	ФПН2	ФПН2

В табл. 1 показаны факторы-причины аномалий в система управления балансом газа в ГТС, которые можно распределить на три группы:

- Факторы-причины небаланса 1-го типа (ФПН1) – связанные с наличием значительных изменений в фактических объемах газа (свищ, резкие скачки параметров при изменении погодных условий, отбор газа без его учета (врезка), авария, разрыв). Ячейки с этими факторами заполнены темно-серым цветом в табл. 1.

- Факторы-причины небаланса 2-го типа (ФПН2) – связанные с наличием незначительных изменений в физических объемах газа (повышение коэффициента шероховатости внутри стенок, негерметичность фланцевых соединений, механические примеси). Ячейки с этими факторами выделены в табл. 1 светло-серым цветом.

- Факторы-причины небаланса 3-го типа (ФПН3) – не связанные с наличием изменений в фактических объемах газа (погрешность или отклонения в работе средств измерения, упрощенная линеаризация аналитических выражений расчетных величин, ошибки в расчетах запаса газа и пр.). Ячейки с этими факторами в табл. 1 заполнены белым цветом.

При возникновении небаланса вследствие ФПН3 следует воздействовать на него при помощи мероприятий по поддержанию баланса; при ФПН1 – корректировать подачу газа при помощи понижения давления или полного прекращения подачи газа; при ФПН2 – принимать решение на основе критериев оптимизации [6].

**Структурно-параметрический синтез системы управления балансом газа.** В результате выбора места включения дуги управления следующим этапом становится выбор типа регулятора или контроллера. Структурный синтез селективно инвариантных систем представляет собой определение количества дуг, равного числу вершин воздействия [5]. Для корректирования возмущений контур системы управления балансом газа включает в себя линию обратной связи.

Система управления балансом – иерархическая [8], в нее входят исполнительные органы, подсистемы управления запасом, расходом на собственные нужды и на поддержание баланса. Баланс газа  $Q_{неб}$  определяется объемами газа, проходящими через газоизмерительную станцию (ГИС) на входе региональной ГТС –  $Q_{ГИС\ вх}$ , закачанными в подземное хранилище газа (ПХГ) –  $Q_{ПХГ}$ , направляемыми потребителям через газораспределительные станции (ГРС) –  $Q_{ГРС}$ , запаса в МГ  $Q_{зап}$  и израсходованного на СН  $Q_{СН}$  и переданного в следующий регион через ГИС на выходе ГТС –  $Q_{ГИС\ вых}$ . Все эти величины определяются на основе того или иного метода измерения расхода газа, применяемого в ГТС.

Требуется идентифицировать отклонения в параметрах технологического процесса учета расхода газа и классифицировать их определенным образом, чтобы своевременно устранять причины. В качестве регулятора рассматривается применение дискретного автомата. Поскольку количество выходов автомата, т. е. количество

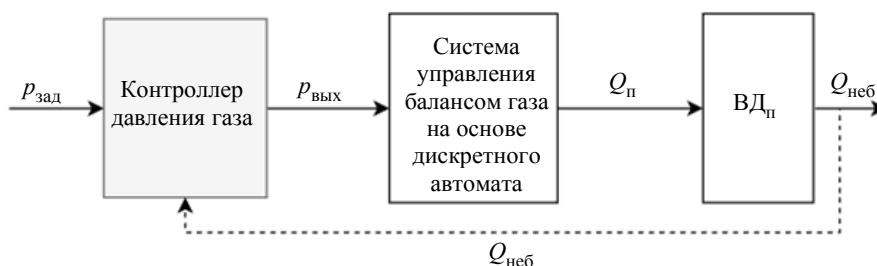


Рис. 4. Структура системы управления балансом газа на основе дискретного автомата

Fig. 4. Structure of the gas balance control system based on a discrete automaton

мер по устранению отклонений в ТП учета расхода газа в системе управления балансом. Для данной задачи применяется конечный автомат, при котором отображение  $t: S \times A \rightarrow S$ , где множества  $S$  и  $A$  конечны,  $S$  – множество состояний автомата,  $A$  – алфавит [9]–[12].

Переменная «небаланс» может находиться в одном из четырех рабочих состояний («норма», «большое отклонение», «среднее отклонение», «малое отклонение»).

