

## Моделирование системы контроля баланса газа в газотранспортной системе как объекта управления

А. К. Петрова

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

ak72p@yandex.ru

**Аннотация.** Актуальной задачей является исследование возможности применения современных интеллектуальных решений в задачах повышения эффективности газовой отрасли. Для решения данных задач целесообразно рассмотреть процесс управления балансом газа как абстрактный управляемый объект, а также причинно-следственную связь элементов системы автоматизированного управления балансом. Для построения объекта управления может быть применена нейронечеткая модель, сочетающая преимущества нейронных сетей в аппроксимации многомерных данных и нечеткой логики для принятия решений в условиях их неопределенности. В статье рассматривается пример построения такой информационной модели одной из региональных газотранспортных сетей РФ.

**Ключевые слова:** баланс газа, эффективность газотранспортной сети, автоматизация, технологический процесс, объект управления, нейронная сеть, нечеткая логика

**Для цитирования:** Петрова А. К. Моделирование системы контроля баланса газа в газотранспортной системе как объекта управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 10. С. 25–34. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-25-34.

Original article

## Modeling the Gas Balance Control System in the Gas Transmission System as a Control Object

A. K. Petrova

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

ak72p@yandex.ru

**Abstract.** An urgent task is to study the possibility of using modern intelligent solutions to improve the efficiency of the gas industry. To solve these problems, it is advisable to consider the process of managing the gas balance as an abstract controlled object, as well as the causal relationship of the elements of the automated balance management system. To build a control object, a neuro-fuzzy model can be applied, which combines the advantages of neural networks in approximating multidimensional data and fuzzy logic for making decisions under conditions of their uncertainty. The article considers an example of building such an information model of one of the regional gas transmission networks of the Russian Federation.

**Keywords** gas balance, gas transmission network efficiency, automation, technological process, control object, neural network, fuzzy logic

**For citation:** Petrova A. K. Modeling the Gas Balance Control System in the Gas Transmission System as a Control Object // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 10. P. 25–34. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-25-34.

**Введение.** Одним из критериев эффективности управления транспортировкой газа в системе магистральных газопроводов является баланс

газа в региональной газотранспортной системе [1]. Небаланс (разница между объемом газа, поступившим и отобранном из системы за отчет-

ный период [2], [3]) может возникнуть вследствие влияния характеристик рабочей среды (газа), средств измерения, оборудования, трубопровода, действий персонала, окружающей среды.

**Процесс контроля баланса газа как объект управления.** В газотранспортную сеть (ГТС) региона газ поступает из подающей региональной

сети, распределяется потребителям через газораспределительные станции (ГРС); часть расходуется на собственные нужды (СН) – в основном, на перекачивание газа при помощи газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях (КС); часть откладывается в магистральном трубопроводе (МГ) – так называемый запас газа;

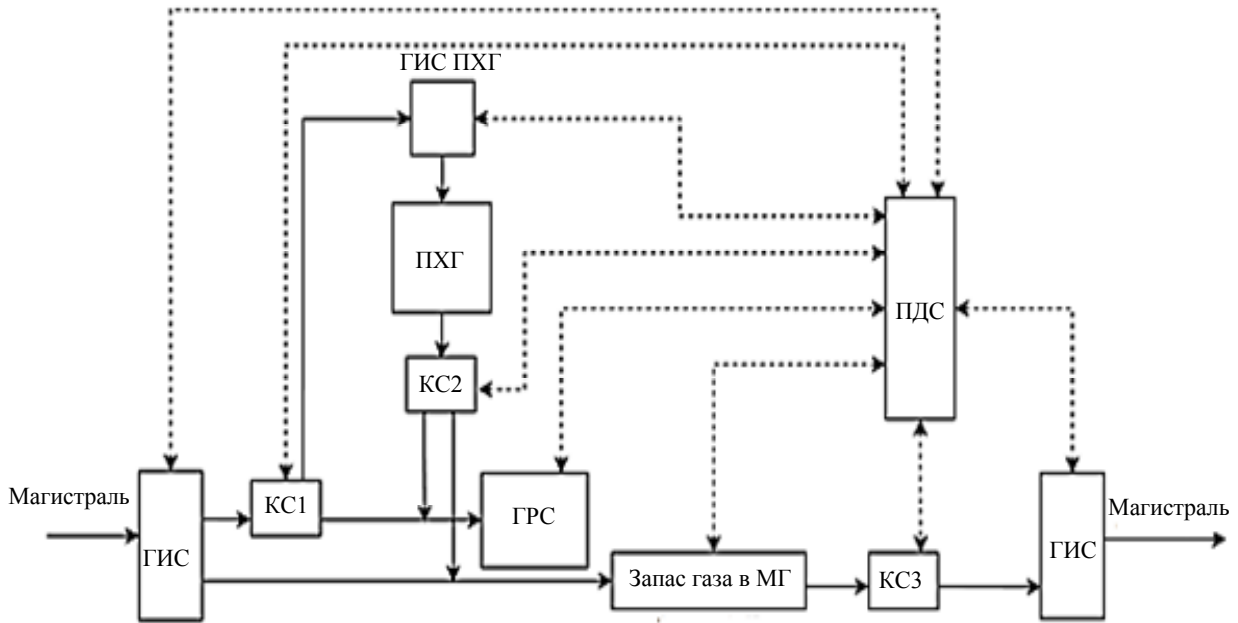


Рис. 1. Технологическая схема управления балансом газа в ГТС  
 Fig. 1. Technological scheme of gas balance control in GTS

