УДК 681.5; 622.691.4.053

Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-5-61-68

## Регулирование давления в линии компримирования природного газа

## Д. Х. Имаев<sup>⊠</sup>, С. В. Квашнин, М. Ю. Шестопалов

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

#### <sup>III</sup> damir.imaev@mail.ru

Аннотация. На примере технологического процесса компримирования природного газа иллюстрируются предложенные А. А. Вавиловым принципы системного подхода к построению моделей, анализу и синтезу систем управления. Базовые задачи разработки систем стабилизации стационарных режимов решены классическими методами теории автоматического регулирования в сочетании с современными инструментами расчета и компьютерной имитации. Аппроксимация газодинамических характеристик центробежного компрессора полиномом Колмогорова-Габора использована для решения задач в символьном виде. Приведен пример синтеза системы регулирования давления в гипотетической компрессорной линии.

Ключевые слова: компрессорная линия, природный газ, ранг модели, синтез алгоритма, регулятор давления

Для цитирования: Имаев Д. Х., Квашнин С. В., Шестопалов М. Ю. Регулирование давления в линии компримирования природного газа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 61–68. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-61-68.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Original article

# **Regulation of the Natural Gas Compression Line Parameters**

## D. H. Imaev<sup>™</sup>, S. V. Kvashnin, M. Yu. Shestopalov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>III</sup> damir.imaev@mail.ru

Abstract. The principles of a systematic approach to the construction of models, analysis and synthesis of control systems proposed by A. A. Vavilov are illustrated in the example of the technological process of natural gas compression. The basic tasks of developing systems for stabilizing stationary modes are solved by classical methods of the theory of automatic control in combination with modern tools and computer simulation. The approximation of a centrifugal compressor by the Kolmogorov-Gabor polynomial is used to solve problems in symbolic form. An example of the synthesis of a pressure control system in a hypothetical compressor line is given.

Keywords: compressor line, natural gas, model rank, algorithm synthesis, pressure regulator

For citation: Imaev D. H., Kvashnin S. V., Shestopalov M. Yu. Regulation of the Natural Gas Compression Line Parameters // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 61–68. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-61-68.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest

Введение. Вопросам эксплуатации и разработки систем управления установками и агрегатами компримирования природного газа посвящен ряд публикаций (например, [1]-[6]). Вместе с тем, в доступных источниках недостаточно внимания уделяется системному анализу проблемы, методологии 

исследований и разработок, математическим моделям, методам и инструментам.

Цифровые системы промышленной автоматизации и развитые средства анализа систем произвольной структуры, в принципе, позволяют реализовать самые смелые идеи для достижения по-

© Имаев Д. Х., Квашнин С. В., Шестопалов М. Ю., 2025

#### Информатика, вычислительная техника и управление

Informatics, Computer Technologies and Control

чти любых целей контроля и управления технологическими процессами транспорта газа. Программы компьютерной имитации благодаря удобству редактирования моделей, быстродействию и точности вычислений, оснащенности средствами визуализации и обработки данных позволяют анализировать качество систем управления по гибридным моделям сложных классов и структур. В принципе, реализуемы процедуры синтеза, основанные на многократном численном решении уравнений, моделирующих альтернативные системы. Такой подход возможен, если есть уверенность в существовании решения, но не эффективен, если предварительно не выбраны структура системы и тип алгоритма регулирования, не известны диапазоны их настроек. Синтез перебором не удается непосредственно применять для проектирования перспективных систем управления, для которых отсутствуют аналоги и прототипы.

Традиционные графоаналитические и аналитические методы синтеза систем автоматического регулирования доведены до совершенства. Однако они ориентированы на линейные стационарные модели и типовые структуры. Рациональное сочетание методов классической теории с современными инструментами требует системного подхода к проблеме. Математическое моделирование управляемого объекта, в соответствии с торые методики классической теории автоматического регулирования, поддержанные современными инструментами. С целью концентрации внимания на вопросах методологии рассматривается стационарный режим гипотетической компрессорной линии, модели которой предельно упрощены и носят иллюстративный характер. Базовые задачи анализа систем и синтеза алгоритмов регулирования используют модели объекта в форме передаточных функций и частотных характеристик.