На рис. 4 показана структура системы управления балансом газа в ГТС на основе дискретного автомата. На рис. 4 ВДП – виртуальный датчик действий по поддержанию баланса. В зависимости от характера отклонений, принимается решение о том или ином воздействии.

Для идентификации отклонений параметров расхода газа и выявления небаланса в ГТС анализируются следующие характеристики отклонений:

- величина отклонений значений параметров учета расхода газа от значений, определенных нейронной сетью, обученной на статистических данных;
- длительность этих отклонений во времени;
- скорость возрастания отклонений.

Каждому состоянию системы управления балансом газа, определенному на основе сочетания параметров аномалий, соответствует определенное корректирующее воздействие.

Структуру дискретного автомата можно описать формулой [9]–[12]:

$$Q = F(x, y, s, F, G, t),$$

где  $x$  – набор векторов входных переменных, здесь параметров аномалий;  $y$  – набор векторов выходных сигналов, в данной задаче – объемов небаланса;  $s$  – набор состояний автомата, набор факторов-причин, вследствие влияния которых возникли аномалии;  $t$  – момент времени, в который осуществляется переход;  $F$  – функция переходов, мероприятия по поддержанию баланса:

$$s_{t+1} = F(s_t, x).$$

Согласно регламентам ООО «Газпром трансгаз» Санкт-Петербург и результатам опроса экспертов газовой области, для устранения небаланса осуществляются следующие мероприятия:

1. Компенсация за счет расчетно-методической погрешности вычисления запаса газа.
2. Плановая поверка средств измерений.
3. Внеплановая поверка средств измерений.
4. Проверка действий оператора по подаче давления потребителям.
5. Проверка и, при необходимости, корректировка расчетов с потребителями.
6. Плановая проверка обходчиком наличия свища или микротрещины.
7. Внеплановая проверка обходчиком наличия крупной утечки.
8. Подача корректирующего давления  $p_{кор}$ .
9. Направление бригады на устранение крупной утечки.
10. Направление комиссии (на проверку попадания в газ влаги или кислорода, наличие врезок).
11. Применение уставок, прекращение поставок.

$G$  – функция выходов, условия оптимизации, согласно которым принимается решение в пользу того или иного мероприятия по корректировке:

$$y_t = G(s_t, x),$$

Набор условий оптимизации включает в себя:

- необходимость первоочередного устранения причин, которые могут создавать пожарную и взрывоопасность;

- необходимость выполнения договоров поставок;
- необходимость выполнения регламентов по затратам на транспортировку;
- минимизация расходов на мероприятия.

При определении параметров дискретного автомата была применена нечеткая логика [13]. Функция переходов для каждого входного сигнала такого автомата представляется нечеткой матрицей. Для идентификации отклонений применялись LSTM\*-нейронные сети, наиболее эффективные для аппроксимации многомерных временных зависимостей нелинейных величин [13], [14]. Для проверки работы регрессионной модели на основе LSTM-сети были использованы фактические значения временных рядов. Для определения каждого прогнозного значения предсказывался следующий временной шаг, с использованием наблюдаемого значения предыдущего временного шага.

**Определение структуры и параметров нейронной сети.** На этапе синтеза параметров модели управления балансом определяется также набор входных факторов нейронной сети и гиперпараметров нейросетевых алгоритмов. Анализ с помощью Diagnostic Feature Designer Toolbox среды MatLab [15] позволил выявить при помощи метода однофакторного дисперсионного анализа One-Way ANOVA на основе статистических данных Калининградского участка Северо-Западного региона за 2015 г., наиболее значимые факторы для определения расхода газа на ГИС и ГРС. Целью однофакторного дисперсионного анализа служит определение того, какое влияние оказывают независимые переменные на переменную отклика. Наиболее значимыми факторами оказались давление на входе  $p_{вх}$  отвода магистрального газопровода, направленного на ту или иную ГРС, на выходе

этого отвода  $p_{вых}$ , температура на входе  $T_{вх}$  и выходе  $T_{вых}$  участка газотранспортной сети. Рис. 5 иллюстрирует этот набор факторов.