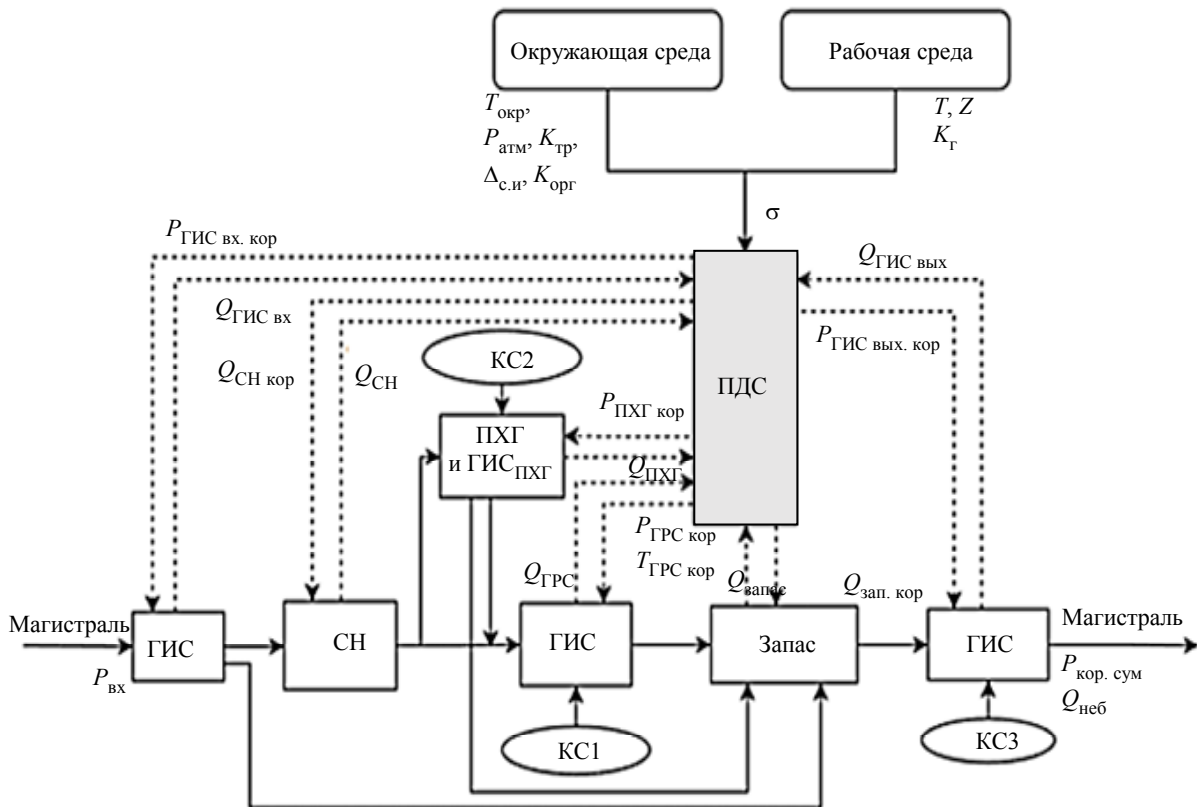


Рис. 2. Основные подсистемы управления балансом газа  
 Fig. 2. Main subsystems of the gas balance control

часть закачивается в подземное хранилище (ПХГ), при его наличии в регионе; и, наконец, транзитный газ передается в принимающую газотранспортную сеть. Технологический процесс учета расхода газа в системе управления балансом осуществляется измерительной линией, которая включает в себя газоизмерительную станцию (ГИС) на входе ГТС, ГИС на входе ПХГ, средств измерений (СИ) объемного расхода газа на ГРС, средств расчета запаса газа в МГ и объема газа на СН, газоизмерительную станцию (ГИС) на выходе ГТС, и производственно-диспетчерский пункт (ПДС) для оказания контролирующих и управляющих воздействий. Рис. 1 представляет технологическую схему учета расхода газа в системе управления балансом в ГТС, пунктирными линиями показаны потоки информации, сплошными – физический поток газа.

Объектом автоматизации является процесс управления балансом газа. На рис. 2 показаны его основные подсистемы.

На рис. 2 на баланс газа в ГТС влияют и внешние воздействия  $\sigma$ , включающие в себя:  $T_{окр}$  – температура 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  $K_r$ , температуру  $T$  и коэффициент сжимаемости  $Z$ .

Выходной технологический параметр процесса управления балансом газа – объем газа, характеризующий разницу между поступившим и отобраным объемом газа, величина небаланса  $Q_{неб}$ :

$$Q_{неб} = Q_{ГИС\ вх} - (Q_{ПХГ} + Q_{ГРС} + Q_{зап} + Q_{СН} + Q_{ГИС\ вых}). \quad (*)$$

Согласно (1)  $Q_{неб}$  определяется объемами газа, проходящими через ГИС на входе региональной ГТС –  $Q_{ГИС\ вх}$ , закачанными в подземное хранилище газа ПХГ –  $Q_{ПХГ}$ , направляемыми потребителям через ГРС –  $Q_{ГРС}$ , запаса в МГ  $Q_{зап}$  и, израсходованного на СН  $Q_{СН}$  и переданного в следующий регион через ГИС на выходе ГТС –  $Q_{ГИС\ вых}$ . Другими словами,  $Q_{неб}$  складывается из отклонений в результатах учета объемного расхода газа на ГИС и ГРС, и в расчетах запаса в МГ и на СН. На рис. 2 параметры с приставкой «кор» – корректирующие величины на соответствующие элементы структуры.

Рис. 3 представляет процесс управления балансом газа как абстрактный управляемый объект.