Построение модели компрессорной линии. Компримирование (сжатие) природного газа реализуется компрессорной линией (КЛ), состоящей из газоперекачивающего агрегата (ГПА), трубнокрановой обвязки, фильтров очистки и аппаратов охлаждения газа. На рис. 1 изображена упрощенная технологическая схема КЛ, где указаны основные подсистемы: центробежный нагнетатель (ЦБН) с приводом от газотурбинного двигателя, УОГ – узел очистки газа, АВО – аппарат воздушного охлаждения газа, трубно-крановая обвязка.

Наименее определенная математическая модель КЛ задается перечислением множества Wкомпонентов направленного действия, которые рассматриваются как преобразователи сигналов (операторы отображения переменных, алгоритмы обработки данных). По А. А. Вавилову – это модель нулевого ранга неопределенности (R = 0) [7].



*Puc. 1.* Технологическая схема компрессорной линии *Fig. 1.* Technological scheme of the compressor line

принципами системного подхода А. А. Вавилова [7], должно строиться как последовательное раскрытие неопределенности. Анализ следует подчинить принципу неизбыточности – информативность модели должна быть необходимой и достаточной для выявления интересующего исследователя свойства. Синтез представляет «эволюцию» системы управления, в процессе которой формируется топология причинно-следственных связей компонентов, выбираются структуры операторов и конкретизируются параметры алгоритмов регулирования.

В предлагаемой статье на примере синтеза системы регулирования давления в линии компримирования природного газа иллюстрируются некоНесимметричное бинарное отношение  $R = \{(w_i, w_j) \neq (w_j, w_i)\}$  на множестве компонентов  $W = \{ \text{ЦБН, Буфер, Дроссель} \}$  описывает модель первого ранга (R = 1). Топологию модели КЛ иллюстрирует диаграмма графа (рис. 2).



*Puc.* 2. Топология модели компрессорной линии *Fig.* 2. Topology of the compressor line model

На языке дискретной математики пара множеств  $C = \langle W, R \rangle$  – это ориентированный граф, вершинам которого отвечают элементы W. Дугам орграфа – элементам отношения R – отвечают носители информации (сигналы, переменные, данные). Топологию модели КЛ можно задать и в форме сигнального графа Мэйсона как несимметричное отношение G на множестве переменных X: n – относительная частота вращения ротора ЦБН – управляющее воздействие на КЛ;  $p_i$  и  $p_0$  – давление газа на входе и выходе ЦБН;  $\varepsilon = p_0/p_i$  – степень сжатия газа;  $p_c$  – давление в сети на выходе КЛ; Q и  $Q_c$  – расходы газа через ЦБН и сеть, которую представляют дроссель и буфер.

Независимо от формы описания, модели отличает причинно-следственный характер связей компонентов направленного действия. Эта особенность моделей объектов и систем управления отражает информационно-алгоритмический подход, принятый в теории управления.

Повышение ранга модели до второго (R = 2) достигается указанием структур операторов компонентов.

Модели ЦБН. Неструктурированные модели ЦБН в виде графиков газодинамических характеристик (ГДХ)  $\varepsilon = \varepsilon(Q, n)$  приводятся в справочниках заводов-изготовителей. Известные аналитические описания используют аппроксимацию ГДХ искусственными нейронными сетями [2], символьными выражениями [8] и др. Далее предлагается аппроксимировать семейство графиков ГДХ полиномом Колмогорова–Габора [9] второй степени

$$\varepsilon = \varepsilon(Q, n) = a_0 + a_1Q + a_2n + a_{11}Q^2 + a_{22}n^2 + a_{12}Qn.$$
(1)

Степень полинома задает структуру модели, шесть параметров которой представлены символами.