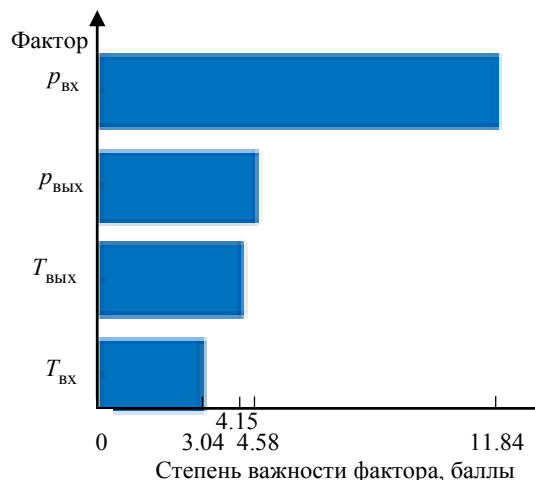


Рис. 5. Наиболее важные факторы для расчета расхода газа на ГРС и ГИС

Fig. 5. Essential components of the gas reserve value in MG, the number of uses of input parameters

Аналогично, при помощи Toolbox Diagnostic Feature Designer среды MatLab была осуществлена диагностика наиболее значимых признаков для определения запаса газа в магистральном газопроводе. Такими факторами наряду с температурой газа на выходе ГИС и с компрессорной станции (КС) оказались расход газа на участке  $Q_{факт. АСТРА}$  и характеристики давления на выходе с КС:  $n$  – число оборотов нагнетателя на компрессорной станции и степень сжатия газа (рис. 6). АСТРА – программный комплекс, аккумулирующий измерительную информацию.

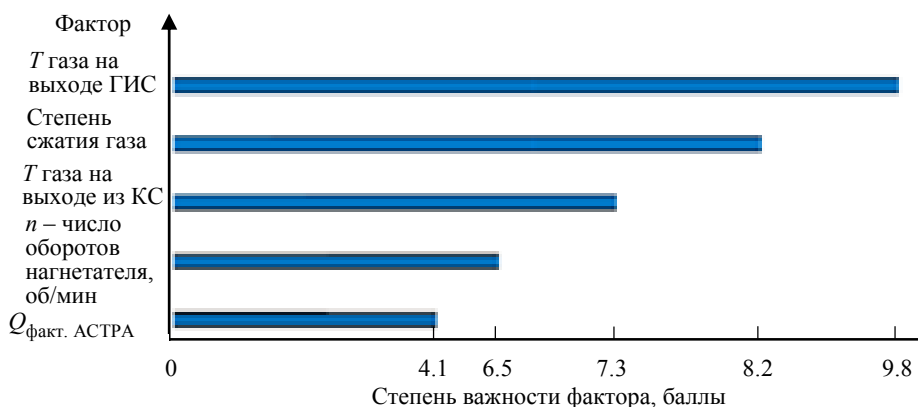


Рис. 6. Наиболее важные компоненты для расчета величины запаса газа в МГ, количество использований входных параметров

Fig. 6. The most important components of the gas reserve value in MG, the number of uses of input parameters

\* Сеть LSTM (long short-term memory, долгая краткосрочная память) – тип рекуррентной нейронной сети, способный обучаться долгосрочным зависимостям.

По двум наборам входных характеристик, выявленных в качестве наиболее значимых факторов, были синтезированы LSTM (long short-term

memory) нейронные сети для прогнозирования величин расхода газа на ГИС и ГРС, а также запаса газа в магистральном газопроводе. В качестве выходной переменной были приняты величины расхода и запаса газа. Нейросети были обучены в среде MatLab на основе статистических данных по температуре, давлению, расходу и запасу газа на Калининградском участке Северо-Западной ГТС.

Выбрана следующая архитектура LSTM-нейронной сети, на основе компьютерных экспериментов [13]:

- два рабочих слоя: рекуррентный с модулями LSTM и полносвязный прямого распространения;
- число нейронов в LSTM-модуле – 128.
- алгоритм обучения – адаптивная оценка момента ADAM (adaptive moment estimation),
- начальная скорость обучения (initial learning rate) равна 0.01.

На рис. 7 показаны результаты работы модели (рис. 7, а) и среднеквадратическая ошибка предсказаний RMSE (Root Mean Square Error) (рис. 7, б). По горизонтальной оси отложено время, в течение которого осуществлялось почасовое измерение параметров технологического процесса учета расхода газа.

Результаты тестирования нейросети показывают, что прогнозы достаточно точны, поскольку ошибка RMSE находится в пределах 1.5 %, – меньше, чем погрешности используемых средств измерений.

