

S. A. Abbas, A. I. Vodyaho
Saint Petersburg Electrotechnical University

N. A. Zhukova
St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (SPCRAS)

M. A. Chervontsev
Saint Petersburg Research & Engineering Center

Aung Myo Thaw
ITMO University

ABOUT ONE APPROACH TO BUILDING DATA COLLECTION SYSTEMS IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS BUILT ON FOG COMPUTING PLATFORMS

The modern stage of development of technology is characterized by an increase in the complexity of created anthropogenic systems, a constant expansion of the scope of application of information technologies and an increase in the intellectual level of created anthropogenic systems and the emergence of new paradigms for building information-oriented systems such as cyber-physical systems, the Internet of things, cloud and fog systems. Modern information-oriented systems often have a dynamic structure and implement complex behavior. Data collection in such systems is a non-trivial task. The paper proposes a model approach to building information collection systems in multilevel cyber-physical systems built on fog computing platforms. Models are proposed to be built in terms of knowledge. To describe the structure and behavior graph models are used. It is proposed to use multi-level relatively finite state automata to control the models. A distinctive feature of the proposed approach is the ability to automatically build models.

Cyber-physical systems, fog platforms, data collection systems, model knowledge

УДК 681.5; 622.691.4.053

Д. Х. Имаев, М. Ю. Шестопалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

С. В. Квашнин
АО «НПФ „Система-Сервис“»

Моделирование технологического процесса компримирования природного газа как объекта управления. Переходные процессы*

Предложена упрощенная модель динамики компрессорной линии, реализующая управляемый технологический процесс сжатия природного газа. Компрессорная линия образована газоперекачивающим агрегатом и сетью на его выходе. Процедуры моделирования и идентификации представляются в виде последовательного увеличения информации о причинно-следственной топологии, структурах блоков преобразования сигналов, параметрах объекта и взаимосвязи объекта с окружающей средой. Исследовано влияние инерции и упругости объема газа на переходные процессы в компрессорной линии. Проиллюстрирована процедура параметрической идентификации нелинейной компьютерной модели компрессорной линии на основе архивных данных реальной компрессорной станции. Линеаризованные модели используются для вынесения суждений о свойствах устойчивости, управляемости и наблюдаемости компрессорной линии.

Природный газ, компримирование, управление, переходный процесс, идентификация, компьютерная имитация, линеаризация, устойчивость, управляемость, наблюдаемость

Целью управления компрессорными линиями магистральных газопроводов является поддержа-

ние заданных параметров перекачиваемого природного газа в условиях нежелательного влияния среды функционирования. В настоящее время успешно эксплуатируются распределенные систе-

* Окончание, начало в № 6/2020.

мы автоматизированного управления технологическими процессами компримирования природного газа, обеспечивающие устойчивость режимов и инвариантность к возмущениям (см., например, [1]–[4]). Наиболее полно системы комплексного управления газоперекачивающими агрегатами представлены в разработках АО «НПФ „Система-Сервис“», широко применяемых на компрессорных станциях магистральных газопроводов [2], [3].

Методы и средства разработки систем автоматического управления, основанные на формализованном описании управляемых объектов и среды их функционирования, т. е. на математических моделях, составляют основу аналитических методов синтеза алгоритмов управления. Доступно небольшое число публикаций, посвященных методикам построения моделей динамики компрессорных линий как объектов управления (см., например, [5]–[8]). В [9] обсуждаются модели установившихся режимов компримирования, описывающие связи между неизменными во времени значениями технологических параметров. Актуальность дальнейших исследований по моделированию динамики технологических процессов компримирования природного газа определяется тем, что для предвидения реакции объекта на воздействия необходимо знать не только состояние объекта, но также скорости изменения переменных, их ускорения, а иногда и производные более высоких порядков. Модели динамики непрерывных систем в виде дифференциальных уравнений связывают текущие значения переменных с их производными по времени.

Моделирование и идентификацию сложных объектов и систем управления целесообразно проводить в соответствии с предложенным А. А. Вавиловым принципом последовательного раскрытия неопределенности [10], [11]. Построение моделей предваряется системным анализом для обособления объекта от среды функционирования, в результате чего выделяются модели:

- собственно объекта управления M_S ;
- объекта со связями $M_{YSF} = \langle M_{YS}, M_S, M_{SF} \rangle$ со средой на выходе M_{YS} и входе M_{SF} ;
- расширенного объекта $M_{RS} = \langle M_Y, M_{YSF}, M_F \rangle$, получаемой дополнением модели M_{YSF} моделью среды на входе M_F и выходе M_Y .

Сложные моделируемые объекты подвергаются декомпозиции – расчленению на взаимодействующие подсистемы направленного действия – как правило, с учетом выполняемой ими функции. Раскрытие причинно-следственной структуры подсистем дает модели иерархической структуры. Процесс декомпозиции завершается, если нет необходимости в ее продолжении или оно слишком сложно. Число уровней иерархической модели объекта $l = 0, 1, \dots, L$, определяется принятой исследователем глубиной декомпозиции. У подсистем низшего, нулевого уровня причинно-следственная топология не раскрывается.