*Модель сети.* Статические свойства сети на выходе ЦБН описывают уравнения дросселя

$$Q_{\rm c} = \sigma \sqrt{p_{\rm c}}; \qquad (2)$$

$$p_{\rm c} = \left(Q_{\rm c}/\sigma\right)^2,\tag{3}$$

где  $\sigma$  – проводимость сети. Величина  $\sigma$  (в условных единицах), зависит от множества не вполне определенных факторов: состояния трубно-крановой обвязки и аппарата охлаждения газа; состава, давления и температуры перекачиваемого газа и др. Динамические свойства сети определяют пневматические емкость *C* и индуктивность *L* газа в буфере [10]:

$$C\frac{dp_{\rm c}}{dt} = Q - Q_{\rm c}; \ p_{\rm c}(0), \tag{4}$$

$$L\frac{dQ}{dt} = p_0 - p_c; \quad Q(0). \tag{5}$$

Выражения (1)–(5) задают модель КЛ второго ранга (R = 2); ее параметры представлены символами.

Конкретизация их значений дает полностью определенную модель третьего ранга (R = 3). В [2] приведен пример оцифровки ГДХ в форме таблицы с тремя строками и 30 столбцами:

*Q* = [300 350 400 450 500 550 280 300 350 400 450 500 515 260 300 350 400 450 470 230 250 300 350 400 430 215 250 300 350 390];

 $n = [1.078 \ 1.078 \$ 

 $E = \begin{bmatrix} 1.545 & 1.550 & 1.543 & 1.50 & 1.44 & 1.365 & 1.46 \\ 1.465 & 1.46 & 1.43 & 1.38 & 1.325 & 1.31 & 1.38 & 1.38 & 1.365 & 1.34 \\ 1.28 & 1.26 & 1.32 & 1.32 & 1.315 & 1.285 & 1.245 & 1.215 & 1.255 \\ 1.254 & 1.24 & 1.22 & 1.17 \end{bmatrix}.$ 

Аналитическая форма модели ЦБН достигается в результате оценки коэффициентов полинома (1). Решение переопределенной системы из тридцати уравнений с шестью неизвестными

## $\Phi a = E$ ,

где  $\mathbf{a} = [a_0 a_1 a_2 a_{11} a_{22} a_{12}]'; \mathbf{\Phi} = [ones(30,1) Q' n' (Q:Q)' (n. n)' (Q:n)'], дает: <math>a_0 = 1.191007739851640;$  $a_1 = 0.000170676894350; a_2 = -0.569909626420910;$  $a_{11} = -0.000003739954150; a_{22} = 0.490370887575217; a_{12} = 0.002125998994075.$ 

Полностью определенная модель ЦБН типа 291ГЦ2-385/53-76М имеет вид

$$\varepsilon(Q, n) = 1.191 + 0.171e - 3Q - 0.5699n - 0.374e - 4Q^2 + 0.49n^2 + 0.213e - 2Qn.$$
(6)

Параметры модели сети: C, L и  $\sigma$  не удается рассчитать ввиду сложности процессов. В дальнейшем приняты их значения в условных единицах (у. е.), полученные идентификацией реальной КЛ [2]: C = 0.3 у. е.; L = 0.4 у. е.;  $\sigma = 90 \dots 150$  у. е.

Полностью определенная модель КЛ на языке графического редактора программы Simulink представляет ориентированную связь блоков направленного действия (рис. 3) [2]. Блок f(u) кодирует выражение (3), аппроксимирующее ГДХ ЦБН. На его вход подается векторный сигнал с компонентами u(1) = n и u(2) = Q, а выходом служит степень

Информатика, вычислительная техника и управление

Informatics, Computer Technologies and Control



*Puc. 3.* Компьютерная модель компрессорной линии *Fig. 3.* Computer model of the compressor line

сжатия є. Динамику сети на выходе ЦБН описывает блок State-Space, кодирующий дифференциальные уравнения буфера в форме пространства состояний матрицами (**A**, **B**, **C**, **D**). Зависимость (2) расхода газа на выходе КЛ от давления реализуют блок 1-D T(u) и блок перемножения. Блоки Sigma и Epsilon обозначены параметрами  $\sigma$  и є.

Анализ установившихся процессов. Параметры расчетной точки установившегося режима компримирования можно найти, численно решив нелинейную модель динамики КЛ. Результат компьютерной имитации после практического завершения переходного процесса показывают дисплеи на рис. 3. В этом примере получен искомый результат, так как существует единственный устойчивый «в большом» установившийся режим, а начальные условия принадлежат области его притяжения.

