

- Анатолий Михайлович Барановский** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Санкт-Петербург; E-mail: bamvka@mail.ru
- Константин Андреевич Эсаулов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: home5263@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-вычислительных
систем и сетей

Поступила в редакцию
24.04.13 г.

УДК 621.311:681.5

О. И. Лисов, Чжо Зо Е, Пайе Тэйн Наинг

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается задача организации эффективного управления распределенными системами, в частности энергетическими комплексами, с учетом динамики процессов выработки, распределения, аккумуляции и потребления энергетических ресурсов. Представлено решение задачи, базирующееся на теории линейного программирования, методе аналитической идентификации и мультиграфовых моделях.

Ключевые слова: оптимизация, управление, газотранспортный комплекс, граф, линейное программирование, процессно-ролевые модели.

В последние годы при производстве, транспортировке и потреблении энергоносителей возникает множество проблем, связанных с достоверностью управления технологическими процессами. Уровень развития современной техники и разработанные математические методы теории оптимизации процессов управления обеспечивают возможность решения большинства задач, возникающих в различных ситуациях.

В настоящей статье рассматривается решение задачи оптимального управления газотранспортными комплексами на основе линейного программирования, метода аналитической идентификации и мультиграфовых моделей. Газотранспортные комплексы (ГТК) представляют собой сложные производственные системы, включающие подсистемы выработки, распределения, аккумуляции и потребления энергетических ресурсов, в том числе вторичных энергоресурсов металлургического производства (доменный газ, отработанный пар и пр.) [1].

В настоящее время в России в среднем около 14 % газотранспортных комплексов находятся в эксплуатации более 30 лет, 56 % — от 10 до 30 лет и только 30 % — до 10 лет. Такая ситуация приводит к необходимости выполнения масштабных и дорогостоящих диагностических и ремонтных работ. Необходимость обеспечения приемлемого уровня эффективности функционирования ГТК определяет идентификацию множества его технических состояний как одну из наиболее важных научных проблем [2].

Контроль технического состояния ГТК осуществляется в основном относительно отдельных повреждений, которые в соответствии с системой методов безопасной эксплуатации причисляются к критическим и потенциально опасным. Оценка эксплуатирующими организациями технического состояния ГТК по результатам внутритрубной диагностики позволяет

получить обширные разновременные сведения об имеющихся повреждениях, но их объективный анализ затруднен вследствие большой размерности задачи идентификации.

Использование теории линейного программирования и метода аналитической идентификации технического состояния ГТК по агрегированным моделям позволяет выявить подконтрольные участки и определить ежегодный объем диагностических и восстановительных работ. Однако этот метод не позволяет определить уровень управленческих воздействий в организационно-технологической системе управления, так как не конкретизирует число и параметры повреждений, требующих восстановления [2—4].

Схема, демонстрирующая этапы технологического процесса непараметрической идентификации состояний ГТК, представлена на рис. 1.

