

В.Н. Писаренко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация авиационной техники» Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара (Россия)

Аннотация: Система управления транспортом газа представляет собой сложную человеко-машинную систему и включает в себя ресурсы транспорта газа, процесс транспорта газа и результат деятельности по транспорту газа. Для решения поставленной задачи оптимизации управления системой транспорта газа все множество систем, входящих в систему транспорта газа, классифицировано по признаку обрабатываемого компонента на три одноцелевых класса: энергетический (изменение характеристик природного газа: объема смеси газов, химического состава, давления, температуры), обрабатывающий (транспортировка масс смеси газов), информационный (получение, обработка, доставка информации о транспорте газа). Произведена декомпозиция системы транспорта газа на обрабатывающую, энергетическую и информационную системы. Составлена функциональная схема трехкомпонентной модели системы. В качестве базового компонента выделен комплекс технических средств переработки газа (изменение массы, энергии и информации). Для управления системой транспорта газа выделены комплексы информационных потоков и комплексы средств управления. Рассмотрено взаимодействие активных и пассивных систем, их влияние на деятельность управления транспортом газа и координация управления со стороны Газпрома. Определено место диспетчерского управления транспортом газа, деятельность которого должна стимулировать работу систем. Вся совокупность систем транспорта газа объединена функциональными обязанностями. Этап эксплуатации системы транспорта газа представлен математическим отображением процесса управления транспортом газа. Выполнено моделирование процесса транспорта газа. Разработана математическая модель оптимизированного управления системой транспорта газа. Глобальная задача управления транспортом газа решена оптимизацией структуры управления, включением в контур управления автоматизированных систем управления, активным участием в управлении всех элементов структуры и соблюдением установленных правил-ограничений. Рассмотрен вопрос устойчивости предложенной оптимизированной системы управления транспортом газа. Произведен анализ надежности предложенной структуры управления.

Ключевые слова: система транспорта газа, модель, синтез, состав, масса, энергия, информация, оптимизация, управление, надежность, эффективность.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Управление транспортом газа представляет собой сложную организационно-техническую систему, включающую средства транспорта газа, диспетчерский и технический персонал, а также транспортируемый продукт. Задачи транспортировки газа решаются за счет использования трубопроводного транспорта, повышения давления газа с помощью газоперекачивающих агрегатов и диспетчерского управления магистральными газопроводами. Такое управление транспортом газа является сложным, дорогостоящим и несовершенным. В связи с этим актуально совершенствование процесса управления транспортом газа и его оптимизация с целью обеспечения рентабельности. Для решения задачи анализа управления системой газоснабжения в целях исследования индикаторов качества управляемых технологических процессов наиболее эффективным средством является концептуальное и математическое моделирование сложных систем, входящих в состав системы, системный анализ в виде системного подхода с использованием теории сложных систем [1–4]. Для этого рассмотрим систему транспорта газа (СТГ) как сложную техническую систему транспорта газа (СТТГ) и выполним синтез модели управления системой транспорта газа. Модель системы должна охватывать, с одной стороны, все входящие в нее технические объекты, а с другой стороны, производственно-технологическую и организационно-экономическую системы.

Цель работы – выполнить синтез системы транспорта газа, разработать оптимизированную систему управления транспортом газа и исследовать надежность управления оптимизированной системой транспорта газа.

Методика проведения исследования. Выполним декомпозицию сложной системы транспорта газа. Все множество систем, входящих в СТГ, классифицируем по признаку обрабатываемого компонента (m , E , I) на три одноцелевых класса: $S(I)$ – информационный (получение, обработка, хранение, доставка информации о транспорте газа); $S(m)$ – обрабатывающий (транспортировка масс смеси газов); $S(E)$ – энергетический процесс изменения характеристик природного газа (E), отражающий

объем газа (Q), химический состав (X) и параметры состояния – давление (p) и температуру (T) [1; 3; 5].