На рис. 4 показана причинно-следственная связь элементов. Для ее построения добавлены переменные, обозначающие заданные регламентами величины рассматриваемых параметров:  $Q_{ГИС\ зад}$  – заданные объемы на газоизмерительных станциях (на входе, входе ГТС и ПХГ);  $Q_{ГРС\ зад}$  – на газораспределительных станциях,  $Q_{зап.\ зад}$  – заданная величина объемов запаса газа в МГ;  $Q_{СН\ зад}$  – объемов газа на собственные

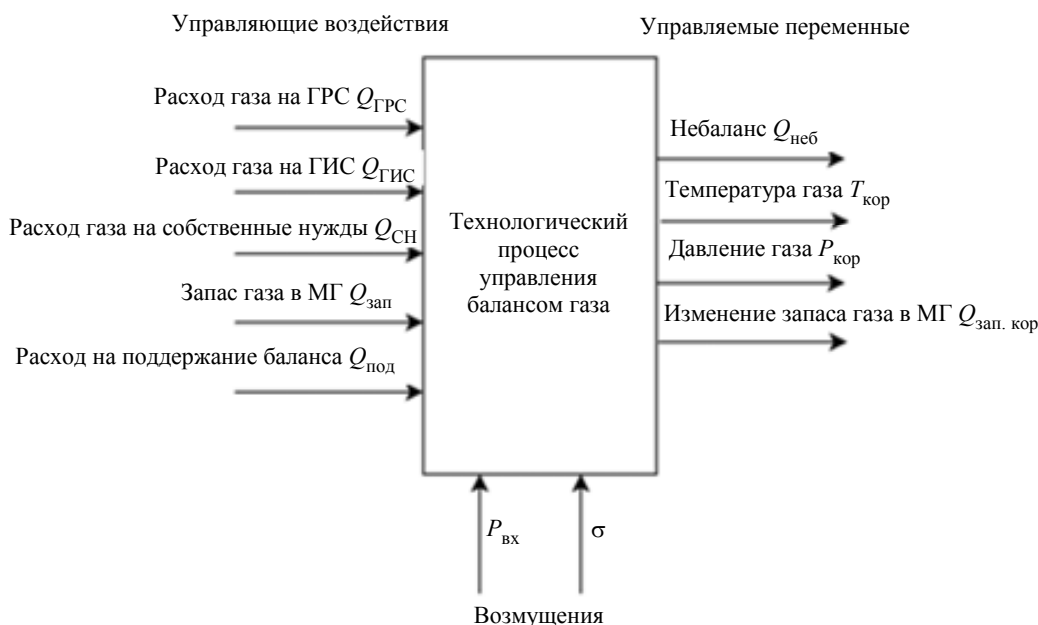


Рис. 3. Процесс управления балансом газа как абстрактный управляемый объект

Fig. 3. Gas balance management process as an abstract managed object

нужды;  $Q_{\text{под. зад}}$  – заданная величина объемов газа на поддержание баланса;  $Q_{\text{неб. зад}}$  – заданная, или допустимая величина небаланса;  $P_{\text{зад}}$  – заданная величина давления на входе ГТС.

На рис. 5 показана диаграмма сигнального графа системы управления балансом газа [4].

Процесс централизованного управления иллюстрирует рис. 6, выполненный на основе работы [4]. На рисунке показаны взаимосвязи управ-

ляемого объекта, датчиков, исполнительных органов, управляемых переменных, управляющих воздействий, возмущений и  $Q_{\text{неб}}$ : ВДЗМГ, ВДСН, ВДУСТР – виртуальные датчики объемов газа: запаса в магистральном газопроводе, расхода на собственные нужды и на устранение небаланса соответственно; УУ – управляющее устройство; К – критерий качества, выбранный в соответствии с целью управления.

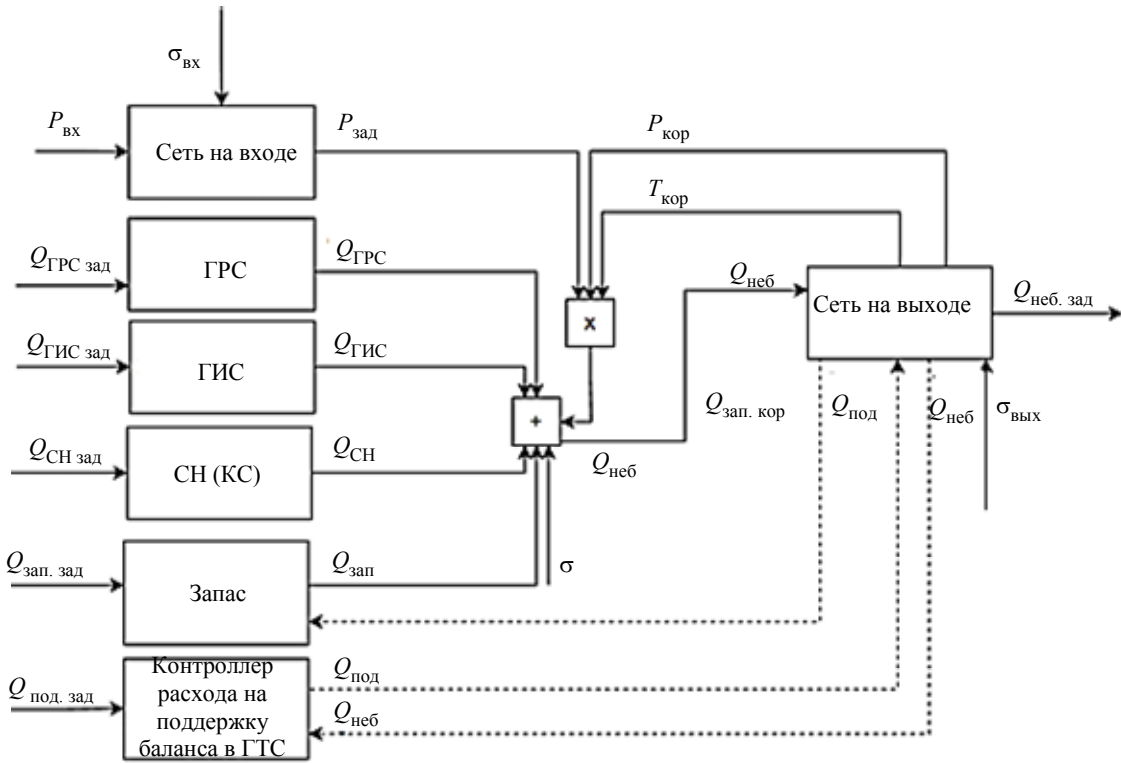


Рис. 4. Причинно-следственная связь элементов системы управления балансом газа  
 Fig. 4. Causal relationship of the elements of the gas balance management system

