

# Имитационное моделирование в системе управления в газотранспортной сети

А. К. Петрова<sup>1</sup>, Д. З. Хуснутдинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет  
akpetrova@etu.ru, dz\_khusnutdinov@mail.ru

**Аннотация.** Проблема эффективности управления производственными ресурсами в газотранспортной сети остается актуальной, ввиду протяженности трасс, изменчивости природных условий, человеческого фактора. Одной из возможностей для ее решения является разработка компьютерных моделей управления. Подход, основанный на имитационном моделировании автоматизированной системы управления при помощи электроаналогий, рассматривается в данной статье.

**Ключевые слова:** газотранспортная сеть, система управления балансом, имитационное моделирование, метод электроаналогий, динамические параметры, дифференциальные уравнения

## I. ВВЕДЕНИЕ

Моделированию накопительно-транспортных процессов, протекающих в газотранспортной системе (ГТС), посвящено большое количество научных работ [1-16]. Учитывая специфику установившихся режимов транспортирования природного газа по магистральному газопроводу (МГ), при моделировании можно пренебречь изменением удельной энергии положения и изменением удельной кинетической энергии газа. Это объясняется тем, что скорость течения газа по трубопроводам в безаварийном состоянии, как правило, не превышает 40 м/с, разность высот расположения МГ не превышает 10 м, а рабочее давление транспортирования газа изменяется в диапазоне от 3,0 МПа до 7,8 МПа [1].

При наличии теплообмена между природным газом и окружающей средой его температура может претерпевать незначительные изменения ( $\leq 0,25\text{K}/10000\text{ м}$ ) по всей длине газопровода (квазиизотермическое течение). Это обычно наблюдается в МГ небольшой протяженности ( $\leq 10000\text{ м}$ ), не имеющих специальной тепловой изоляции. Поэтому целесообразно сделать предположение, что МГ работают в условиях изотермического режима. Исходя из вышесказанного и учитывая конструкцию МГ, процесс течения природного газа по ним можно считать изотермическим [1].

## II. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Основными уравнениями, описывающими общий одномерный сжимаемый поток через трубопровод в изотермических условиях, являются выражения, описывающие инерционный, диссипативный и упругий компоненты физических процессов: сохранения массы, количества движения и энергии (уравнение состояния), связывающее давление, объем и температуру газа [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + C^2 \frac{d(\rho\omega)}{dx} &= 0 & (1) \\ \frac{d(\rho\omega)}{dt} + \frac{d(\rho\omega^2 + P)}{dx} &= -\frac{\rho\omega|\omega|}{2D} \cdot f - \rho \cdot g \cdot \sin \alpha & (2) \\ P &= \rho \cdot Z \cdot R_g \cdot T & (3) \end{aligned} \right.$$

где  $\rho = \rho(x, t)$  – плотность транспортируемого газа;  $\omega(x, t)$  – скорость транспортируемого газа

Обе переменные являются функциями независимых аргументов: пространственного  $x$  и временного  $t$ .

$P$  – давление газа;  $T$  – температура газа;  $\alpha$  – угол наклона трубы;  $D$  – диаметр трубопровода;  $R_g = 8,3144\text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{K})$  – универсальная газовая постоянная;  $g$  – ускорение свободного падения;  $Z$  – коэффициент сжимаемости газа;  $C$  – скорость звука в газе;  $f$  – коэффициент трения;

При моделировании течений газовой смеси через узлы сочленения (разветвления) магистральных трубопроводов необходимо стремиться к обеспечению выполнения законов сохранения массы, импульса и энергии в области узла сочленения. Для построения моделей разветвленных МГ предлагается использовать закон Кирхгофа для массовых расходов, по аналогии с электрическими цепями [17].

На основе уравнений 1–3 динамики потока газа построена модель автоматизированного управления балансом. Для большей иллюстративности была применена концепция имитационной модели исследования.

## III. КОНЦЕПЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Концепция имитационного моделирования основана на известной аналогии динамических объектов (ТАБЛИЦА I. [17]).