Следует иметь в виду, что в случае неустойчивости искомого режима модель динамики окажется не только избыточной, но и бесполезной. Для анализа равновесных режимов принцип неизбыточности предписывает использовать частные модели – модели статики.

Графический способ использует совмещенную диаграмму ГДХ для семейства значений относительной частоты вращения ЦБН *n* и статические характеристики сети с разными значениями проводимости  $\sigma$ . Результаты графического анализа:  $Q_c = Q = 354 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;  $\varepsilon = 1.37$ , практически совпадают с показаниями дисплеев на рис. 3.

Модели ГДХ нагнетателя в виде полинома Колмогорова–Габора (6) и дросселя (2), (3) позволяют найти аналитическую зависимость установившегося значения расхода Q от параметров ( $n, p_i, \sigma$ ). Равенству давлений на выходе нагнетателя  $p_0$  и в сети  $p_c$ 



*Puc. 4.* Характеристики центрооежного компрессора и проводимости сети *Fig. 4.* Characteristics of a centrifugal compressor and



$$\varepsilon(Q, n)p_i = (Q/\sigma)^2$$

отвечает уравнение

$$(a_0 + a_1 Q + a_2 n + a_{11} Q^2 + a_{22} n^2 + a_{12} Q n) p_i =$$
  
=  $(Q/\sigma)^2.$  (7)

Его решение сводится к поиску положительного корня полинома

$$\begin{bmatrix} a_{11} - 1/(p_i \sigma^2) \end{bmatrix} Q^2 + (a_1 + a_{12}n)Q + (a_0 + a_2n + a_{22}n^2),$$

что дает установившееся значение расхода

Зависимость частоты вращения ротора ЦБН, обеспечивающей заданное давление  $p_c$  в сети с проводимостью  $\sigma$ , будет получена как решение уравнения

$$Q = \frac{-(a_1 + a_{12}n) - \sqrt{(a_1 + a_{12}n)^2 - 4(a_{11} - 1)/(p_i \sigma^2)(a_0 + a_2n + a_{22}n^2)}}{2\left[a_{11} - 1/(P_i \sigma^2)\right]};$$
(8)

$$a_{22}n^{2} + (a_{2} + a_{12}Q)n + \left[a_{0} + a_{1}Q - Q^{2}/(p_{i}\sigma^{2})\right] = 0,$$

в котором переменная Q заменена с учетом (2):

$$a_{22}n^{2} + (a_{2} + a_{12}\sigma\sqrt{p_{c}})n + (a_{0} + a_{1}\sigma\sqrt{p_{c}} + a_{11}\sigma^{2}p_{c} - p_{c}/p_{i}) = 0$$

Искомая формула запишется в следующем виде:

$$n = \left\{ -\left(a_{2} + a_{12}\sigma\sqrt{p_{c}}\right) + \left[\left(a_{2} + a_{12}\sigma\sqrt{p_{c}}\right)^{2} - 4a_{22}\left(a_{0} + a_{1}\sigma\sqrt{p_{c}} + a_{11}\sigma^{2}p_{c} - p_{c}/p_{i}\right)\right]^{1/2}\right\} / 2a_{22}.$$
(9)

Линеаризация модели КЛ. Свойства инвариантности и устойчивости «в малом» установившихся процессов компримирования анализируются по моделям КЛ, построенным на моделях компонентов, линеаризованных в окрестности рабочих точек. Модели ЦБН (1) и дросселя (2) в аналитической форме позволяют получить выражения для коэффициентов линеаризации дифференцированием:

$$\delta \varepsilon = k_O \delta Q + k_n \delta n; \tag{10}$$

$$\delta \varepsilon = k_Q \delta Q + k_n \delta n; \tag{11}$$

$$k_Q = a_1 + 2a_{11}Q + a_{12}n;$$
  

$$k_n = a_2 + 2a_{22}n + a_{12}Q;$$
  

$$k_p = \sigma / (2\sqrt{p_c}).$$
 (12)