$$E = f(Q, X, p, T). \quad (1)$$

В системе транспорта газа можно выделить двухкомпонентные системы: $S(m-E)$ – изменение физических свойств смеси газов под влиянием энергетических процессов транспорта газа, $S(m-I)$ – изменение физических свойств смеси газов под влиянием информационных процессов при транспорте газа, $S(E-I)$ – изменение энергетических процессов под влиянием информационных процессов при транспорте газа, но в самом общем случае рассмотрим трехкомпонентную систему изменения материи при транспорте газа: $S(m-E-I) = S(M)$, поскольку в процессе транспорта газа существуют только трехкомпонентная система, в которой происходит движение материи (M), т. е. одновременно обрабатываются масса, энергия и информация.

Произведем моделирование системы транспорта газа. Для системного подхода к решению проблемы управления транспортом газа представляется целесообразным исходить из самого общего случая трехкомпонентной системы $S(M)$ [3; 4]. Материя описывается массой, энергией, информацией $M(m, E, I)$, которые назовем компонентами системы. Функциональная схема трехкомпонентной системы показана на рисунке 1, где исходные начальные ресурсы (состав, количество и местоположение) представлены нулевыми векторами количественных характеристик материи $M(m_0, E_0, I_0)$, которые под влиянием процесса транспорта газа переходят в конечные результаты – тремя векторами требуемой продукции $M(m_{\text{пр}}, E_{\text{пр}}, I_{\text{пр}})$.

В данной системе S в качестве базового элемента выделен комплекс средств переработки материи $Fp(M)$, основной функцией которого является проведение соединительно-разъединительных операций над массой, энергией и информацией. В результате этого возникают новые требуемые сочетания компонентов. Комплексы технических средств обозначим символом T .

Для управления всей системой транспорта газа созданы комплексы средств управления (Z), которые на основе анализа информационных потоков I_1, I_2, \dots, I_n выдают управляющие воздействия U_1, U_2, \dots, U_n на соответствующие

щие комплексы технических средств. Для оптимального прогнозирования процессов развития, управления ими и оценки эффективности СТСТГ [5] выполним декомпозицию системы управления на три вида (рисунок 2):

- 1) целевую декомпозицию на системы $S(m)$, $S(E)$ и $S(I)$;
- 2) техническую декомпозицию на комплексы транспортировки ресурсов (K_{Z1}), комплексы перерабатывающих средств (K_p), комплексы доставки результатов (K_{T2}) и комплексы средств управления (K_Z);
- 3) организационную декомпозицию, которая на схеме не показана.

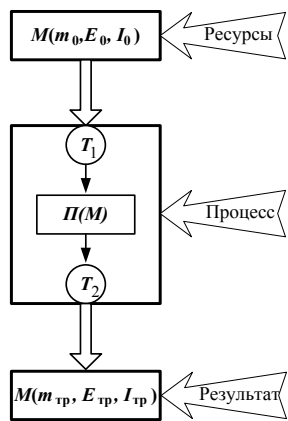


Рис. 1. Функциональная схема модели трехкомпонентной системы транспорта газа

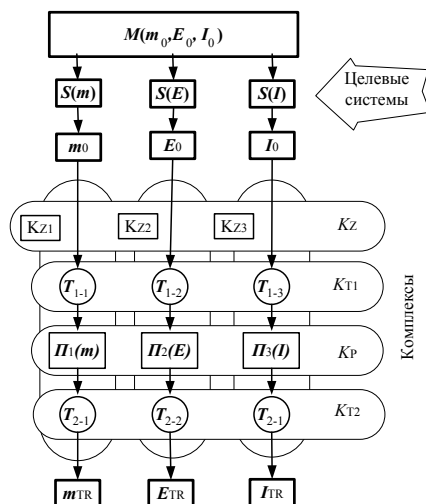


Рис. 2. Декомпозиция модели системы транспорта газа на комплексы и целевые системы

Состав СТСТГ условно можно описать формулой

$$S_{\text{СТСТГ}} = S_{\text{ТС}}(S_A, S_{\text{ПС}}, S_{\text{ТС}}), \quad (2)$$

где S_A – аналог технической системы; $S_{\text{ПС}}$ – производственные системы; $S_{\text{ТС}}$ – эксплуатируемые технические средства.