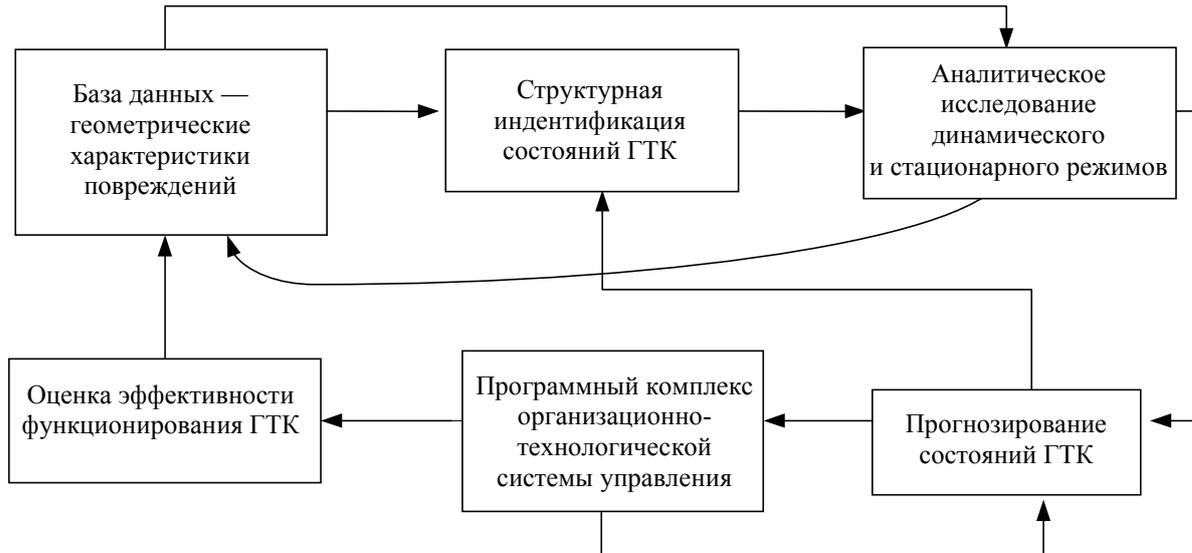


Рис. 1

Технологический процесс состоит из нескольких взаимосвязанных функциональных этапов. В начале процесса в целях определения конкретных условий текущего режима составляется база данных, содержащая геометрические характеристики повреждений оболочек. На этапе структурной идентификации состояний ГТК по значениям параметров повреждений формируются случайные функции по пространственной координате. Построение мультиграфовой модели (ММ) с конечным числом состояний осуществляется по параметру, значения которого образуют эргодическую стационарную случайную функцию. По каждому диагностическому срезу $r, r = 1, \dots, f$, формируется фрагмент (доля) ММ и определяются интервальные значения аналоговой переменной по выбранному параметру, которые отображаются на основные состояния $S_i, i = 0, \dots, n$, обеспечивая значительное снижение размерности задачи идентификации. Состояния, полученные для каждого фрагмента, дополняются композиционными $S_i, i = n + 1, \dots, m$, и соединяются между собой разнонаправленными ориентированными дугами, которые обозначаются как взаимные интенсивности повреждений $\lambda_{ij}, \mu_{ij}, i, j = 0, \dots, f$. Одноименные состояния разных фрагментов соединяются также дугами, которые обозначаются как переходные интенсивности повреждений $\lambda_{r(r+1)ii}, \mu_{(r=1)rii}, r = 0, \dots, f$. Композиционные состояния формируются теми же выделенными интервалами, обеспечивая возможность достижения конечного состояния. Алгоритмическим обеспечением этапа являются методики определения значений взаимных и переходных интенсивностей повреждений, основанные на установлении количества повреждений.

На следующем этапе проводится аналитическое исследование динамического и стационарного режимов с оценкой времени пребывания моделей ГТК в основных и композиционных

состояниях. Для этого этапа разработаны методы выявления доминирующих по значениям вероятностей состояний и структурного представления ММ путем преобразования систем дифференциальных уравнений к каноническому виду с коэффициентами усиления и постоянными времени, а также методы оценивания эффективности идентификации состояний и адекватности математических моделей. Математическое обеспечение комплекса содержит методики определения коэффициентов аналитических представлений ММ, позиционирования состояний по вероятностной шкале и определения количества повреждений, подлежащих восстановлению.

На этапе прогнозирования состояний ГТК по результатам их идентификации структурируется управленческая информация.

Графические представления одно- и двудольных ММ с разным количеством основных и композиционных состояний схематично представлены на рис. 2 и обозначены как $G_n^r(S_0^1, \dots, S_m^r)$, где G — мультиграфовая модель, r — номер последнего фрагмента-доли (у однодольных ММ не указан), n — число основных состояний, m — номер конечного состояния. Для упрощения графического представления ММ разнонаправленные дуги совмещены. Исходные состояния каждого фрагмента-доли с нулевым индексом обеспечивают „привязку“ модели к моментам диагностирования; конечные состояния характеризуют совокупность выделенных интервалов параметра аналоговой переменной.