Систему линейных уравнений (5), (6), (10), (11) для изображений Лапласа отклонений переменных запишем в матричной форме (опущен знак δ):

$$\begin{bmatrix} Cs & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & Ls \\ 0 & 1 & 0 & -p_i k_Q \\ -k_p & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ p_o \\ Q_c \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_i k_n \\ 0 \end{bmatrix} n. \quad (13)$$

Решение системы уравнений (13) относительно давления  $p_c$  дает передаточную функцию (ПФ) КЛ по каналу управления

$$W_{pn}(s; n, Q) = p_{c}(s)/n(s) =$$

$$= \frac{p_{i} k_{n}}{LCs^{2} + (k_{P}L - Cp_{i} k_{Q})s + (1 - k_{P}p_{i} k_{Q})}. (14)$$

Представим ПФ (14) в форме

$$W_{Pn}(s) = \frac{K_{pn}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$$
(15)

где коэффициент усиления

$$K_{Pn} = p_i k_n / (1 - k_P p_i k_Q),$$
 (16)

а выражение для постоянных времени -

$$T_{1,2} = -2LC / \left[ -(Lk_P - Cp_i k_Q) \pm \sqrt{(Lk_P - Cp_i k_Q)^2 - 4LC(1 - p_i k_P k_Q)} \right].$$
(17)

Синтез системы управления и регулирования. Топология системы управления и регулирования давления в КЛ (концептуальная модель) изображена на рис. 5.

Задачи синтеза решаются поэтапно по соответствующим частным моделям. По формуле (8) вычисляется управляющее воздействие  $n^*$  – относительная частота вращения ротора ЦБН, обеспечивающая заданное давление в сети  $p^*$ . В условиях малых возмущений давление поддерживается системой регулирования с обратной связью (рис. 5).



Puc. 5. Концептуальная модель системы управления Fig. 5. Conceptual model of the control system

Структура алгоритма регулирования выбирается по требованию астатизма – нулевой установившейся реакции системы на постоянные возмущения. Так как изображение постоянных возмущений имеет нулевой полюс, требование селективной (избирательной) инвариантности удовлетворяется, если ПФ регулятора тоже имеет нулевой полюс. Также система регулирования не должна и, в силу ограниченности ресурсов, не может менять динамику объекта. Неуправляемость устойчивого состояния объекта достигается компенсацией доминирующего полюса  $-1/T_1$  ПФ объекта (15) равным ему нулем ПФ регулятора.

Выполнение требований селективной инвариантности, частичного невмешательства в собственную динамику объекта и структурной устойчивости системы определяют ПФ алгоритма регулирования

$$W_{\rm PI}(s) = K_{\rm PI}\left(T_{\rm PI} + \frac{1}{s}\right).$$
 (18)

Тип алгоритма регулирования удовлетворяет необходимому условию структурной устойчивости рабочей точки стационарного режима компримирования. Коэффициенты характеристического полинома системы

$$A(s) = s(T_{1}s+1)(T_{2}s+1) + K_{p_{n}}K_{PI}(T_{PI}s+1)$$
(19)

строго положительны при любой настройке PIрегулятора.

Параметрический синтез системы регулирования давления сводится к расчету настроек PIрегулятора с ПФ (18). Компенсация постоянной времени  $T_1$  ПФ объекта (17) сразу определяет одну из настроек  $T_{\rm PI} = T_1$ . Значение  $K_{\rm PI}$  выбирается по требованию инвариантности до  $\varepsilon$  – амплитуда установившейся реакции системы на возмущения с частотой  $\omega_{\rm F}$  должна ослабляться в 1/ $\varepsilon$  раз. Следовательно, на этой частоте усиление контура должно быть не менее  $L_{\rm F} = 20 \lg(1/\varepsilon)$  дБ.