На каждом уровне иерархии моделирование представляет последовательное повышение информативности, по терминологии А. А. Вавилова – ранга модели MR :

$R = 0$ – перечисление множества подсистем, переменных их входов и выходов;

$R = 1$ – дополнение модели нулевого ранга несимметричным отношением на множестве подсистем/переменных, что дает причинно-следственную топологию в виде ориентированного графа. Если указаны функции подсистем, то говорят, что построена концептуальная модель объекта – отношение на множестве понятий;

$R = 2$ – для подсистем ($l = 0$)-го уровня назначаются классы и структуры операторов отображения переменных;

$R = 3$ – рассчитываются или оцениваются параметры моделей, что дает полностью определенные модели.

Модели нулевого ($R = 0$) и первого ($R = 1$) рангов являются результатом системного анализа объекта, среды и цели управления, а также априорных знаний. Аналитический способ позволяет строить модели второго ранга ($R = 2$) – выбирать класс и структуру операторов отображения переменных на основе законов природы, которым подчиняются процессы в объекте. Для построения моделей третьего, параметрического ранга ($R = 3$) реально действующих объектов обычно прибегают к экспериментальному способу. В частности, параметры моделей технологического процесса компримирования природного газа не всегда поддаются расчету. Для полной определенности моделей необходимо обращаться к процедурам идентификации – экспериментам и обработке данных.

Компрессорная линия как динамический объект управления. Компрессорная линия (КЛ) образована нагнетателем с газотурбинным приво-

дом и сетью на его выходе в виде аппарата воздушного охлаждения и трубо-крановой обвязки. Множество блоков: газотурбинный двигатель (ГТД); центробежный нагнетатель (ЦБН) с известной газодинамической характеристикой (ГДХ); емкость сети на выходе ЦБН (буфер) и сопротивление сети (дроссель) представляют модель нулевого ранга M_S0 .

Диаграмма на рис. 1 изображает модель КЛ первого, топологического ранга M_S1 . Несимметричному отношению на множестве блоков отвечают линии со стрелками, по которым передается информация о степени сжатия газа ϵ , давлениях на выходе P_0 и входе P_i компрессора, входе дресселя P_c , а также объемных расходах газа через нагнетатель Q и дрессель Q_c . Проводимость сети обозначена через σ ; N – частота вращения ротора нагнетателя; G_B – массовый расход воздуха на входе камеры сгорания газогенератора; $P_{T.G}$ – давление топливного газа.

Модель связи КЛ со средой на входе M_{SF} описывает управляющие воздействия – задание частоты вращения ротора нагнетателя $N_{зад}$ и проводимости сети σ (в ситуации манипулирования антипомпажным клапаном и кранами). К возмущениям относятся: давление на входе ЦБН P_i , массовый расход воздуха на входе камеры сгорания газогенератора G_B , давление топливного газа $P_{T.G}$. Расход газа на выходе КЛ Q_c относится к модели связи КЛ со средой на выходе M_{YS} .

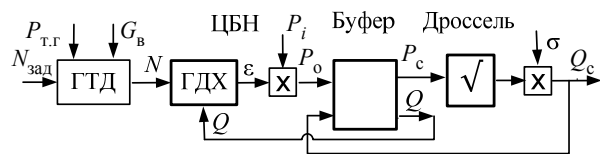


Рис. 1

Модель объекта со связями $M_{YSF} = \langle M_{YS}, M_S, M_{SF} \rangle$ описывает подсистемы КЛ разных уровней: $l = 0$ – следящие приводы дозатора топливного газа, клапана антипомпажного регулирования и кранов; $l = 1$ – регулирование частоты вращения нагнетателя и помпажного запаса; $l = 2$ – управление основными технологическими параметрами процесса компримирования (степенью сжатия, давлением и расходом газа); $l = 3$ – управление компрессорным цехом и т. д. Иерархия модели отражает отношение подчиненности – каждая из подсистем нижележащего уровня вы-

полняет функцию исполнительного органа в системе вышележащего уровня. Чем ниже уровень иерархии системы, тем выше быстродействие процессов; примерная длительность переходных процессов разных уровней: $l = 0$ – десятки миллисекунд; $l = 1$ – сотни миллисекунд; $l = 2$ – секунды; $l = 3$ – минуты.

Следующий шаг последовательного раскрытия неопределенности модели КЛ заключается в задании класса и структуры операторов блоков (моделей нулевого уровня). Для некоторых блоков КЛ этот шаг сделан при описании диаграммы на рис. 1: ЦБН представлен ГДХ и блоком перемножения; буфер моделируется системой линейных дифференциальных уравнений, а дрессель – блоками извлечения квадратного корня и перемножения.