Рис. 8 иллюстрирует элемент модели управления балансом газа газотранспортной системы, одну из ГРС, с датчиков которой подаются входные данные на нейросеть: давление газа на входе и выходе, температура газа на выходе, а также данные по расходу газа с предыдущего временного шага  $Q^{-1}$  газа. На выходе элемента предсказы-

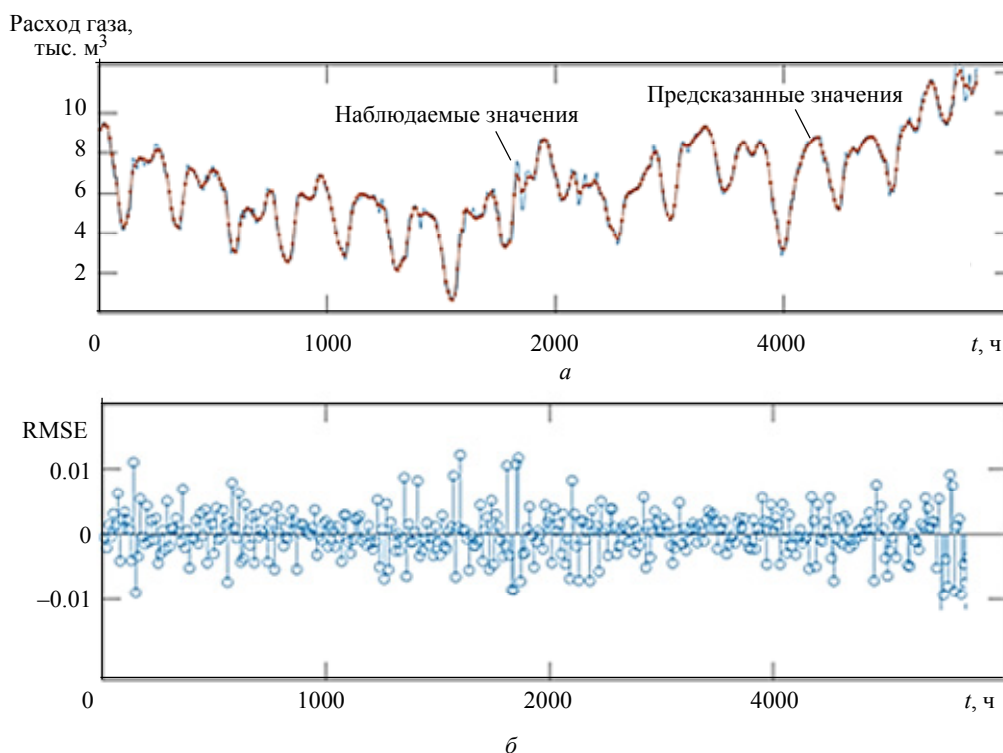


Рис. 7. Результаты работы модели для прогнозирования запаса газа:

а – работа LSTM нейронной сети; б – ошибка предсказаний

Fig. 7. Results of the model for predicting the size of the gas reserve:

а – LSTM neural network operation; б – prediction error

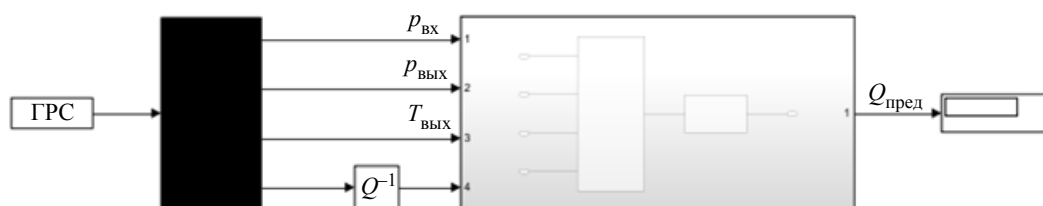


Рис. 8. Элемент модели управления балансом газа газотранспортной системы

Fig. 8. Element of the model for controlling the gas balance of a gas transmission system



Табл. 2. Уровень небаланса ГТС в зависимости от параметров отклонений  
 Tab. 2. GTS imbalance level depending on deviation parameters