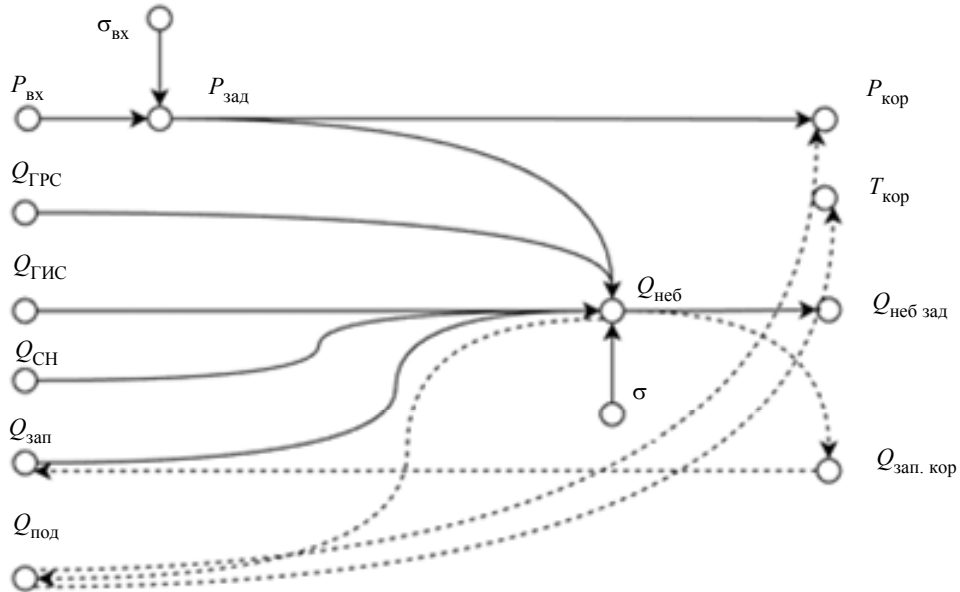


Рис. 5. Диаграмма сигнального графа системы управления балансом газа  
 Fig. 5. Diagram of the signal graph of the gas balance control system

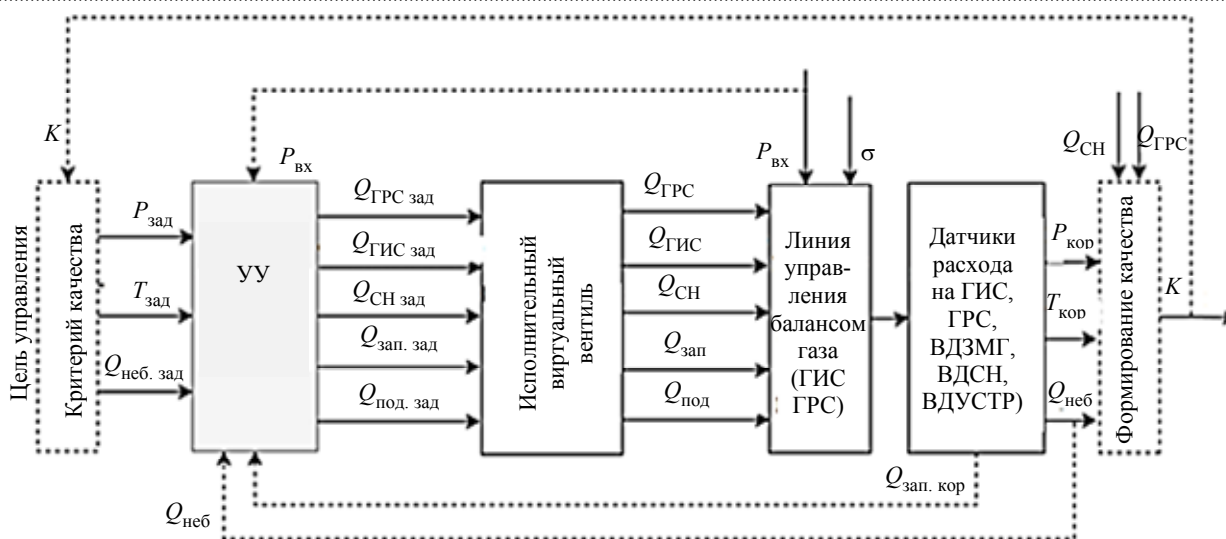


Рис. 6. Система автоматизированного централизованного управления балансом  
 Fig. 6. Automated centralized balance management system

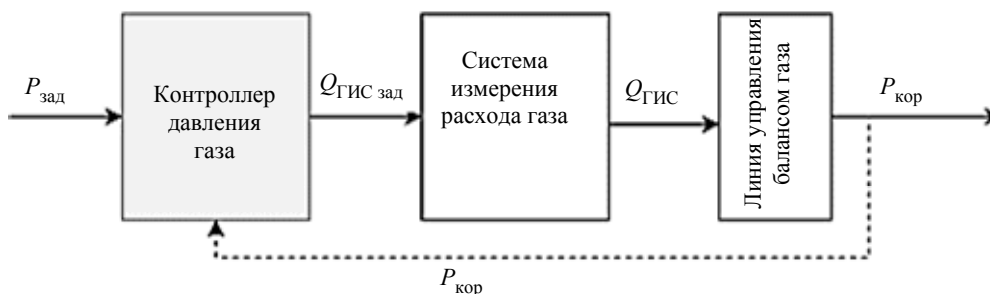


Рис. 7. Структура подсистемы управления расходом газа на ГИС  
 Fig. 7. The structure of the gas flow control subsystem on GIS