Динамические свойства управляемой КЛ (уровень $l = 2$) определяются свойствами инертности и упругости объема газа в трубопроводной сети на выходе компрессора. Законы гидромеханики (см., например, [12], [13]) позволяют записать систему дифференциальных уравнений:

$$C \frac{dP_c}{dt} = Q - Q_c; \quad (1)$$

$$L \frac{dQ}{dt} = P_0 - P_c. \quad (2)$$

Уравнение (1) отражает зависимость скорости изменения давления в буфере от разности объемных расходов на входе Q и выходе Q_c . Уравнение (2) означает, что скорость изменения расхода газа пропорциональна разности давлений на входе и выходе сети. В уравнениях (1) и (2): L – инертность, характеризующая стремление противодействовать изменениям потока газа; C – емкость. Дифференциальные уравнения (1) и (2) для пневматической цепи аналогичны уравнениям электрических цепей (см., например, [14]), поэтому для обозначения пневматической инертности и упругости газа приняты те же символы – L и C .

Дифференциальные уравнения (1), (2) дополняются нелинейными функциями, описывающими пневматическое сопротивление сети

$$Q = \sigma \sqrt{P_c}, \quad (3)$$

где σ – проводимость сети и ГДХ нагнетателя

$$P_0 = \epsilon(N, Q)P_i. \quad (4)$$

Между объемным расходом Q и давлением газа P_c нет объективной причинно-следственной зависимости, поэтому эти переменные далее рассматриваются как компоненты вектора состояния

$$\mathbf{v} = (P_c, Q)^T,$$

а уравнения (1) и (2) представляются в матричной форме пространства состояний

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= A\mathbf{v} + B\mathbf{u}; \\ \mathbf{y} &= C\mathbf{v} + D\mathbf{u}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{u} = (P_o, Q_c)^T$ – вектор входа; \mathbf{y} – вектор выхода;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}; C = \mathbf{I}; D = 0$$

– матрицы состояний, входа, выхода и обхода.

Уравнения (1)–(5) задают нелинейную динамическую модель КЛ второго, структурного ранга M_{YSF} 2.

Компьютерная модель КЛ на языке графического редактора программы MatLab/Simulink представлена на рис. 2, где замаскирована искусственная нейронная сеть, аппроксимирующая ГДХ нагнетателя типа 291ГЦ2-385/53-76М [9]. На вход нагнетателя подается векторный сигнал с компонентами $n = N/N_{\text{ном}}$ и Q , а выходами являются степень сжатия газа ϵ и давление P_o . Блок State-Space реализует дифференциальные уравнения в форме пространства состояний (5). Выходные порты модели КЛ: расход Q_c и давление P_c газа; входы: относительная частота вращения n и проводимость сети σ (следствие управляющих и возмущающих воздействий), давление газа на входе ЦБН P_i (возмущение).

Параметрическая идентификация модели КЛ. Конкретизация параметров объекта и воздействий дает полностью определенную расширенную модель M_{R3} , позволяющую имитировать процессы компримирования.

Параметры L и C , отражающие свойства инертности и упругости объема газа на выходе нагнетателя, а также проводимость сети σ не поддаются расчету. Их удастся оценить только в результате обработки данных экспериментов.

Простота редактирования компьютерных моделей, быстрота имитации и развитые средства визуализации позволяют подстраивать небольшое число параметров модели «вручную». Результаты «ручной» идентификации при необходимости уточняются с помощью специализированных инструментов, например MatLab/Simulink/Analysis/Parameter Estimation фирмы «The MathWorks, Inc.». Эффективность инструментов автоматической подстройки моделей повышается, если известны интервалы искомым параметров или/и указаны начальные значения поиска. Следует заметить, что предварительная человеко-машинная процедура подстройки искомым параметров способствует выявлению адекватности структуры модели, помогает убедиться в существовании решения задачи и сходимости процедуры.

Методика параметрической идентификации модели КЛ далее иллюстрируется на примере архивных данных компрессорной станции «Приводино» (длительность эксперимента 18 000 с, период дискретизации времени 1 с). Графики изменения частоты вращения четырех агрегатов (рис. 3) построены по данным файла «Текущий 051119_180932_аналоговые.csv». В процессе эксперимента газоперекачивающий агрегат ГПА-1 начинает выключаться после 8000-й секунды, ГПА-3 включается с опережением, начиная до 6000-й секунды, а ГПА-2 и ГПА-4 работают на постоянных оборотах.

Выберем для идентификации КЛ с первым агрегатом ГПА-1. Как видно из рис. 3, на вход системы регулирования подается тестовый сигнал в виде двухступенчатого снижения задания частоты вращения. Поскольку на стационарных режимах малы вариации переменных, следует ориентироваться на более информативные отрезки данных, отвечающие переходным процессам. Важный критерий выбора интервалов – наличие установившихся участков до и после переходного процесса. Рассмотрим переходные процессы, вызванные снижением частоты с 4700 до 4200 об/мин (примерно после 8000 с).