Объем небаланса	Отклонение	Длительность	Скорость	Причины	Мероприятия
<b>Большой</b>	<b>Большое</b>	Низкая/средняя/большая	Низкая/средняя/большая	1-го типа	8–11
	Низкое/среднее/большое	<b>Большая</b>	Низкая/средняя/большая		
	Низкое/среднее/большое	Низкая/средняя/большая	<b>Большая</b>		
<b>Средний</b>	<b>Среднее</b>	Низкая/средняя	Низкая/средняя	2-го типа	6–7
	Низкое/среднее	<b>Средняя</b>	Низкая/средняя		
	Низкое/среднее	Низкая/средняя	<b>Средняя</b>		
<b>Низкий</b>	<b>Низкое</b>	<b>Низкая</b>	<b>Низкая</b>	3-го типа	1–5

вается значение расхода ( $Q_{пред}$ ), которое сравнивается с реальным расходом.

Согласно разработанному на основе дискретного автомата методу, в зависимости от сочетания оцениваемых характеристик (отклонений значений параметров учета расхода газа от значений, определенных нейронной сетью, длительности и скорости нарастания этих отклонений) определяются причины небаланса и мероприятия, направленные на поддержание баланса (табл. 2) [6].

Так, длительное, небольшое, не растущее отклонение говорит, скорее всего, о выходе погрешности в средствах измерений за допустимые границы, а большое, короткое, не растущее – о постоянном отборе газа из системы.

**Заключение и дальнейшие перспективы исследования.** В статье рассматриваются задачи топологического, структурного и параметрического синтеза алгоритма управления балансом газа в газотранспортной сети, построен граф модели системы управления балансом газа, предложен под-

ход на основе дискретного автомата в сочетании с LSTM-нейронными сетями, определены наборы их входных параметров и гиперпараметров.

Благодаря выявлению таких параметров отклонений в данных, как величина, длительность и скорость возрастания отклонений, сопоставлению их с причинами и корректирующими мероприятиями, а также применению условий оптимизации в качестве функции выходов, становится возможным принимать меры, оптимальные с точки зрения соотношения потерь газа и затрат на профилактику и устранения небаланса.

В систему управления балансом газа входят подсистемы расчета запаса в магистральном газопроводе, расхода на собственные нужды и на устранение небаланса. Для каждой из подсистем моделируется соответствующий виртуальный датчик и синтезируется подсистема управления. В дальнейшем необходимо рассмотреть топологические условия инвариантности и структурно-параметрический синтез подсистем.

#### Список литературы

- Игнатъев А. А. Оценка причин разбаланса объемов газа в системе «поставщик – потребитель» // Газовая промышленность. 2010. № 6. С. 20–22.
- Саликов А. Р. Разбаланс в сетях газораспределения // Газ России. 2015. № 4. С. 36–41.
- Сокращение потерь природного газа при транспортировке по магистральным газопроводам ОАО «Газпром» / Г. А. Хворов, С. И. Козлов, Г. С. Аكوпова, А. А. Евстифеев // Газовая промышленность. 2013. № 12. С. 66–69.
- Сайт ПАО «Газпром». URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2021/december/article545124/> (дата обращения 15.02.2023).
- Распределенное управление процессами компримирования природного газа / С. Д. Альтшуль, Д. Х. Имаев, С. В. Квашнин, М. Ю. Шестопалов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 184 с.
- Петрова А. К. Применение нейронных сетей для решения задач оптимизации процесса учета расхода газа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 5. С. 53–59.
- Petrova A. K. Approach to the Classification of Gas Imbalance Factors in the Gas Transmission Network based on Criticality Matrix // Proc. of the 2023 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2023. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. P. 1634–1638.
- Петрова А. К. Моделирование системы контроля баланса газа в газотранспортной системе как объекта управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. № 5. С. 25–34.
- Шалыто А. А. Алгоритмизация и программирование для систем логического управления и «реактивных» систем // Автоматика и телемеханика. 2001. № 1. С. 3–39.
- Хопкрофт Д. Э., Мотвани Р., Ульман Д. Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Изд-во «Вильямс», 2002. 528 с.
- Алексеев В. Б. Лекции по дискретной математике: уч. пособие. М.: Изд-во «ИНФРА-М», 2012. 89 с.

12. Марценюк М. А., Селетков И. П. Приведение конечного нечеткого автомата к нечеткой комбинационной схеме с блоком памяти // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 6(210). С. 67–80.