В этой сложной системе объединены пассивные и активные элементы системы [2; 5]. Взаимодействие активных систем $S_{\text{коорд}}$, $S_{\text{инф}}$, $S_{\text{прив}}$, $S_{\text{экспл}}$ и пассивных систем S_A , $S_{\text{ПС}}$, $S_{\text{ТС}}$, а также результатов их деятельности представлено на рисунке 3. Отметим, что активная система $S_{\text{инф}}$ работает с информацией, т. е. является системой класса $S(I)$, а $S_{\text{прив}}$ представляет класс $S(m)$. Система $S_{\text{экспл}}$ относится к классу $S(I)$. Управление активными системами – функция ООО «Газпром трансгаз по регионам». Увязку активных систем берет на себя система координации и управления верхнего уровня иерархии $S_{\text{коорд}}(I)$, представляющая собой ОАО «Газпром», которая наряду с решением задач стимулирования работы активных систем и формирования требований к процессам производства и эксплуатации осуществляет задание, контроль и коррекцию требований по функционированию $S_{\text{ТС}}$, выделяя

также на эксплуатацию текущие ресурсы $dm_{\text{ЕК}}(t)$, $dE_{\text{ЕК}}(t)$, $dI_{\text{ЕК}}(t)$, необходимые для поддержания заданных уровней надежности и эффективности системы транспорта газа.

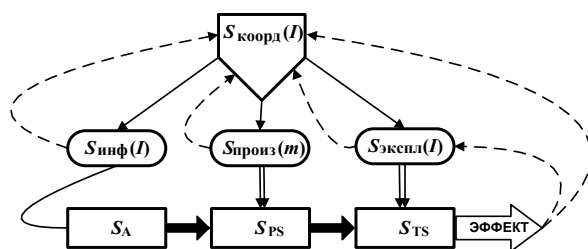


Рис. 3. Схема взаимодействия активных и пассивных систем СТГ

На рисунке 3 схематически показаны взаимосвязи различных активных систем (обозначены овалами) и результатов их функционирования, т. е. пассивных систем (обозначены прямоугольниками). Система-координатор обозначена объединенным прямоугольником с треугольником. Здесь 0-й иерархический уровень управления представляет координатор $S_{\text{коорд}}$ – Центрально-производственно-диспетчерский департамент ЦПДД ОАО «Газпром», 1-й уровень управления – активные системы $S_{\text{акт}}$ – Производственно-диспетчерские службы – Центральный диспетчерский пункт (ЦДП) ООО «Газпром трансгаз по регионам», 2-й уровень управления – пассивные системы $S_{\text{пасс}}$ – диспетчерские пункты компрессорных цехов линейных производственных управлений магистральных газопроводов (ЛПУМГ). Следует иметь в виду, что каждая из упрощенных изображенных здесь систем управления имеет сложную внутреннюю структуру, аналогичную представленным на рисунках 1 и 2, и, в соответствии с законом иерархичности, тоже может рассматриваться как сложная система. Различные линии со стрелками, показанные на рисунке 3, обозначают разный характер связей: 1) сплошные одинарные стрелки – координационно-управляющие воздействия от $S_{\text{коорд}}$ к $S_{\text{акт}}$; 2) пунктирные одинарные стрелки – обратные информационные связи от $S_{\text{пасс}}$ к $S_{\text{акт}}$, а затем от $S_{\text{акт}}$ к $S_{\text{коорд}}$; 3) заштрихованные стрелки (черные жирные) – жизненный цикл СТСТГ; 4) двойные без штриховки стрелки показывают «изготовителя» и его «объект» – продукт деятельности по транспорту газа.