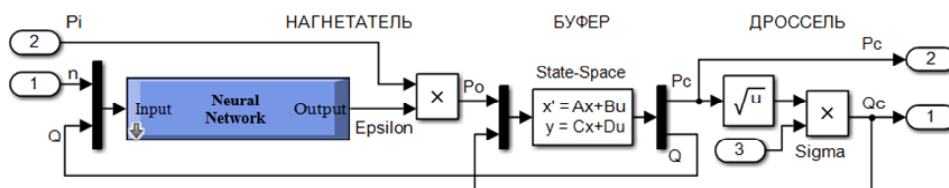


Рис. 2

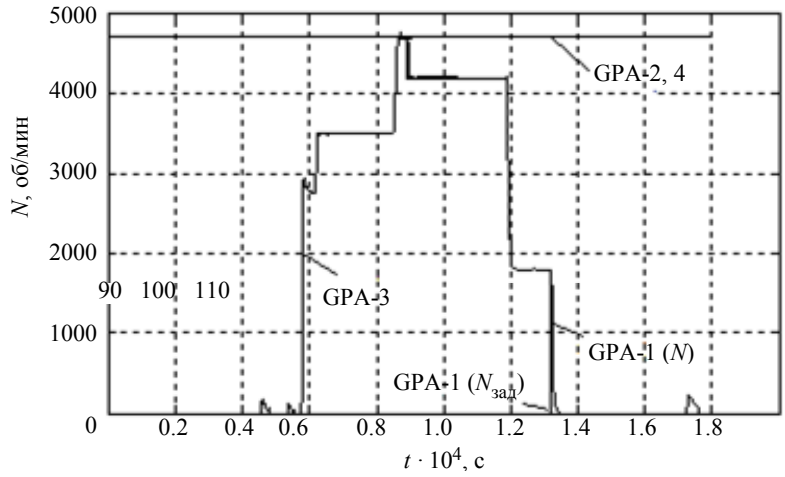


Рис. 3

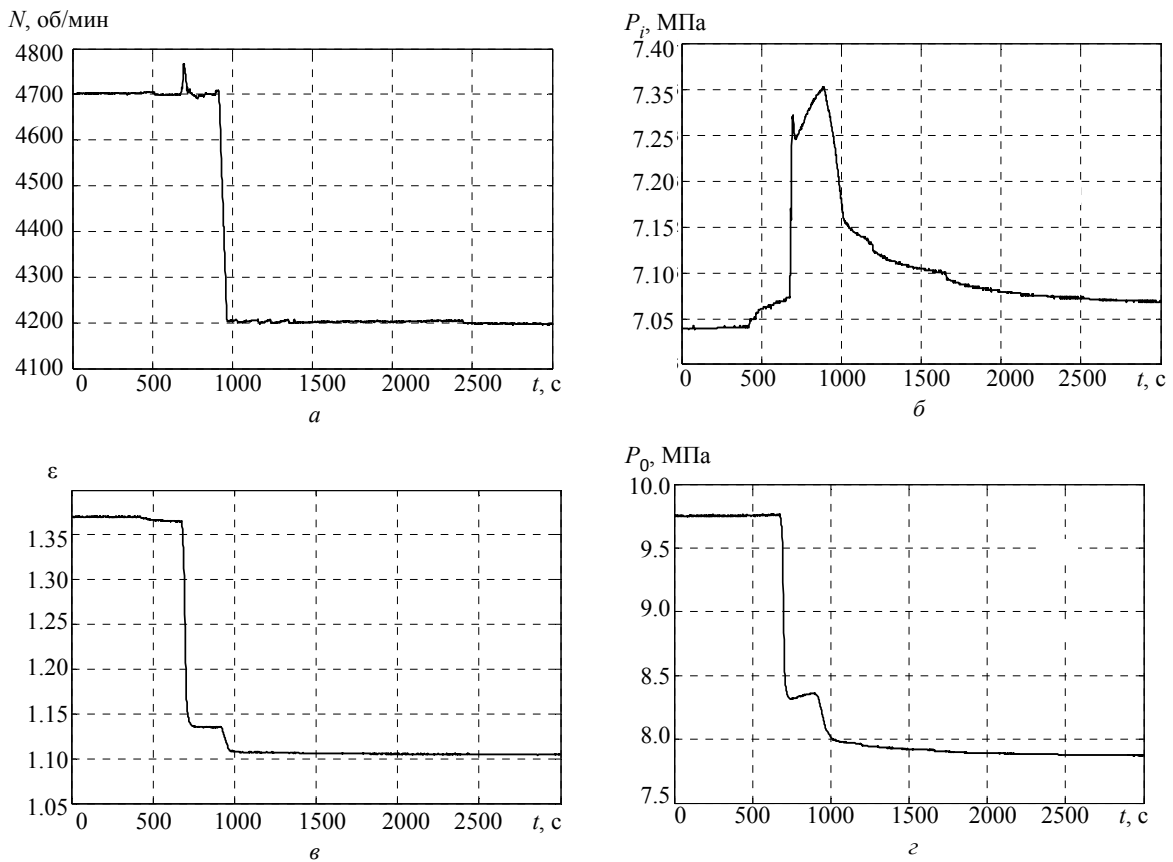


Рис. 4

На рис. 4, а приведен график изменения частоты вращения N (данные с идентификатором GPA_1_f (8000:11000)); рис. 4, б представляет график изменения давления на входе ГПА P_i (данные GPA_1_Pi(8000:11000)). График изменения степени сжатия ϵ (данные GPA_1_CR(8000:11000)) приведен на рис. 4, в, а изменения давления на выходе P_o (данные GPA_1_Po(8000:11000)) – на рис. 4, г. Данные с помощью блоков From Workspace подаются на входы компьютерной модели (см. рис. 2).

Методику оценивания параметров модели КЛ рассмотрим без учета динамики быстродействующей подсистемы нижележащего уровня – системы автоматического регулирования частоты вращения нагнетателя и ГТД, т. е. исполнительного органа системы управления КЛ. Качественный вывод о влиянии на динамику КЛ подсистемы регулирования частоты вращения нагнетателя может быть сделан по кривым на рис. 3. Кривые задания $N_{зад}$ и фактическая частота вращения нагнетателя N в принятом масштабе по оси вре-

мени практически сливаются, что свидетельствует о допустимости игнорирования динамики газотурбинного привода на уровне систем регулирования основных технологических параметров компримирования газа.

В [9] рассмотрены методики расчета степени сжатия, давления на выходе нагнетателя и проводимости сети σ в установившихся режимах: графически – по совмещенной диаграмме; численно – по компьютерной модели статики. В рассматриваемом примере на установившихся интервалах до ($N = 4700$ об/м) и после переходного процесса ($N = 4200$ об/м) значения проводимости равны: $\sigma_1 = 103$; $\sigma_2 = 202$. Эти значения проводимости сети обеспечивают близость установившихся значений давления P_0 до и после сброса частоты вращения.

Диапазон изменения частоты вращения ГПА не дает возможности подбора параметров L и C модели при одном и том же усредненном значении проводимости сети σ . Предсказанные моделью значения давления P_0 в установившихся режимах до или после переходного процесса значительно расходятся с архивными данными. Это свидетельствует о необходимости уточнения структуры или даже топологии модели КЛ.