ТАБЛИЦА I. ТАБЛИЦА АНАЛОГИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Вид системы	Тип компонента			
	Инерционный	Диссипативный	Упругий	Обозначения
Механическая	$F_n = m \frac{dv_n}{dt}$	$F_d = \mu \cdot v_d$	$F_y = \frac{1}{g} \int v_y dt$	$x$ – расстояние $v$ – скорость, $a$ – ускорение
Гидравлическая	$P_n = m_r \frac{dQ_n}{dt}$	$P_d = \mu_r \cdot Q_d$	$P_y = \frac{1}{g_r} \int Q_y dt$	$V$ – объем $Q$ – расход, $Q'$ – ускорение расхода
Электрическая	$U_n = L \frac{di_n}{dt}$	$U_d = R \cdot i_d$	$U_y = \frac{1}{C} \int i_y dt$	$q$ – заряд $I$ – ток, $\Gamma$ – ускорение потока

Для построения модели автоматизированного управления балансом применено допущение о том, что участок транспортной системы от одной газораспределительной станции (ГРС) до следующей ГРС может быть выражен в виде электрического контура с собственными динамическими параметрами и соответственно дифференциальными уравнениями. Расчетную схему для газотранспортной системы (ГТС) с одной ГРС иллюстрирует рис. 1. Рис. 1. На данном рисунке в качестве входной движущей силы показан расход  $Q_{вх}$  на входе ГТС, получаемый при помощи давления компрессора  $P_{вх}$ , при этом подсистема расхода потребителям  $Q_{грс}$ , представлена как последовательно соединенный отвод; оставшийся в цепи объем – это запас в МГ. На выходе системы находится расход  $Q_{вых}$ , символизирующий объем газа, выходящий в принимающую ГТС.

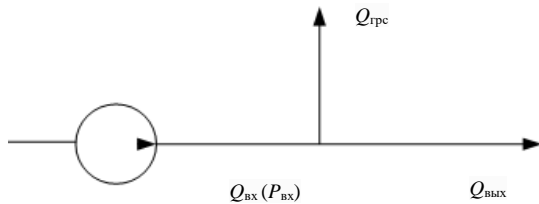


Рис. 1. Расчетная схема ГТС с одной ГРС

На основе этого подхода можно построить электрическую эквивалентную схему, имитирующую схему ГТС (рис. 2).

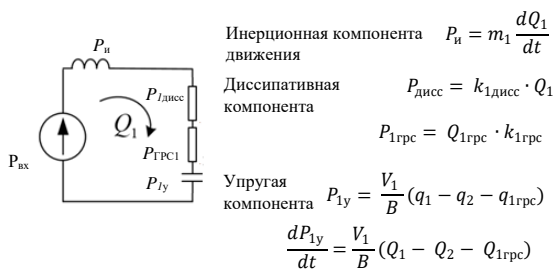


Рис. 2. Электрическая эквивалентная схема для 1 ГРС

На данном рисунке резисторами показана диссипативная составляющая движения  $P_{дисс}$  и падение давления для обеспечения расхода потребителям  $P_{грс}$ , конденсатором – упругая составляющая движения  $P_{1y}$ , она же запас, катушкой индуктивности – инерционная составляющая движения, или потери энергии  $P_{и}$  на передвигание массы газа, элементом ЭДС – давление компрессора  $P_{вх}$ .

#### IV. ПРИМЕР ПОЛУЧЕНИЯ УРАВНЕНИЙ

Для ГТС с одной ГРС получаем следующие уравнения:

Инерционная компонента движения:

$$P_{и} = m_1 \frac{dQ_1}{dt} \quad (4)$$

где  $P_{и}$  – потери давления на передвигание газа массой  $m_1$ ;  $m_1$  – гидравлическая масса [17],  $m_1 = V_1/\rho_1$ ;  $V_1$  – геометрический объем участка 1 МГ;  $\rho_1$  – плотность газа на участке 1;  $Q_1$  – расход газа на участке 1.

Диссипативная компонента движения представляет собой скоростное сопротивление среды по стенке трубопровода (трение) и равна:

$$P_{дисс} = k_{1дисс} \cdot Q_1 \quad (5)$$

где  $P_{дисс}$  – потери давления на это трение;  $k_{1дисс}$  – коэффициент гидравлического сопротивления потока газа по трубопроводу, его необходимо идентифицировать в ходе компьютерных экспериментов.