Вся совокупность перечисленных систем представляет сложную человеко-машинную систему транспорта газа:

$$S_{\text{Ч-МС}} = S_{\text{акт}}, S_{\text{пасс}}, S_{\text{коорд}} = (S_A \cup S_{\text{ПС}} \cup S_{\text{ТС}}) + S_{\text{коорд}}. \quad (3)$$

Знак дизъюнкции \cup подчеркивает возможность пересечения функциональных обязанностей, т. е. активные и пассивные системы не суммируются, а объединяются.

Для формального описания сложной человеко-машинной системы (Ч-М С) управления системой транспорта газа воспользуемся трехуровневой схемой иерархического представления СТСТГ, применительно к которой возможно использование в качестве математического аппарата теории многоуровневых иерархических систем [3; 5]. Рассматривая эксплуатационный этап, назовем математической системой отношение над множествами [5]:

$$S \subseteq X \times Y, \quad (4)$$

где X – множество входных сигналов управления; Y – множество выходных результатов управления.

Это выражение соответствует функциональной системе (S – функция) как математическому отображению модели фрагмента управления системой транспорта газа.

Образ фрагмента управления СТГ, представленный в виде модели компрессорной станции трехниточного технического коридора магистрального газопровода, включающего одну компрессорную станцию и два примыкающих к ней линейных участка [1; 6], приведен на рисунке 4. В этом случае абстрактная синтезированная

система представляет математическое отображение процесса управления транспортом газа как операции преобразования элементов множества входных управляющих сигналов (X) в элементы множества выходных сигналов управления (Y).

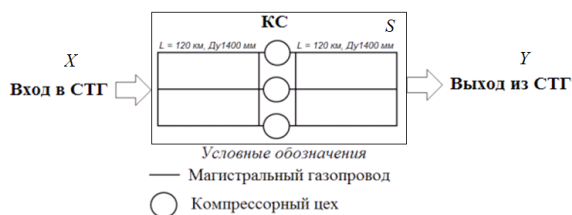


Рис. 4. Образ фрагмента управления системой транспорта газа

Введем модель процесса управления транспортом газа (Pr)

$$Pr: X \Rightarrow Y, \quad (5)$$

а также модель оценки эффективности процесса (V)

$$V: X \times Y \Rightarrow R, \quad (6)$$

где R – частично упорядоченное множество допустимых решений.

Это позволяет говорить об оптимизационной задаче управления, определяемой тройкой $\{Pr, V, X_f\}$. Здесь введена допустимая область возможных решений заданием допустимого подмножества внешних воздействий-входов ($X_f \subseteq X$).

Расширяя постановку задачи оптимального управления, введем множество неопределенностей (Ω), а также функцию допустимости ($\tau: \Omega \Rightarrow R$), которые позволят сформулировать задачу нахождения оптимальных решений управления транспортом газа, удовлетворяющих заданным требованиям, которая после расширения определяется уже пятеркой $\{Pr, V, X_f, \tau, \Omega\}$ и заключается в следующем. Дано подмножество $X_f \subseteq X$ и правила-ограничения R допустимых решений. Требуется найти такое оптимальное подмножество $x_{opt} \subseteq X$, чтобы $\forall \omega \in \Omega$ выполнялось условие:

$$V(x_{opt}, \omega) \leq \tau(\omega). \quad (7)$$

Правилами-ограничениями являются следующие отображения процесса Pr :

$$Pr: X \times \Omega \Rightarrow Y; V: X \times Y \times \Omega \Rightarrow R; \tau: \Omega \Rightarrow R. \quad (8)$$

Очевидно, что в такой постановке задача оптимизации управления является частным случаем задачи удовлетворения требований в поставке газа и состоит в отыскании $x_{opt} \in X_f$ удовлетворяющего условию [2; 6]:

$$V(x_{opt}) < V(x) \quad \forall x \in X_f. \quad (9)$$

Для решения поставленной задачи оптимизированного управления системой транспортом газа [2] с участием автоматизированной системы управления технологическими процессами транспорта газа [6] модель оптимизированного управления СТГ представим в виде многоканальной структуры управления СТГ, изображенной на рисунке 5.