Общих рекомендаций по устранению неучтенных в модели существенных факторов нет. Необходимо проверять гипотезы, выдвигаемые на основе экспертных знаний. В рассматриваемом примере естественно предположить, что в выбранном для идентификации интервале времени меняется не только частота вращения и давление на входе нагнетателя. Допустим, что снижение оборотов нагнетателя сопровождается увеличением проводимости сети вследствие открытия кранов обвязки. Дополним модель связи КЛ со средой на входе M_{SF-1} воздействием – проводимостью сети $\sigma(t)$. Поскольку данные о степени открытия кранов и их влиянии на проводимость не используются, модель обобщенного воздействия также оказывается задачей идентификации.

Идентификация касается не только модели собственно объекта M_S , но также и расширенной модели M_R . Результат идентификации модели в равной мере зависит как от объекта, так и от тестовых воздействий, выбор и подготовка которых имеют решающее значение. При необходимом и достаточном объеме и представительности эмпирических данных компьютерная модель, использу-

емая для идентификации, должна включать и модель среды M_F – описание тестовых воздействий.

Этап параметрической идентификации предваряется заданием типа воздействия, т. е. модели структурного ранга $M_F 2$. Пренебрежем временем открытия кранов и примем, что проводимость сети $\sigma(t)$ меняется скачком от значения σ_1 до σ_2 . Программная реализация дополнительного воздействия сводится к введению в компьютерную модель блока, позволяющего скачком менять параметр σ (см. рис. 2). Тогда для получения полностью определенной модели M_{R3} остается оценить момент повышения проводимости. Расширение модели увеличивает число подстраиваемых параметров – дополнительно к L и C необходимо подобрать и время изменения проводимости сети.

Для рассматриваемого примера подобраны «оптимальные» параметры: $L = 0.4$; $C = 0.3$; скачкообразное изменение σ происходит на 3677-й секунде. Графики изменения давления P_0 , отвечающие архивным данным (непрерывная линия), и модели КЛ с подстроенными параметрами (прерывистая линия) показаны на рис. 5. Кривые свидетельствуют о близости реакции модели КЛ к данным эксперимента почти на всем протяжении переходного процесса, за исключением «всплеска» давления P_0 на интервале 3920...3970 с.

Таким образом, построена полностью определенная нелинейная модель КЛ по данным конкретного эксперимента.