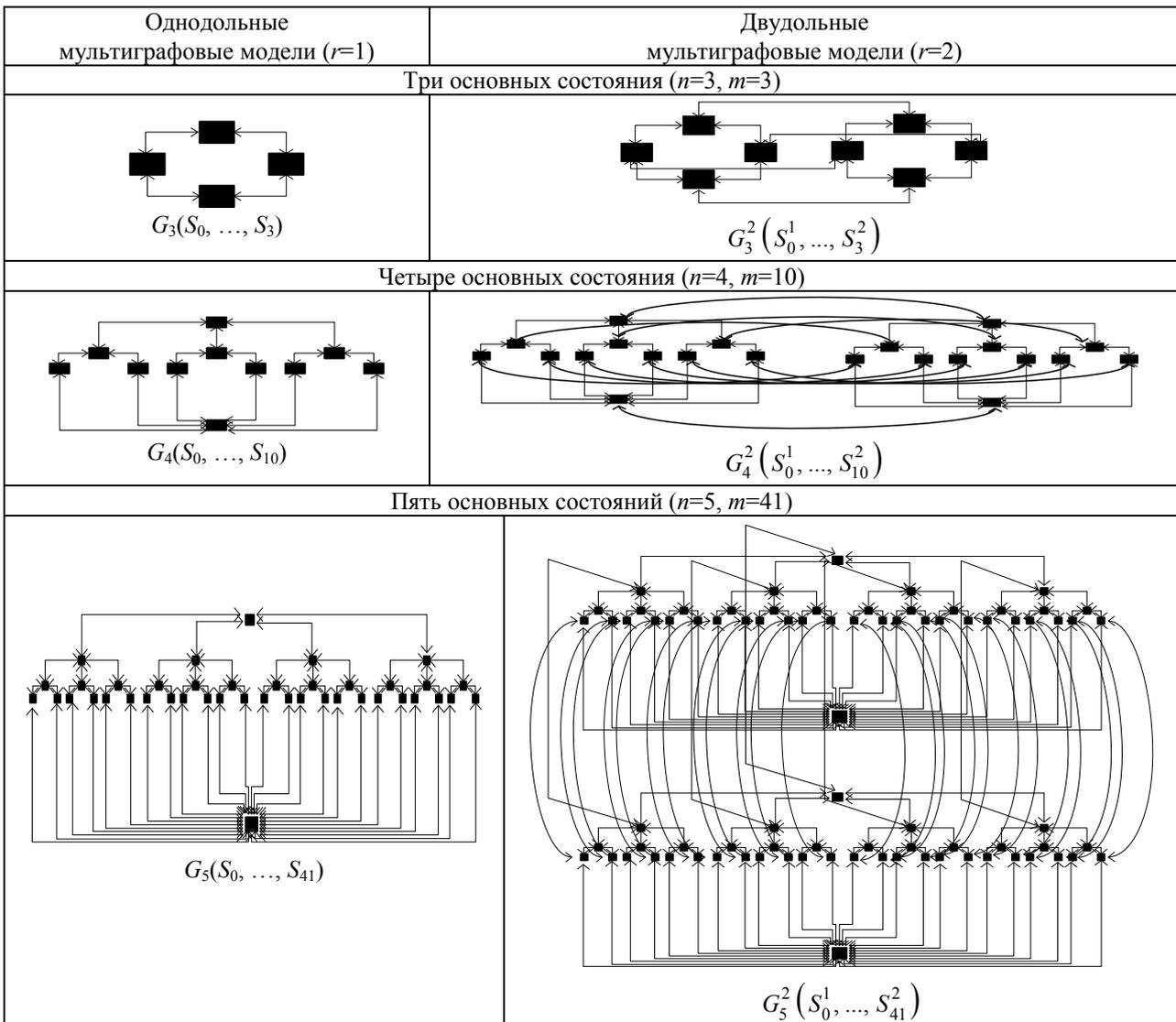


Рис. 2

В мультиграфовой модели составлены системы дифференциальных уравнений (СДУ) относительно вероятностей, характеризующих время пребывания моделей ГТК в выделенном множестве состояний. Приведем СДУ для ММ $G^2_4(S^1_0, \dots, S^2_{10})$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp^1_0(t)}{dt} &= p^1_1(t)\mu^1_{10} + p^1_2(t)\mu^1_{20} + p^1_3(t)\mu^1_{30} + p^2_0(t)\mu^1_{30} - p^1_0(t)(\lambda^1_{01} + \lambda^1_{02} + \lambda^1_{03} + \lambda^{12}_{00}); \\ \frac{dp^2_9(t)}{dt} &= p^2_3(t)\lambda^2_{39} + p^2_{10}(t)\mu^2_{109} - p^2_9(t)(\mu^2_{93} + \lambda^2_{910} + \mu^1_{99}) + p^1_9(t)\lambda^{12}_{99}; \\ \frac{dp^2_{10}(t)}{dt} &= p^2_4(t)\lambda^2_{410} + p^2_5(t)\lambda^2_{510} - p^2_6(t)\lambda^2_{610} + p^2_7(t)\lambda^2_{710} + p^2_8(t)\lambda^2_{810} + p^2_9(t)\lambda^2_{910} + \\ &+ p^2_{10}(t)(\mu^2_{104} + \mu^2_{105} + \mu^2_{106} + \mu^2_{107} + \mu^2_{108} + \mu^2_{109} + \mu^2_{110}) + p^1_{10}(t)\lambda^2_{1010}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\{p^1_0(t), \dots, p^2_{10}(t)\}$ — функции вероятностей состояний, здесь верхние индексы „1“ и „2“ соответствуют номерам этапов диагностирования, нижние индексы „0, ..., 10“ — номерам состояний.