Расход на ГРС:

$$P_{1грс} = Q_{1грс}/k_{1грс} \quad (6)$$

где  $Q_{1грс}$  – объемный расход на первой ГРС;  $P_{1грс}$  – падение давления на первой ГРС;  $k_{1грс}$  – коэффициент пропускной способности первой ГРС.

Упругая компонента движения (запас) образуется из давления на перемещение объема газа  $q_1$  первого контура, за вычетом объемов потерь  $q_{грс}$  и газа  $q_2$ , переходящего на следующий контур:

$$P_{1y} = B/V_1 (q_1 - q_2 - q_{1грс}) \quad (7)$$

$$\frac{dP_{1y}}{dt} = B/V_1 (Q_1 - Q_2 - Q_{1грс}) \quad (8)$$

где  $V_1$  – геометрический объем участка МГ;  $B$  – модуль упругости, эмпирический коэффициент, характеристика способности вещества сопротивляться всестороннему сжатию;  $Q_2$  – объем, уходящий на следующий участок управления, то есть на вторую ГРС.

Топологическое уравнение или уравнение динамики для ГТС с одной ГРС получается из второго уравнения Кирхгофа для эквивалентной схемы, путем суммирования рассмотренных выше компонент из формул 4-8:

$$P_{и} + P_{1грс} + P_{дисс} + P_{1y} = P_{вх} \quad (9)$$

Подставим в формулу 9 рассмотренные ранее выражения для каждого слагаемого:

$$m_1 \frac{dQ_1}{dt} + k_{1дисс} \cdot Q_1 + k_{1грс} \cdot Q_{1грс} + P_{1y} = P_{вх} \quad (10)$$

$P_{вх}$  – давление на входе участка, для участка с первой ГРС, это давление компрессора:  $P_{вх} = P_{компр}$ .

В форме Коши уравнение имеет вид:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{1}{m_1} (P_{вх} - k_{1дисс} \cdot Q_1 - k_{1грс} \cdot Q_{1грс} - P_{1y}) \quad (11)$$

Выведем упругую компоненту из уравнения 11 в отдельное уравнение для ее формализации и расчета, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dQ_1}{dt} = \frac{1}{m_1} (P_{вх} - k_{1дисс} \cdot Q_1 - k_{1грс} \cdot Q_{1грс} - P_{1y}) & (12) \\ \frac{dP_{1y}}{dt} = \frac{B}{V_1} (Q_1 - Q_2 - Q_{1грс}) & (13) \end{cases}$$

$Q_2$  – расход газа на участке с второй ГРС. Входное напряжение второго участка, представленного в виде второго контура на рис. 3, определяется как разность потенциалов в точках 1 и 2 схемы, приведенной на этом рисунке.

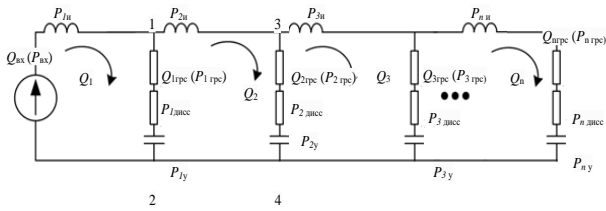


Рис. 3. Электрическая эквивалентная схема для n ГРС

Следуя закону Кирхгофа, уравнение баланса давлений для второго участка, аналогично с первой ГРС, выводится следующим образом:

$$P_{2и} + P_{2грс} + P_{2дисс} + P_{2у} = P_{2вх} \quad (14)$$

$$m_2 \frac{dQ_2}{dt} + k_{грс2} \cdot Q_{2грс} + Q_2 \cdot k_{2дисс} + P_{2у} = P_{2вх} \quad (15)$$

Подставим вместо  $P_{2вх}$  разность потенциалов в точках 1 и 2 схемы на рис. 3:

$$P_{вх2} = P_{1у} + k_{1грс} \cdot Q_{1грс} + Q_1 \cdot k_{1дисс} \quad (16)$$

В форме Коши уравнение баланса потоков для второго участка имеет вид:

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{1}{m_2} (P_{1у} + k_{1грс} \cdot Q_{1грс} + Q_1 \cdot k_{1дисс} - P_{у2} - k_{грс2} \cdot Q_{грс2} - Q_2 \cdot k_{2дисс}) \quad (17)$$

Упругая компонента для второго участка описывается уравнением:

$$\frac{dP_{2у}}{dt} = \frac{V_2}{B} (Q_2 - Q_3 - Q_{2грс}) \quad (18)$$

$Q_3$  – расход газа на участке с третьей ГРС. Входное напряжение третьего участка, представленного в виде второго контура на рис. 3, определяется аналогично, как разность потенциалов в точках 3 и 4 схемы, приведенной на этом рисунке, и так далее до n-ой ГРС.

Получаем следующую систему уравнений для 2-х ГРС из уравнений 14–18:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= \frac{1}{m_1} (P_{вх1} - P_{1у} - k_{1грс} \cdot Q_{1грс} - P_1 \cdot k_{1дисс}) \\ \frac{dP_{1у}}{dt} &= \frac{V_1}{B} (Q_1 - Q_2 - Q_{1грс}) \\ \frac{dQ_2}{dt} &= \frac{1}{m_2} (P_{1у} + k_{1грс} \cdot Q_{1грс} + Q_1 \cdot k_{1дисс} - P_{у2} - k_{грс2} \cdot Q_{грс2} - Q_2 \cdot k_{2дисс}) \\ \frac{dP_{2у}}{dt} &= \frac{V_2}{B} (Q_2 - Q_3 - Q_{2грс}) \end{aligned} \right.$$

Обобщив, получаем следующую систему уравнений для n контуров:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= \frac{1}{m_1} (P_{вх1} - P_{1у} - k_{1грс} \cdot Q_{1грс} - Q_1 \cdot k_{1дисс}) \\ \frac{dP_{1у}}{dt} &= \frac{V_1}{B} (Q_1 - Q_2 - Q_{1грс}) \\ &\dots \\ \frac{dQ_2}{dt} &= \frac{1}{m_n} (P_{1у} + k_{n-1грс} \cdot Q_{n-1грс} + Q_{n-1} \cdot k_{n-1дисс} - P_{уn} - k_{грсn} \cdot Q_{грсn} - Q_n \cdot k_{ндисс}) \\ \frac{dP_{ny}}{dt} &= \frac{V_n}{B} (Q_n - Q_{n грс}) \end{aligned} \right.$$

## V. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

На основе полученных уравнений построена динамическая структура объекта управления: для ГТС с двумя ГРС (рис. 4) и имитационная модель объекта (рис. 5). На рис. 5 также показаны графики входных и выходных переменных, давления и расхода на ГРС.