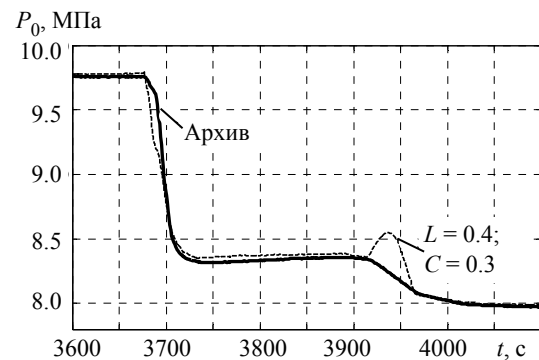


Рис. 5

Важно подчеркнуть, что для других режимов и тестовых воздействий подстройка даст несколько иные значения оцениваемых параметров. Более того, в общем случае могут потребоваться более радикальные меры – реструктуризация операторов и даже реконфигурирование топологии модели КЛ для учета факторов, влияющих на различные режимы компримирования газа.

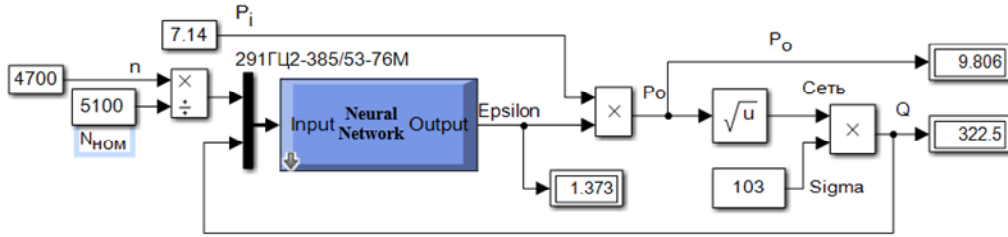


Рис. 6

Совмещенная диаграмма

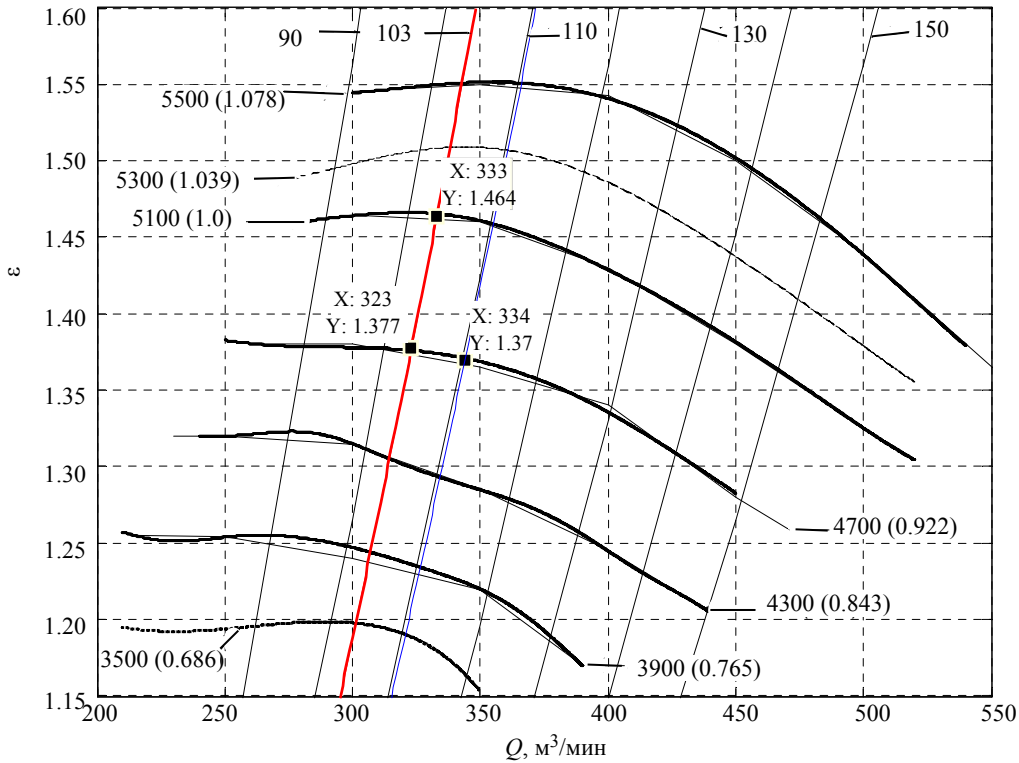


Рис. 7

Линеаризация и анализ модели КЛ. Линейные модели, которыми обычно удается описать процессы в малой окрестности выбранных режимов эксплуатации, позволяют привлечь мощные аналитические методы анализа устойчивости, управляемости и наблюдаемости состояния объекта, а также синтеза систем управления.