Представленная структура является оптимизационной по стоимости, но для обеспечения желательной работы предполагает активное участие в управлении всех элементов структуры: диспетчера (Dp), сменного инженера (In) и системы автоматического управления СТГ. Только в этом случае соблюдаются требования ошибкоустойчивости. Кроме этого структура предполагает фундаментальные правила-ограничения из-за права структуры на вмешательство в автоматическое управление только одного диспетчера для ликвидации взаимно-исключающих действий и помехоустойчивости структуры. В частности, желательное выполнение требования ошибкоустойчивости и фундаментальные правила-ограничения могут быть несовместимыми. Также подходящие передаточные коэффициенты устройства управления обычно получают через реализацию про-

цесса ошибки и основаны в значительной степени на конструктивном техническом решении, обученности и интуиции диспетчера.

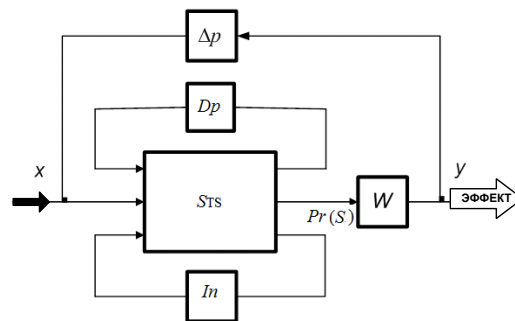


Рис. 5. Модель управления структурой системы транспорта газа,

где $S_{ТС}$ – структурированные технические системы СТГ; Dp – диспетчер; In – сменный инженер; W – устройство автоматического управления СТГ; Δp – блок обратной связи устойчивого автоматического управления СТГ; X – входное поле управляющих сигналов; Y – выходное поле сигналов

Выводы исследования и перспективы дальнейшего изыскания данного направления. Вся система, изображенная на рисунке 5, может быть представлена в математическом виде теорией множеств [4; 5; 7] и решает глобальную задачу управления транспортом газа (D), при этом у координатора имеется своя конкретная задача (D_0), а у управляющих систем нижнего уровня – свои индивидуальные задачи, составляющие множество [3; 6; 8; 9]:

$$D_i = D_{1-1} \cup D_{1-2} \cup \dots \cup D_{1-n}. \quad (10)$$

В нашей постановке задачи управления системой транспорта газа рассматриваемая задача управления относится к этапу эксплуатации системы, и под системой (S) будем понимать отграниченную от внешней среды совокупность взаимосвязанных элементов, при функционировании которой реализуется процесс (Pr), направленный на получение некоторого эффекта транспорта газа. Активными системами осуществляется процесс транспорта газа, а остальные этапы жизненного цикла не затрагиваются.

В связи с ограниченной возможностью статьи выполним только анализ надежности оптимизационного управления системой транспорта газа, представленной на рисунке 5 [8].

Вероятность отказа управления СТГ:

$$p(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (11)$$

где n – число контуров управления; $p_{i=1}(t)$ – вероятность отказа технических средств управления; $p_{i=2}(t)$ – вероятность ошибок в работе диспетчера; $p_{i=3}(t)$ – вероятность ошибок в работе сменного инженера.

Надежность работы $R(t)$ структуры управления СТГ выражается формулой

$$R(t) = 1 - [1 - R_{ТС}(t)] \times [1 - R_{In}(t)] \times [1 - R_{Dp}(t)], \quad (12)$$

где $R_{ТС}(t)$ – надежность технических средств управления; $R_{In}(t)$ – надежность работы сменного инженера; $R_{Dp}(t)$ – надежность работы диспетчера.