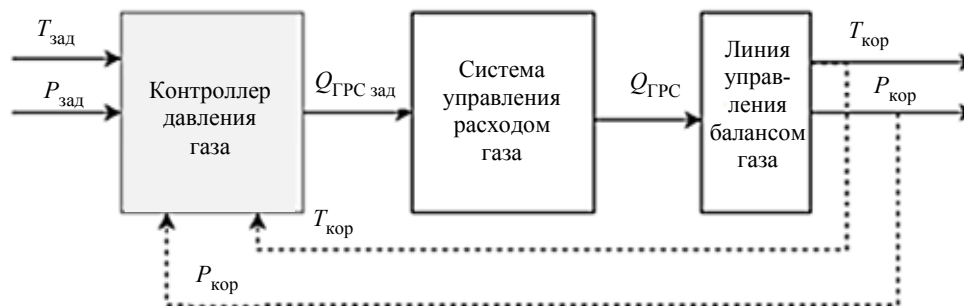


Рис. 8. Структура подсистемы управления расходом газа на ГРС  
 Fig. 8. Structure of the gas flow control subsystem at GDS

Разработка системы централизованного управления балансом газа затруднительна по причинам теоретического, технического и прикладного характера. Затруднительно построить адекватные математические модели такого сложного объекта, описать требования и процессы управления, применить известные методы синтеза алгоритмов управления. Поэтому целесообразно рассмотреть децентрализованный подход и распределение функций управления. Иерархия систем автоматизации управления и контроля основана на технологической иерархии [4]:

- на нижнем уровне находятся датчики, первичные преобразователи, измерители расхода и физических параметров;

- на среднем уровне находятся программируемые логические контроллеры;
- на верхнем уровне находятся рабочие места операторов, производственно-диспетчерская служба.

Функции управления могут быть распределены как горизонтально, так и вертикально. Для системы управления балансом газа рассмотрен вариант горизонтального распределения.

На рис. 7 показана структура подсистемы управления расходом газа на ГИС. Принцип управления расходом на входных, выходных ГИС ГТС и перед ПХГ одинаковый.

На рис. 8 показана структура подсистемы управления расходом газа на ГРС, количество которых в ГТС может быть от до нескольких сотен.

На рис. 9 показана структура подсистемы управления запасом газа в МГ [5].

На рис. 10 показана структура подсистемы управления газа в СН, на рис. 11 – структура подсистемы управления расходом на поддержание баланса.

Моделирование стационарных режимов управления балансом газа осуществляется на основе предположения о его прямой зависимости небаланса от объемов влияния факторов-причин его возникновения  $\sigma$  и обратной зависимости от

объемов, направленных на его поддержание  $Q_{\text{под. опт}}$ :

$$Q_{\text{неб}} = F(\sigma/Q_{\text{под. опт}}) = F(\sigma/P_{\text{кор}}).$$

Модель системы управления балансом газа первого топологического ранга [6] представлена на рис. 12, где обозначены:  $Q_{\text{неб}}$  – объем небаланса;  $P_{\text{зад}}$  – заданный уровень давления в ГТС;  $P_{\text{кор}}$  – корректирующий объем, для поддержания баланса;  $Q_{\text{под. опт}}$  – оптимальный уровень усилий

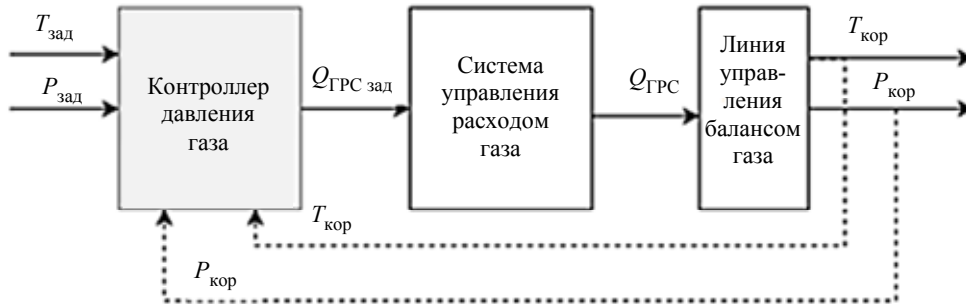


Рис. 8. Структура подсистемы управления расходом газа на ГРС  
 Fig. 8. Structure of the gas flow control subsystem at GDS

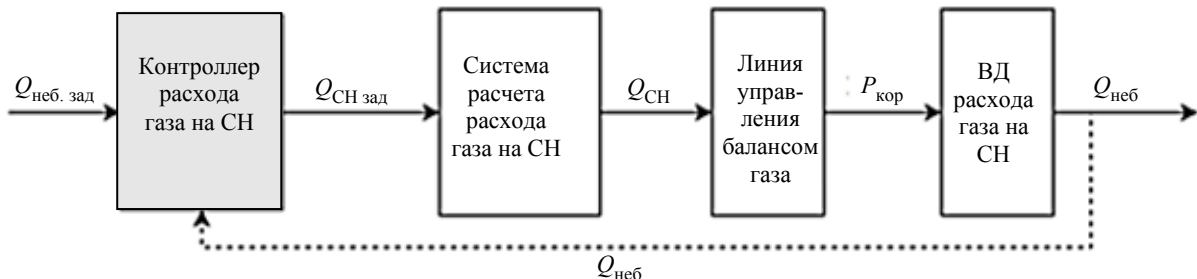


Рис. 10. Структура подсистемы управления расходом газа на собственные нужды  
 Fig. 10. Structure of the gas consumption control subsystem for own needs