Особенность рассматриваемой модели КЛ заключается в том, что динамические свойства сосредоточены в линейной части (5), а нелинейные элементы (3), (4) безынерционны. Линеаризация модели КЛ сводится к замене нелинейных элементов коэффициентами усиления для малых отклонений от режима. Пусть выбран установившийся режим ГПА-1: $N = 4700$ об/мин (относительная частота вращения $n = N/N_{\text{ном}} = 4700/5100 = 0.922$); $P_i = 7.14$ МПа в интервале времени 3600...3650 с (см. рис. 3). Параметры режима находятся по модели равновесных режимов чис-

ленно (рис. 6) или графически (рис. 7) [8]: $n_0 = 0.922$; $P_c = P_o = 9.81$ МПа; $Q_0 = 322.5$ м³/м; $\epsilon_0 = 1.373$; $\sigma_0 = 103$.

Приближенные значения коэффициентов усиления линеаризованной модели нагнетателя найдем по ГДХ (см. рис. 6) как отношения приращений Δn , $\Delta \epsilon$, ΔQ от выбранного режима:

$$K_{\epsilon N} \cong \Delta \epsilon / \Delta n = (1.373 - 1.464) / (0.922 - 1.0) = 1.17;$$

$$K_{\epsilon Q} \cong \Delta \epsilon / \Delta Q = (1.373 - 1.370) / (322.5 - 344.0) = -1.4 \cdot 10^{-4}.$$

Удобно использовать относительные приращения – безразмерные переменные $\tilde{\epsilon} = \Delta \epsilon / \epsilon_0$, $\tilde{n} = \Delta n / n_0$, $\tilde{q} = \Delta Q / Q_0$. Тогда линеаризованная ГДХ нагнетателя примет вид

$$\tilde{\epsilon} = k_{\epsilon n} \tilde{n} + k_{\epsilon Q} \tilde{q},$$

где $k_{\varepsilon N} = K_{\varepsilon N} \frac{n_0}{\varepsilon_0} = 0.7857$; $k_{\varepsilon Q} = K_{\varepsilon Q} \frac{Q_0}{\varepsilon_0} = -0.0329$. Легко показать, что множитель $P_0 = \varepsilon P_i$ в результате линеаризации и перехода к относительным переменным описывается так:

$$\tilde{p}_0 = \tilde{p}_i + \tilde{\varepsilon}.$$

Коэффициенты усиления линеаризованной модели сети равны значениям частных производных (4) в рассматриваемой точке:

$$\begin{aligned} K_{QP_0} &= \partial Q_c / \partial P_c = \sigma_0 / \sqrt{P_{c0}} = \\ &= 103 / \sqrt{9.81} = 32.8854; \\ K_{Q\sigma} &= \partial Q_c / \partial \sigma = \sqrt{P_{c0}} = 3.1321. \end{aligned}$$

Для относительных приращений $\tilde{p}_c = \Delta P_c / P_{c0}$; $\tilde{\sigma} = \Delta \sigma / \sigma_0$ получим

$$\tilde{q}_c = \tilde{p}_c + \tilde{\sigma}.$$

По линеаризованной модели с двумя выходами δQ_c , δP_c и тремя входами δn , δP_i , $\delta \sigma$ можно получить матрицы системы уравнений КЛ в форме пространства состояний:

$$\begin{aligned} A1 &= \begin{bmatrix} -3.33 & 3.33 \\ -2.5 & -0.082 \end{bmatrix}; \quad B1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -3.33 \\ 1.95 & 2.50 & 0 \end{bmatrix}; \\ C1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad D1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Собственные значения (СЗ) матрицы состояний $A1$: $-1.7079 \pm 2.3857i$ свидетельствуют об устойчивости «в малом» рассматриваемого режима компримирования. Характер процессов слабо колебательный – модули мнимых и действительных частей комплексной пары СЗ близки (колебательность корней $\mu = 1.4$).

Анализ управляемости КЛ с помощью критерия Калмана сводится к проверке рангов матриц управляемости. Матрицы управляемости по входам: 1 (частота вращения δn), 2 (давление на входе P_i) и 3 (проводимость сети σ) имеют полный ранг – все состояния объекта по этим входам управляемы. По переменным выхода δP_c и δQ_c состояния объекта можно восстановить полностью, так как ранги матриц наблюдаемости по обоим выходам равны порядку объекта.

В статье представлены некоторые результаты моделирования компрессорной линии, рассматриваемой как объект управления. С точки зрения специалистов по автоматизации управления структурированные модели объектов и систем

представляют собой причинно-следственные связи между блоками направленного действия, выполняющими информационные и алгоритмические функции. Это отличает модели управляемых систем от структурированных описаний объектов, используемых в физико-технических расчетах, при конструировании агрегатов, оптимизации режимов компримирования и др.

Процедура построения модели динамики компрессорной линии иллюстрирует принцип последовательного раскрытия неопределенности о топологии, структурах операторов отображения переменных и параметрах управляемого объекта, а также его связей со средой функционирования. Приняты допущения о сосредоточенности параметров (конечномерности операторов) и игнорируются изменения температуры перекачиваемого газа. Не учитывается инерционность вращающихся масс силовой турбины привода и ротора нагнетателя. В результате упрощений математическая модель компрессорной линии принимает вид системы нелинейных дифференциальных уравнений, которая использована для компьютерной имитации процессов компримирования природного газа.