Рис. 6 иллюстрирует асимптотическую ЛАЧХ объекта  $L_0$  и «желаемую» ЛАЧХ контура регулирования системы  $L_{\rm PI}$ . Кружочек на ЛАЧХ контура регулирования с РІ-регулятором  $L_{\rm PI}$  указывает на компенсирующие друг друга полюс ПФ объекта и нуль ПФ регулятора на частоте  $\omega_1 = 1/T_1$ . Так как ЛАЧХ контура проходит выше «контрольной» точки с координатами ( $\omega_{\rm F}$ ,  $L_{\rm F}$ ), выполняется условие инвариантности до є.

Желаемая ЛАЧХ должна проходить не выше контрольной точки с координатами ( $\omega_2 = 1/T_2$ ,  $-\Delta L$ ), где  $\Delta L$  – требуемый запас устойчивости по модулю.

Если среднечастотная асимптота – прямая с наклоном –20 дБ/дек проходит через обе контрольные точки, то имеется единственное решение.

Неединственность решения используется для оптимизации качества по дополнительным критериям. Пусть выбран критерий максимизации частоты среза контура

$$\omega_{\rm cp} = k_{\rm pa3} \rightarrow \max$$

при ограничении запаса устойчивости по модулю Δ*L*.

Графический способ решения задачи оптимизации очевиден и не требует поиска. Следует провести прямую с наклоном –20 дБ/дек через точку ( $\omega_2$ , – $\Delta L$ ) до пересечения с осью абсцисс на частоте  $\omega_{cp\ max}$ . В системе с астатизмом первого порядка частота среза равна добротности контура

$$\omega_{\rm cp\ max} = k_{\rm pa3} = K_{\rm PI} K_{pn},$$

следовательно,

$$K_{\rm PI} = \omega_{\rm cp\,max} / K_{pn}$$

Аналитическое решение выводится из уравнения асимптоты, проходящей через нижнюю контрольную точку:

$$L(\omega_{\rm cp}) - 20 \lg(\omega_2/\omega_{\rm cp}) = -\Delta L.$$

По определению  $L(\omega_{cp}) = 0$ , следовательно, отношение частот  $\omega_2/\omega_{cp}$  равно  $10^{\Delta L/20}$ , откуда следует формула для вычисления оптимальной настройки

$$K_{\rm PI} = \frac{1}{K_{p_n} T_2 10^{\Delta L/20}}.$$
 (20)

Отсутствие решения задачи настройки PIрегулятора в исходной постановке может потребовать ослабления требований к инвариантности (увеличения  $\varepsilon$ ), запасу устойчивости (уменьшения  $\Delta L$ ) или усложнения алгоритма регулирования. Например, компенсация двух полюсов ПФ объекта двумя нулями ПФ регулятора означает выбор PID-алгоритма регулирования [2].



Пример синтеза системы управления и регулирования давления в КЛ. Заданы: модель ЦБН в виде полинома (3) и модель сети на его выходе (4)–(6) с параметрами C = 0.3 у. е.; L = 0.4 у. е.;  $\sigma = 113$  у. е. Давление газа на входе ЦБН  $p_i = 7.14$  МПа. Цель системы управления – поддержание давления газа на выходе сети  $p_{c}^{*} = 9.80 \text{ MI}$ a.

Относительная частота вращения ЦБН, обеспечивающая заданное давление в сети, вычисляется по (9) и равна  $n^* = 0.9218$ . Расход газа в установившемся режиме вычисляется по (8) и равен  $Q^* = 352.9553 \text{ м}^3/\text{мин.}$ 

Алгоритм регулирования синтезируется по модели КЛ, линеаризованной в окрестности расчетной точки  $(p_{c}^{*}, n^{*}, Q^{*}) = (9.80, 0.9218, 113).$ Вычисление коэффициентов линеаризации ЦБН и дросселя по (12) дает

$$k_Q = -5.1119e - 04; \ k_n = 1.0853; \ k_p = 18.0769.$$

Линеаризованная в расчетной точке модель КЛ описывается ПФ, параметры которой вычисляются по (16) и (17):

$$W_{pn}(s) = \frac{K_{pn}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} =$$
$$= \frac{7.2692}{(6.7676s + 1)(0.0166s + 1)}.$$

Условие компенсации полюса ПФ дает одну из настроек регулятора  $T_{\text{PI}} = T_1 = 6.77$  с. Другая настройка  $K_{\rm PI} = 0.8287$  вычисляется по (20) из условия  $\omega_{cp max} = 6.0117 c^{-1}$  при запасе устойчивости по амплитуде  $\Delta L = 20$  дБ.