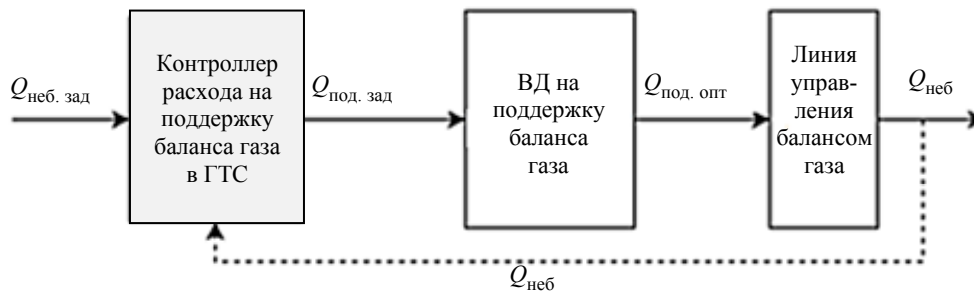


Рис. 11. Структура подсистемы управления расходом на поддержание баланса  
 Fig. 11. The structure of the subsystem for managing the cost of maintaining balance

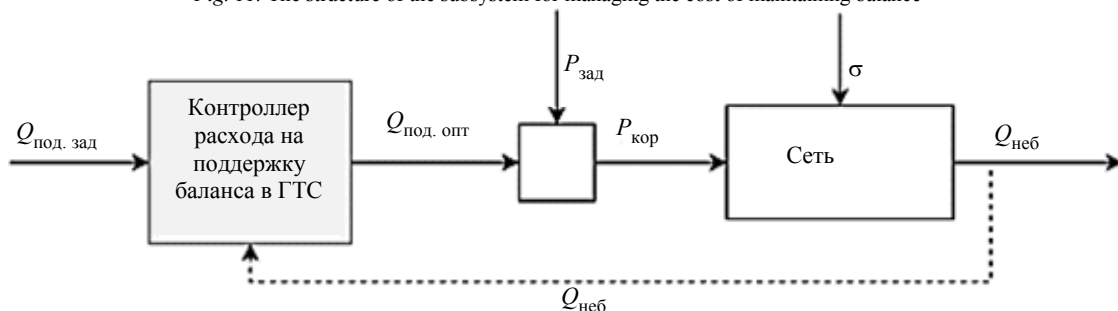


Рис. 12. Модель первого топологического ранга  
 Fig. 12. Model of the first topological rank

для поддержания баланса;  $Q_{\text{под. зад}}$  – заданный объем для поддержания баланса.

Установившийся режим поддержания баланса тогда можно описать следующим уравнением:

$$F(Q_{\text{под. зад}}, Q_{\text{неб}}) = F(Q_{\text{неб. зад}}, P_{\text{зад}}),$$

где  $F$  – функция расхода на поддержание баланса.

Так как уравнение (\*) невозможно решить аналитически, необходимо применить численные или графические методы.

При применении численного анализа стационарных режимов управления балансом газа, для построения компьютерных моделей в среде Simulink, предложены к использованию искусственные нейронные сети [7], [8]. Так, для каждой из 12 ГРС Калининградского участка Северо-Западной региональной транспортной сети была обучена нейронная сеть, на основе статистических данных по температуре, давлению и расходу газа на каждой из ГРС. Осуществлено сравнение различных архитектур искусственных нейронных сетей (ИНС) (табл. 1–3). На основе сравнения параметров точности и време-

ни обучения нейронных сетей для определения расхода газа на ГРС была выбрана рекуррентная LSTM нейронная сеть [9], [10].

Искусственные нейронные сети были обучены и для аппроксимации данных на ГИС, на входе и выходе ГТС. Поскольку статистические данные по Калининградскому участку представлены за 2015 г., и в этом году на нем еще не было сооружено ПХГ, то расход газа на ГИС ПХГ в данном частном случае приравнивается к нулю.

Особенностью контроля параметров расхода газа на ГИС является то, что необходимо не только определить расход газа, проходящего через ГИС, но и обеспечить равенство результатов измерений на каждой из параллельных ниток в технологическом процессе учета расхода газа на ГИС, т. е. в каждой нитке должен протекать одинаковый объем газа с одинаковыми параметрами (давление, температура) и свойствами. В настоящее время проверка осуществляется вручную постфактум, что может негативно сказываться на процессе учета расхода газа и величине небаланса.

Табл. 1. Сравнение архитектур ИНС для определения расхода газа на ГРС  
Tab. 1. Comparison of ANN architectures for approximating the gas flow rate at GDS

Модель	Ошибка ИНС	Время обучения, с
ИНС с 30 нейронами в скрытом слое	0.017	100
ИНС с 20 нейронами в скрытом слое	0.09	80
LSTM	0.011	50
BiLSTM	0.1162	80

Табл. 2. Сравнение архитектур ИНС для определения расхода газа на ГИС  
Tab. 2. Comparison of INS architectures for approximating the gas flow rate on GMS

Архитектуры нейронных сетей	Алгоритм Левенберга–Марквардта	Алгоритм масштабированного сопряженного градиента	Алгоритм байесовской регуляризации
((100 10 3])	Perf = 0.0028	0.0108	<b>1.2271e-10</b>
((100 10])	0.0068	0.0114	0.0047
100	0.0076	0.0126	1.6882e-05
((100 10 8 3])	0.0056	0.0135	0.0525

Табл. 3. Сравнение архитектур ИНС для определения запаса в МГ  
Tab. 3. Comparison of ANN architectures for gas stock volume approximation in magistral pipeline

Модель	Ошибка RMSE (Validation)	R-Squared (Validation)	Время обучения модели, с
<i>Параметрические модели</i>			
Линейная регрессия	0.26	0.18	7.4
<i>Непараметрические модели</i>			
SVM	0.25	0.21	153
Деревья решений	0.28	0.965	44.29
GP Gaussian	0.005	1	79
<i>Нейронные сети</i>			
С одним полносвязным слоем, 100 нейронов	0.057	0.96	4.57
С двумя слоями, 100, 10	0.062	0.95	5.9
С тремя слоями, 100, 10	0.07	0.94	7.12
С двумя слоями 150, 10	0.053	0.96	7.3
Рекуррентная сеть	0.01	0.98	31

Методом сравнения параметров для решения задачи контроля параметров расхода газа на параллельных нитках ГИС была синтезирована сеть с трехслойной полносвязной архитектурой.