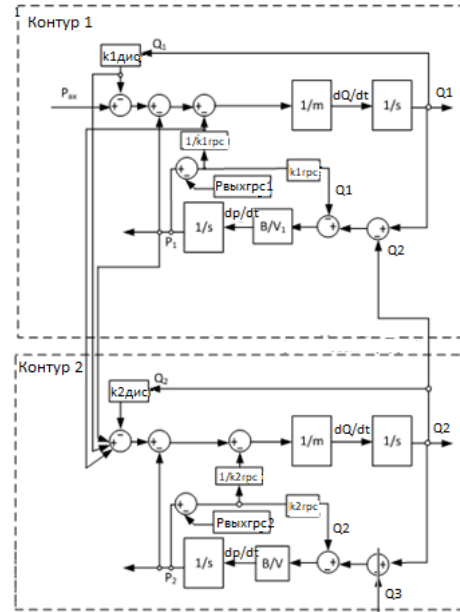


Рис. 4. Структурная схема газотранспортной системы из двух ГРС

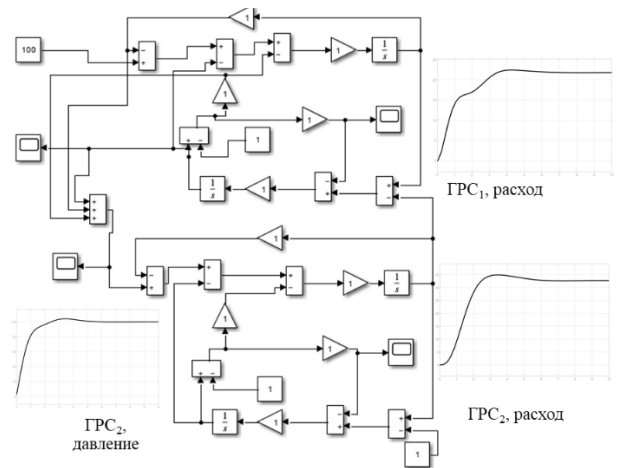


Рис. 5. Имитационная модель объекта исследования (ГТС с двумя ГРС)

Следующим этапом, путем добавления дополнительного сопротивления, была имитирована аномалия (потери газа, выделена кругом на рисунке 6). Рисунок 6 иллюстрирует изменение графиков выходных и выходных величин: давление на входе ГРС упало, расход на обеих ГРС вырос, можно сделать вывод, что модель достаточно адекватно реагирует на изменения, однако необходимо внести значения соответствующих коэффициентов и сравнить с результатами реальных данных.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлено имитационное моделирование автоматизированной системы управления балансом газа на основе электроаналогий. В ходе компьютерных экспериментов удалось показать, что система адекватно реагирует на изменения, имитирующие небаланс. В дальнейшем необходимо определить коэффициенты модели и составить уравнения передаточных функций и матрицы состояний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Селезнев В.Е., Прялов С.Н. Методы построения моделей течений в магистральных трубопроводах и каналах. М.: URSS, 2012. 560 с.
- [2] Сарданавили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. 577 с.
- [3] Кудинов Н.В., Нейдорф Р.А., Журавлёв Л.А., Тетеревлёва Е.В. Использование пакета Simulink для опорно-параметрического моделирования переходных процессов на участке магистрального газопровода // Вестник Донского государственного технического университета. 2012;12(1-2):60-66.
- [4] Chang S. A Program Development for Unsteady Gas Flow Analysis in Complex Pipe Networks // Papers book at 33 Annual Meeting of the Pipeline Simulation Interest Group (PSIG-2001), October 2001, PSIG, USA PP 1-21.
- [5] Osiadacz A. Simulation and Analysis of Gas Networks. Gulf Publishing Company, Houston, 1987.
- [6] Santos L., Alvarez O. Nuevos metodos de Calculo y simulation de Redes de Transport de Gas Natural. Gas del Estado, Buenos Aires, 1998.
- [7] Thorley A.R.D., Tiley C.H. Unsteady and transient flow of compressible fluids in pipelines – a review of theoretical and some experimental studies // J. of Heat and Fluid Flow. Vol. 8, No. 1, 1987. PP. 3-15.
- [8] Chapman K.S., Abbaspour M. Non-Isothermal Compressor Station Transient ModeUng // Papers book at 35 Annual Meeting of the Pipeline Simulation Interest Group (PSIG-2003), October 2003, PSIG, USA. PP 1-19.
- [9] Сухарев М.Г., Самойлов Р.В. Анализ и управление стационарными и нестационарными режимами транспорта газа. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2016. 399 с.
- [10] Чарный И.А. Неустойчивое движение реальной жидкости в трубах. 2-е изд. М.: Недра, 1975. 296 с.
- [11] Лурье М.В. Теоретические основы трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: учебное пособие. М.: Недра, 2017. 477 с.
- [12] Кисленко Н.А. Белинский А.В., Казак А.С. Методы, алгоритмы и инструменты моделирования и оптимизации режимов работы единой системы газоснабжения России на основе технологий искусственного интеллекта // Газовая Промышленность № 9. 821. 2021 г. С. 88-96.
- [13] Зельмат Мимун. Методы использования и управления режимами работы трубопроводного транспорта газа: Дис...докт. техн. наук: 05.13.07; 05.15.13. Москва, 1992. 332 с.
- [14] Bagheri, A., 2008, "Evaluation of Various Numerical Algorithms for Transient Flow Computation in Natural Gas Networks and Dynamic Analysis of a Typical Case", M. Sc. Thesis, Mech. Eng. Dept., Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- [15] M. Behbahani-Nejad \*, A. Bagheri The accuracy and efficiency of a MATLAB-Simulink library for transient flow simulation of gas pipelines and networks. Journal of Petroleum Science and Engineering 70 (2010) 256–265.
- [16] Тетеревлёва Е.В., Нейдорф Р.А., Ягубов З.Х. Проблемы моделирования процессов транспортировки магистральными трубопроводами // Системный анализ, управление и обработка информации: сб. науч. ст. / под общ. ред. проф. Р.А. Нейдорфа; ДГТУ; ТТИ ЮФУ. Ростов н/Д, Таганрог, 2007. С. 158-163.
- [17] Чикуров Н.Г. Синтез математических моделей технических систем методом электроаналогий // Вестник УГАТУ. 2009. №2. С. 156–165.