Корни характеристического полинома системы (19) с оптимальными настройками РІ-регулятора

#### Список литературы

1. Комплексная система автоматического управления / М. Ф. Селезнев, С. Д. Альтшуль, С. В. Квашнин, А. В. Черников // Газотурбинные технол. 2017, № 8. C. 26-27.

2. Распределенное управление процессами компримирования природного газа / С. Д. Альтшуль, Д. Х. Имаев, С. В Квашнин, М. Ю. Шестопалов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 183 с.

3. Слободчиков К. Ю. Применение математических моделей газоперекачивающего агрегата в расчетных задачах системы управления режимом газопровода / Сб. тр. V Всерос. научн. конф. с междунар. уч. «Матем. моделирование и краевые задачи». Ч. 2. 2008. Самара: СамГТУ, 2008. С. 113-117.

4. Евдокимов Я. А. Регулирование ГПА: возникающие проблемы и пути их решения / Совр. технол. автоматизации. 2009. № 2. С. 80-86.

$$A(s) = (T_2 s^2 + s + K_{pn} K_{PI})(T_{PI} s + 1) =$$
  
= (0.0166s<sup>2</sup> + s + 6.024)(6.767s + 1)

равны: -0.1478; -6.7891; -53.4518. Действительные отрицательные корни гарантируют апериодический характер процессов регулирования в малой окрестности выбранной точки стационарного режима компримирования.

Заключение. На примере линии компримирования природного газа иллюстрируется последовательное описание причинно-следственной топологии, структур операторов компонентов и конкретизации параметров модели. Моделирование, построенное как повышение ранга неопределенности, предпосылка неизбыточности процедур анализа систем управления. Аппроксимация газодинамической характеристики центробежного компрессора полиномом Колмогорова-Габора позволяет решать базовые задачи разработки систем автоматического регулирования в символьном виде.

Тип алгоритма регулирования рабочей точки выбран по условиям селективной инвариантности и структурной устойчивости рабочей точки стационарного режима компримирования. Задача расчета настроек по условию избирательной управляемости состояния объекта и критерию максимизации полосы пропускания частот контура регулирования при ограничении запаса устойчивости системы решена в символьном виде и не требует поиска.

Разработка системы управления и регулирования завершается компьютерной имитацией системы, образованной исходной нелинейной моделью и PI-регулятором с целью оценки размеров области притяжения точки равновесия - устойчивости «в большом» выбранной рабочей точки.

5. Гузельбаев Я. З. Некоторые особенности динамических свойств центробежных компрессорных установок и сети / Компрессорная техника и пневматика. 2009. № 2. С. 8–11.

6. Крюков О. В. Аналитические модели транспорта газа // Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2017. № 1 (116). C. 161-172.

7. Имитационное моделирование производственных систем / А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев, В. И. Плескунин, Б. Ф. Фомин, Г. Зальтцер, В. Зауер, В. Станек, М. Франк, В. Фридрих, Я. Шаллер, Х. Штремпель.; под общ. ред. А. А. Вавилова. М.: Машиностроение, 1983. 416 с.

8. Gravdahl J. T., Egeland O. A Moore-Greitzer axial compressor model with spool dynamics // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. 1998. Vol. 5. P. 4714-4719. doi: 10.1109/CDC.1997.649750.

Informatics, Computer Technologies and Control

9. Gabor D., Wilby W. P. L., Woodcock R. A universal non-linear filter, predictor and simulator which optimizes itself by a learning process // Proc. of the IEE – Part B:

Electron. and Commun. Engin. 1961. Vol. 108, no. 40. P. 422–438. doi: 10.1049/pi-b-2.1961.0070.

.....

10. Казакевич В. В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах. М.: Машиностроение, 1974. 264 с.