ИНС в двумя полносвязными слоями прямого распространения использовались для аппроксимации величины запаса газа в МГ.

Анализ нейросетевой модели производился на тренажере в среде MatLab [9]–[11].

Динамика системы управления балансом газа определяется изменениями расхода на поддержание баланса и влиянием факторов – причин небаланса, объединенных параметром  $\sigma$ , следствием влияния которых является падение давления в сети и необходимость его корректировать:

$$A \frac{dP_{\text{кор}}}{dt} = Q_{\text{неб}} - Q_{\text{неб. зад}};$$

$$B \frac{dQ_{\text{под. опт}}}{dt} = P_{\text{кор}} - P_{\text{зад}},$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты пропорциональности:  $A$  – между отклонением величины небаланса от заданной и корректирующим это отклонения давлением;  $B$  – между отклонением, с целью коррекции баланса, величины давления от заданной и значением поддерживающего баланс объема газа.

$Q_{\text{неб}}$  складывается из отклонений в результатах измерений объемного расхода газа на ГИС и ГРС, и в расчетах запаса в МГ и на СН.

Факторы для детектирования отклонений в технологическом процессе учета расхода газа, на основании опроса экспертов ООО «Газпром Трансгаз Санкт-Петербург» и других региональных Обществ ПАО Газпром:

– отклонения значений параметров ТП учета расхода газа от значений, определенных нейронной сетью, обученной на статистических данных. Параметры должны отличаться не более, чем на величину погрешности средств измерений;

- длительность этих отклонений во времени;
- скорость нарастания отклонений.

Для формализации зависимости уровня небаланса от сочетания этих трех факторов использовались положения нечеткой и темпоральной логики [12]–[15]:

$$Q_{\text{неб}} = \langle X, Y, Z, V, T, Z', \mu(v), \mu(z'), \mu(z), m(t)_z, R, F, D, W \rangle,$$

где  $X$  – четкое множество результатов измерения объемного расхода газа;  $Y$  – четкое множество значений объемного расхода газа, полученных в

результате применения нейронной сети, обученной на входных параметрах технологического процесса учета расхода газа на этом же элементе;

$$Z = [z_1 = \text{«незначительный»}, z_2 = \text{«маленький»}, z_3 = \text{«небольшой»}, z_4 = \text{«средний»}, z_5 = \text{«существенный»}, z_6 = \text{«значительный»}, z_7 = \text{«большой»}, z_8 = \text{«очень большой»}, z_9 = \text{«критический»}]$$

– нечеткое множество, где термы – лингвистические переменные, характеризующие значения выходной переменной, уровня небаланса на ГРС  $Q_{\text{неб}}$ ;

$$V = [v_1 = \text{«маленькая»}, v_2 = \text{«средняя»}, v_3 = \text{«большая»}]$$

– нечеткое множество, в котором термы – лингвистические переменные, определяющие скорость увеличения отклонений значений  $Y$  от  $X$ ;

$$T_o = [t_{o1} = \text{«только появилось»}, t_{o2} = \text{«длится некоторое время»}, t_{o3} = \text{«длится долго»}];$$

– темпоральный оператор, предикат длительности времени, в течение которого происходит обнаружившееся отклонение значений параметров;

$$Z' = [z'_1 = \text{«маленькое»}, z'_2 = \text{«среднее»}, z'_3 = \text{«большое»}]$$

– нечеткое множество, где термы – лингвистические переменные, характеризующие отклонения результатов измерения объемов газа  $X$  от данных нейронной сети  $Y$ ;  $\mu(z)$  – функция принадлежности лингвистической переменной  $Z_{\text{ГРС}}$ ;  $\mu(z')$  – функция принадлежности лингвистической переменной  $Z'$ ;  $\mu(v)$  – функция принадлежности лингвистической переменной  $V$ ;  $\mu(t)_z$  – функция принадлежности темпорального оператора  $T_o$  лингвистической переменной  $Z$ ;  $R$  – нечеткие отношения:

–  $R_{xy}$  отображают любую конъюнкцию множеств  $X, Y$  на множество  $Z'$  со степенью принадлежности  $\mu(z')$ ;

–  $R_{t_o}$  определяют отношения между  $T_o$  и  $Z$  со степенью принадлежности  $\mu(t)_z$ ;

–  $R_z$  отображают любую конъюнкцию множеств  $Z', V, T$  на множество  $Z$  со степенями принадлежности  $\mu(v), \mu(t)_z, \mu(z)$ ;

$F, D$  – процедуры фаззификации и дефаззификации соответственно, применяется нечеткий вывод Мамдани как наиболее часто встречающийся;  $W$  – блок нечеткого логического вывода.