Параметры модели компрессорной линии, которые нельзя определить расчетным путем, оцениваются при помощи подстройки компьютерной модели с целью приближения к данным с реального объекта. Сравнение модельных процессов с архивными данными показывает, что описанная методология моделирования и идентификации применима для упрощенного анализа процессов компримирования. Линеаризованные модели, которые описывают процессы в малой окрестности выбранных режимов компримирования, позволяют привлечь строгие методы анализа устойчивости, управляемости и наблюдаемости объекта.

Практическую полезность предлагаемого подхода к моделированию и идентификации компрессорных линий можно будет оценить по результатам синтеза и реализации систем управления, выполненных по полученным моделям. Необходимо развитие методик синтеза систем управления, обеспечивающих селективную инвариантность режимов компримирования к возмущениям [15] применительно к технологическому процессу компримирования природного газа. Это связано с дополнительными исследованиями по «расширению» модели объекта – дополнению компрессорной линии моделями возмущений среды и исполнительных органов (газотурбинного привода со своей системой управления, антипомпажного клапана), а также подсистем измерения помпажного запаса центробежного нагнетателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация процессов газовой промышленности / М. А. Балавин, Я. А. Евдокимов, Ю. А. Кораблев, О. В. Назаров // под общ. ред. А. З. Шайхутдинова. СПб.: Наука, 2003.
2. МСКУ 5000 – Современная система управления газоперекачивающими агрегатами различных типов / С. Д. Альтшуль, Д. М. Гайдаш, С. В. Квашнин, А. Я. Макаров, А. В. Черников // Газотурбинные технологии. 2006, № 4. С. 18–22.
3. Комплексная система автоматического управления / С. Д. Альтшуль, С. В. Квашнин, М. Ф. Селезнев, А. В. Черников // Газотурбинные технологии. 2017. № 8. С. 26–27.
4. Проектирование систем управления территориально распределенными объектами / М. Ю. Шестопалов, Д. Х. Имаев, Ю. А. Кораблев, С. В. Квашнин // Инновации. 2018. № 10. С. 100–107.
5. Слободчиков К. Ю. Применение математических моделей газоперекачивающего агрегата в расчетных задачах системы управления режимом газопровода // Тр. V Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Ч. 2. Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами, математическое моделирование и краевые задачи / СамГТУ. Самара, 2008. С. 113–117.
6. Евдокимов Я. Регулирование ГПА: возникающие проблемы и пути их решения // Современные технологии автоматизации. 2009. № 2. С. 80–86.
7. Гузельбаев Я. З. Некоторые особенности динамических свойств центробежных компрессорных установок и сети // Компрессорная техника и пневматика. 2009. № 2. С. 8–11.
8. Крюков О. В. Аналитические модели транспорта газа // Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2017. № 1 (116). С. 161–172.
9. Имаев Д. Х., Квашнин С. В., Шестопалов М. Ю. Моделирование технологического процесса компримирования природного газа как объекта управления. Ч. 1. Равновесные режимы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 7. С. 44–48.
10. Имитационное моделирование производственных систем / под ред. А. А. Вавилова. М.: Машиностроение.
11. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981.
12. Боднер В. А. Автоколебания в системе, содержащей компрессор // Инженерный сборник. Т. VI. М.: Изд-во АН СССР, 1950. С. 177–184.
13. Казакевич В. В. О помпаже в компрессорах // Докл. АН СССР, 1957. Т. 115, № 4. С. 677–680.
14. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. Киев: Техника, 1975.
15. Имаев Д. Х., Квашнин С. В., Шестопалов М. Ю. Топологический синтез селективно инвариантных систем управления // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 7. С. 44–48.

D. H. Imaev, M. Yu. Shestopalov
Saint Petersburg Electrotechnical University

S. V. Kvashnin
Jsc «SPF „System-Service“»

MODELING OF CONTROLLED NATURAL GAS COMPRESSION PROCESSES. TRANSIENT MODES

A simplified model of compressor line dynamics is proposed, which implements a controlled technological process of natural gas compression. The compressor line is formed by a gas pumping unit and a network at its outlet. Modeling and identification procedures are presented as a sequential increase in information about the cause-and-effect topology, structures of signal conversion blocks, object parameters, and the object's relationship to the environment. The influence of inertia and elasticity of the gas volume on transient processes in the compressor line is studied. The procedure for parametric identification of a nonlinear computer model of a compressor line based on archived data from a real compressor station is illustrated. Linearized models are used to make judgments about the stability, controllability, and observability properties of a compressor line.

Natural gas, compression, control, transient mode, nonlinear dynamics, identification, computer simulation, linearization, stability, controllability, observability