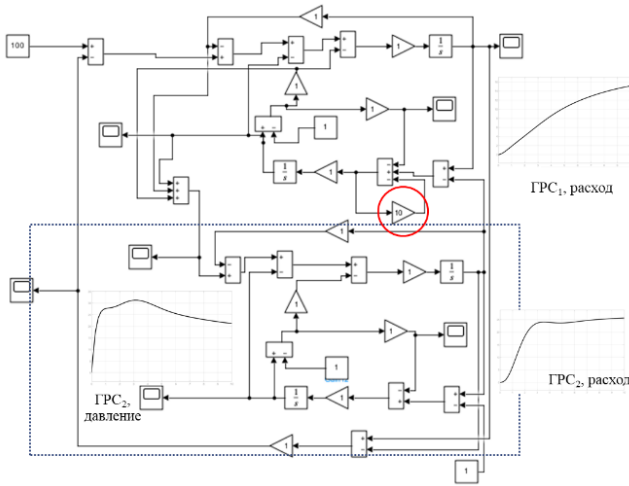


Рис. 6. Имитационная модель объекта с обратной связью и имитацией небаланса

На основе имитационной модели объекта управления была разработана функциональная схема системы управления балансом газа в ГТС (рис. 7).

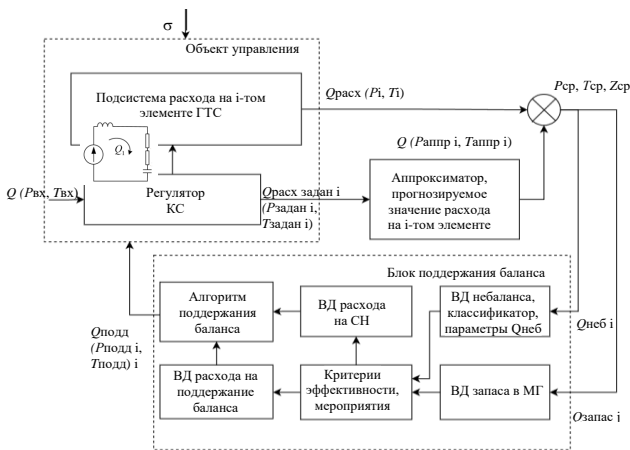


Рис. 7. Функциональная схема системы управления балансом газа в ГТС

В схему входят следующие подсистемы: подсистема расчета запаса в магистральном газопроводе на основе средних значений давления  $P_{ср}$ , температуры  $T_{ср}$  и коэффициента сжимаемости  $Z_{ср}$  на участке; подсистема учета расхода на собственные нужды СН; подсистема идентификации небаланса и подсистема учета расхода на устранение небаланса. Также в систему включён нейросетевой аппроксиматор для прогнозирования величины расхода и последующего сравнения с текущим значением результатов измерений, с целью идентификации аномалий. На систему действуют внешние воздействия  $\sigma$ . Для каждой из подсистем моделируется соответствующий виртуальный датчик ВД и синтезируется подсистема управления. Приведенные выше уравнения (14–18) можно использовать для описания динамики компонентов системы управления.