Табл. 4. Определение уровня небаланса ГТС согласно нечетко-темпоральной модели  
 Tab. 4. Determining the level of GTS imbalance according to the fuzzy-temporal model

Темпоральный оператор	Отклонение результатов учета расхода газа на ГТС от данных нейросетевого алгоритма								
	Малое			Среднее			Большое		
	Скорость нарастания								
	Малая	Средняя	Большая	Малая	Средняя	Большая	Малая	Средняя	Большая
Только появилось	Незначительный	Незначительный	Маленький	Небольшой	Средний	Существенный	Значительный	Большой	Очень большой
Длится некоторое время	Незначительный	Малый	Небольшой	Средний	Существенный	Значительный	Большой	Очень большой	Критический
Длится долго	Малый	Небольшой	Средний	Существенный	Значительный	Большой	Очень большой	Критический	Критический

Уровень небаланса, в зависимости от значения отклонений, скорости нарастания отклонения и длительности времени, в течение которого наблюдается отклонение, представлен в табл. 4.

В зависимости от сочетания оцениваемых факторов определяются причины небаланса. Например, длительное, небольшое, не растущее отклонение говорит, скорее всего, о наличии систематической погрешности в средствах измерений, а большое, длительное, не растущее – о постоянном отборе газа из системы. Данные сочетания определены также с помощью экспертов ГТС. В зависимости от причины организуется мероприятие по поддержанию баланса.

**Заключение.** В рамках статьи проанализирована возможность построения системы управления балансом газа в газотранспортной сети как объекта управления, рассмотрена причинно-

следственная связь элементов системы, разработана диаграмма сигнального графа. К системе автоматизированного централизованного управления балансом применены децентрализованный подход и распределение функций управления, приведены модели управления отдельными элементами. Описаны стационарный и динамический режимы управления, применены искусственные нейронные сети прямого и обратного распространения для аппроксимации потоков данных от элементов системы, в сочетании с элементами нечеткой и темпоральной логики.

В дальнейшем предполагается построение компьютерных моделей исследованных теоретических положений, а также разработка метода синтеза алгоритма нейросетевого управления системой баланса газа в газотранспортной сети.

#### 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.
- Распределенное управление процессами компримирования природного газа / С. Д. Альтшуль, Д. Х. Имаев, С. В. Квашнин, М. Ю. Шестопапов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 184 с.
- Слободчиков К. Ю. Метод формирования расчетных примеров для диспетчерских задач транспорта газа // Газовая промышленность. 2018. № 3. С. 78–86.
- Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. чл.-корр. АН СССР Вавилова А. А. М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. 416 с., ил.
- Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. М., СПб.: Издательский дом «Вильямс», 2016.
- Назаров А. В., Лоскутов А. А. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. СПб.: Наука и техника, 2003. 384 с.
- 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.
- Петрова А. К. Применение нейросетевых алгоритмов на газоизмерительной станции // Сб. докл. Всерос. науч. конф. по проблемам управления в технических системах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. Т. 1. С. 92–94.
- 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.
- Ярушкина П. Л. Основы теории нечетких и гибридных систем: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2009. 320 с.
- Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в

условиях неопределенности: технология, экономика, экология М.: Машиностроение – 1, 2004.

14. Карпов Ю. Г. Model Checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 560 с.

15. Карпов Ю. Г., Шошмина И. В. Верификация распределенных систем. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 211 с. ил.

---

### Информация об авторе

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

E-mail: Ak72p@yandex.ru

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

### References

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

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

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

4. Al'tshul' S. D., Imaev D. H., Kvashnin S. V., Shes-topalov M. Ju. Raspredeleloe upravlenie processami komprimirovanija prirodnoho gaza. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2021. 184 с. (In Russ.).

5. Slobodchikov K. Ju. Metod formirovanija raschetnyh primerov dlja dispetcherskih zadach transporta gaza // Gazovaja promyshlennost'. 2018. № 3. S. 78–86. (In Russ.).

6. Imitacionnoe modelirovanie proizvodstvennyh sistem / pod obshh. red. chl.-korr. AN SSSR Vavilova A. A. M.: Mashinostroenie; Berlin: Tehnika, 1983. 416 s., il. (In Russ.).

7. Hajkin S. Nejronnye seti. Polnyj kurs. M., SPb.: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2016. (In Russ.).

8. Nazarov A. V., Loskutov A. A. Nejrosetevye algoritmy prognozirovaniya i optimizacii sistem. SPb.: Nauka i tehnika, 2003. 384 s. chl.-korr. (In Russ.).

9. 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 informacii-onnyh processov i sistem». SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2022. S. 95–98. (In Russ.).

10. Petrova A. K. Primenenie nejrosetevyh algoritmov na gazoizmeritel'noj stancii // Sb. dokl. Vseros. nauch. konf. po problemam upravlenija v tehniceskikh sistemah. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2021. T. 1. S. 92–94. (In Russ.).

11. D'jakonov V. P., Kruglov V. V. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Instrumenty iskusstvennogo intellekta i bioinformacii. M.: SOLON-PRESS, 2006. (In Russ.).

12. Jarushkina P. L. Osnovy teorii nechetkih i gibridnyh sistem: ucheb. posobie / P. L. Jarushkina. M.: Finansy i statistika, 2009. 320 s. (In Russ.).

13. Diligenskij N. V., Dymova L. G., Sevast'janov P. V. Nechetkoe modelirovanie i mnogokriterial'naja optimizacija proizvodstvennyh sistem v uslovijah neopredelennosti: tehnologija, jekonomika, jekologija M.: Mashinostroenie – 1, 2004. (In Russ.).

14. Karpov Ju. G. Model Checking. Verifikacija parallel'nyh i raspredeleennyh programmnyh sistem. SPb.: BHV-Peterburg, 2010. 560 s. (In Russ.).

15. Karpov Ju. G., Shoshmina I. V. Verifikacija raspredeleennyh sistem. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2011. 211 s. il. (In Russ.).

---

### Information about the author

**Aigul K. Petrova** – Senior Lecturer of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: Ak72p@yandex.ru

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

Статья поступила в редакцию 15.10.2022; принята к публикации после рецензирования 03.11.2022; опубликована онлайн 25.12.2022.

Submitted 15.10.2022; accepted 03.11.2022; published online 25.12.2022.

---