13. Петрова А. К. Детектирование аномалий в технологических процессах газотранспортной системы с использованием сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM) // Сб. докл. междунар. конф.

«Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 95–98.

14. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. М.: Вильямс, 2018, 1104 с.

15. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MatLab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформации. М.: Солон-Пресс, 2006.

### Информация об авторе

**Петрова Айгуль Камилловна** – старший преподаватель кафедры инновационного менеджмента СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: Ak72p@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1613-2097>

### References

1. Ignat'ev A. A. Ocenka pricin razbalansa ob#emov gaza v sisteme «postavshhik – potrebitel'» // Gazovaja promyshlennost'. 2010. № 6. S. 20–22. (In Russ.).

2. Salikov A. R. Razbalans v setjah gazoraspredele-nija // Gaz Rossii. 2015. № 4. S. 36–41. (In Russ.).

3. Sokrashhenie poter' prirodnogo gaza pri transportirovke po magistral'nym gazoprovodam OAO «Gazprom» / G. A. Hovorov, S. I. Kozlov, G. S. Akopova, A. A. Evstifeev // Gazovaja promyshlennost'. 2013. № 12. S. 66–69. (In Russ.).

4. Sajt PAO «Gazprom». URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2021/december/article545124/> (data obrashhenija 15.02.2023). (In Russ.).

5. Raspredeleloe upravlenie processami komprimirovanija prirodnogo gaza / S. D. Al'tshul', D. H. Imaev, S. V. Kvashnin, M. Ju. Shestopalov. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LETI», 2021. 184 s. (In Russ.).

6. Petrova A. K. Primenenie nejronnyh setej dlja reshenija zadach optimizacii processa ucheta rashoda gaza // Izv. SPbGJeTU «LETI». 2020. № 5. S. 53–59. (In Russ.).

7. Petrova A. K Approach to the Classification of Gas Im-balance Factors in the Gas Transmission Network based on Criticality Matrix // Proc. of the 2023 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2023. Izd-vo SPbGJeTU «LETI», 2022. P. 1634–1638.

8. Petrova A. K. Modelirovanie sistemy kontrolja balansa gaza v gazotransportnoj sisteme kak ob#ekta up-

ravlenija // Izv. SPbGJeTU «LETI». 2022. № 5. S. 25–34. (In Russ.).

9. Shalyto A. A. Algoritmizacija i programmirovanie dlja sistem logicheskogo upravlenija i «reaktivnyh» sistem // Avtomatika i telemekhanika. 2001. № 1. С. 3–39. (In Russ.).

10. Hopcroft D. Je., Motvani R., Ul'man D. D. Vvedenie v teoriju avtomatov, jazykov i vychislenij. M.: Izd-vo «Vil'jams», 2002. 528 s. (In Russ.).

11. Alekssev V. B. Lekcii po diskretnoj matematike: uch. posobie. M.: Izd-vo «INFRA-M», 2012. 89 s. (In Russ.).

12. Marcenjuk M. A., Seletkov I. P. Privedenie konechnogo nechetkogo avtomata k nechetkoj kombinacionnoj sheme s blokom pamjati // Nauch.-tehn. ведомости SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie. 2014. № 6(210). S. 67–80. (In Russ.).

13. Petrova A. K. Detektirovanie anomalij v tehnologicheskikh processah gazotransportnoj sistemy s ispol'zovaniem setej s dolgoj kratkosrochnoj pamjat'ju (LSTM) // Sb. dokl. mezhdunar. konf. «Proektirovanie i obespechenie kachestva informacionnyh processov i sistem». SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LETI», 2022. S. 95–98. (In Russ.).

14. Hajkin S. Nejrornyje seti. Polnyj kurs. M: Vil'jams, 2018, 1104 с. (In Russ.).

15. D'jakonov V. P., Kруглов V. V. MatLab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Instrumenty iskusstvennogo intelekta i bioinformacii. M.: Solon-Press, 2006. (In Russ.).

### Information about the author

**Aigul K. Petrova** – senior lecturer of the Department of Innovation Management of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: Ak72p@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1613-2097>

Статья поступила в редакцию 21.03.2023; принята к публикации после рецензирования 17.04.2023; опубликована онлайн 23.06.2023.

Submitted 21.03.2023; accepted 17.04.2023; published online 23.06.2023.