При экспоненциальном распределении надежности

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i(t)} \quad (13)$$

Надежность представленной оптимизированной системы управления транспортом газа является критической:

$$R(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda_{ТС}(t)}] \cdot [1 - e^{-\lambda_{Dp}(t)}] \cdot [1 - e^{-\lambda_{In}(t)}] = e^{-\lambda_{ТС}(t)} + e^{-\lambda_{Dp}(t)} + e^{-\lambda_{In}(t)} - e^{-(\lambda_{ТС} + \lambda_{Dp} + \lambda_{In})(t)} \quad (14)$$

Потеря работоспособности технических средств управления приводит к снижению надежности управления СТГ на 33 %, а неучастие в контуре управления сменно-

го инженера совместно с неисправностями системы автоматического управления снижает надежность на 67 % и увеличивает в десятки раз нагрузку на диспетчера для обеспечения устойчивой работы СТГ.

В результате моделирования процесса управления системой транспорта газа синтезирована оптимизированная модель управления системой, позволяющая выполнить исследование процесса устойчивого управления системой транспорта газа и разумного выбора директивы оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация процессов газовой промышленности / под общ. ред. А.З. Шайхутдинова. СПб.: Наука, 2003. 496 с.
2. Радкевич В.В. Системы управления объектами газовой промышленности. М.: Серебряная нить, 2004. 440 с.
3. Полтавец Г.А. Глобальная модель трехуровневой

сложной системы // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 3. С. 62–75.

4. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория многоуровневых иерархических систем. М.: Мир, 1973. 376 с.
5. Гейн К., Сарсон Т. Структурный системный анализ, средства и методы. М.: Эйтэкс, 1993. 237 с.
6. Панкратов В.С., Вербило А.С. Автоматизированная система диспетчерского управления ГТС. М.: ВНИИЭгазпром, 2002. 261 с.
7. Лэсдон Л.С. Оптимизация больших систем. М.: Наука, 1975. 431 с.
8. Писаренко В.Н., Коптев А.Н. Разработка методов и средств оценки состояния сложных автоматизированных систем управления // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. Т. 2. № 5. С. 222–228.
9. Писаренко В.Н. Выбор диагностического признака контроля состояния сложных технических систем // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4. С. 207–209.

SYNTHESIS OF MODEL OF GAS TRANSPORTATION SYSTEM MANAGEMENT

© 2015

V.N. Pisarenko, candidate of technical sciences, assistant professor of chair “Exploitation of aeromechanics”
S.P. Korolev Samara State Aerospace University (National Research University), Samara (Russia)

Abstract: The control system of transport of gas represents difficult human-machine system and includes gas transport resources, process of transport of gas and result of activities for gas transport. For the solution of an objective of optimization of management of system of transport of gas all set of the systems which are logging in transport of gas is classified by a sign of the processed component on three one-target classes: the power (change of characteristics of natural gas: volume of mix of gases, a chemical composition, pressure, temperature), processing (transportation of mass of mix of gases), information (receiving, processing, delivery of information on gas transport). Decomposition of system of transport of gas on the processing, power and information systems is made. The function chart of three-component model of system is made. As a basic component the complex of technical means of processing of gas (change of weight, energy and information) is allocated. For management of transport of gas of system complexes of information streams and complexes of control facilities are allocated. Interaction of active and passive systems, their influence on activity of management of transport of gas and coordination of management from Gazprom is considered. The place of dispatching management of gas transport which activity has to stimulate work of systems is defined. All set of systems of transport of gas is united by functional duties. The operational phase of system of transport of gas is presented by mathematical display of process of management of gas transport. Modeling of process of transport of gas is executed. The mathematical model of the optimized management of gas transport of system is developed. The global problem of management of transport of gas is solved by optimization of structure of management, inclusion in a contour of management of automated control systems, active participation in management of all elements of structure and observance of the established rules restrictions. The question of stability of the offered optimized control system of gas transport is considered. The analysis of reliability of the offered structure of management is made.

Keywords: system of gas transport, model, synthesis, composition, mass, energy, information, optimization, management, reliability, efficiency.