#### Информация об авторах

Имаев Дамир Хабибович – д-р техн. наук, проф. каф. автоматики и процессов управления, факультет компьютерных технологий и информатики СПбГЭТУ «ЛЭТИ». E-mail: damir.imaev@mail.ru

Квашнин Сергей Владимирович – генеральный директор ООО «НПФ «Система-Сервис», ул. Арсенальная, д. 66, к. 3, стр. 1, офис 401. Санкт-Петербург, 195009, Россия. E-mail: ikvaser@gmail.com

Шестопалов Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, зав. каф. автоматики и процессов управления, факультет компьютерных технологий и информатики СПбГЭТУ «ЛЭТИ». E-mail: shestopalov\_08@mail.ru

#### References

1. Kompleksnaja sistema avtomaticheskogo upravlenija / M. F. Seleznev, S. D. Al'tshul', S. V. Kvashnin, A. V. Chernikov // Gazoturbinnye tehnol. 2017, № 8. S. 26–27. (In Russ.).

2. Raspredelennoe upravlenie processami komprimirovanija prirodnogo gaza / S. D. Al'tshul', D. H. Imaev, S. V Kvashnin, M. Ju. Shestopalov. SPb: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2021. 183 s. (In Russ.).

3. Slobodchikov K. Ju. Primenenie matematicheskih modelej gazoperekachivajushhego agregata v raschetnyh zadachah sistemy upravlenija rezhimom gazoprovoda / Sb. tr. V Vseros. nauchn. konf. s mezhdunar. uch. «Matem. modelirovanie i kraevye zadachi». Ch. 2. 2008. Samara: SamGTU, 2008. S. 113–117. (In Russ.).

4. Evdokimov Ja. A. Regulirovanie GPA: voznikajushhie problemy i puti ih reshenija / Sovr. tehnol. avtomatizacii. 2009. № 2. S. 80–86. (In Russ.).

5. Guzel'baev Ja. Z. Nekotorye osobennosti dinamicheskih svojstv centrobezhnyh kompressornyh ustanovok i seti / Kompressornaja tehnika i pnevmatika. 2009. № 2. S. 8–11. (In Russ.). 6. Krjukov O. V. Analiticheskie modeli transporta gaza // Tr. NGTU im. R. E. Alekseeva. 2017. № 1 (116). S. 161–172. (In Russ.).

7. Imitacionnoe modelirovanie proizvodstvennyh sistem / A. A. Vavilov, D. X. Imaev, V. I. Pleskunin, B. F. Fomin, G. Zal'tcer, V. Zauer, V. Stanek, M. Frank, V. Fridrih, Ja. Shaller, X. Shtrempel'; pod obshh. red. A. A. Vavilova. M.: Mashinostroenie, 1983. 416 c. (In Russ.).

8. Gravdahl J. T., Egeland O. A Moore-Greitzer axial compressor model with spool dynamics // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. 1998. Vol. 5. P. 4714–4719. doi: 10.1109/CDC.1997.649750.

9. Gabor D., Wilby W. P. L., Woodcock R. A universal non-linear filter, predictor and simulator which optimizes itself by a learning process // Proc. of the IEE – Part B: Electron. and Commun. Eng. 1961. Vol. 108, no. 40. P. 422–438. doi: 10.1049/pi-b-2.1961.0070.

10. Kazakevich V. V. Avtokolebanija (pompazh) v kompressorah. M.: Mashinostroenie, 1974. 264 s. (In Russ.).

### Information about the authors

**Damir H. Imaev** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automation and Control Processes, Faculty of Computer Technology and Informatics of Saint Petersburg Electrotechnical University. E-mail: damir.imaev@mail.ru

**Sergey V. Kvashnin** – General Director of SPF «Sistem-Service», LCC. 66 Arsenalnaya St., room 3, building 1, office 401. Saint Petersburg, 195009, Russia. E-mail: ikvaser@gmail.com

Michail Yu. Shestopalov – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes, Faculty of Computer Technology and Informatics of Saint Petersburg Electrotechnical University. E-mail: shestopalov 08@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.01.2025; принята к публикации после рецензирования 28.03.2025; опубликована онлайн 26.05.2025.

Submitted 24.01.2025; accepted 28.03.2025; published online 26.05.2025.