Аналитические решения системы дифференциальных уравнений найдены разложением в степенной ряд со старшей степенью аргумента, зависящей от допустимой погрешности. Обобщенное аналитическое решение системы (1) до l -го порядка точности имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} p^1_0(t) &= p^1_0(0) + (p^1_1(0)\mu^1_{10} + p^1_2(0)\mu^1_{20} + p^1_3(0)\mu^1_{30} + p^2_0(0)\mu^{21}_{00} - \\ &- p^1_0(0)(\lambda^1_{01} + \lambda^1_{02} + \lambda^1_{03} + \lambda^{12}_{00}))t + h^1_{02}t^2 + h^1_{03}t^3 + h^1_{01}t^l; \\ p^1_1(t) &= p^1_1(0) + (p^1_0(0)\lambda^1_{01} + p^1_4(0)\mu^1_{41} + p^1_5(0)\mu^1_{51} + p^2_1(0)\mu^{21}_{11} - \\ &- p^1_1(0)(\mu^1_{10} + \mu^1_{14} + \mu^1_{15} + \mu^{12}_{11}))t + h^1_{12}t^2 + h^1_{13}t^3 + \dots + h^1_{1l}t^l; \\ p^2_{10}(t) &= p^2_{10}(0) + p^2_4(0)\lambda^2_{410} + p^2_5(0)\lambda^2_{510} + p^2_6(0)\lambda^2_{610} + p^2_7(0)\lambda^2_{710} + p^2_8(0)\lambda^2_{810} + \\ &+ p^2_9(0)\lambda^2_{910} + p^1_{10}(0)\lambda^{12}_{1010} - p^1_{10}(0)(\mu^2_{104} + \mu^2_{105} + \mu^2_{106} + \mu^2_{107} + \mu^2_{108} + \mu^2_{109} + \mu^{21}_{1010})t + \\ &+ h^2_{102}t^2 + h^2_{103}t^3 + h^2_{10l}t^l, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где h^1_{ij}, h^2_{ij} — коэффициенты полиномов, представляющие собой наиболее значимые алгебраические суммы, выраженные через интенсивности повреждений и начальные условия $\{p^1_0(0), \dots, p^2_{10}(0)\}$.

Совокупность разработанных мультиграфовых моделей с конечным числом состояний различают по представлениям: графическому — количество состояний, долей и дуг; аналитическому — тип решения и количество вероятностей; структурному — количество структурных звеньев, коэффициентов усиления и постоянных времени. Полученные аналитические представления ММ ГТК в стационарном режиме являются дробно-рациональными выражениями и могут быть использованы при идентификации, прогнозировании и выделении доминирующих состояний ГТК в целях оптимизации.

Для проведения имитационного моделирования, кроме значений интенсивностей повреждений и вероятностей состояний, необходима информация о статических коэффициентах усиления и динамических параметрах в виде постоянных времени. Для этого разработана модель, представляющая собой совокупность динамических звеньев, соединенных на выходе алгебраическими сумматорами. Полученные структурные представления позволяют проследить случайные переходы между состояниями и учесть влияние отдельных внешних воздействий.

Дальнейший анализ и оптимизация распределенных систем управления энергетическими потоками производятся на основе процессно-ролевых моделей. В этих моделях используются графы технологического процесса и системы управления. Особый интерес представляет совместное использование двух подходов к оптимизации системы управления технологическими процессами: на основе линейного программирования и процессно-ролевого представления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Портнов Е. М.* К вопросу создания интегрированных информационно-управляющих систем в энергетике // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2011. № 4. С. 77—80.
2. *Владова А. Ю., Владов Ю. Р.* Проектирование и разработка программной системы для идентификации коррозионных состояний продуктопроводов на основе графовых моделей // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2008. № 8. С. 50—55.
3. *Владова А. Ю., Владов Ю. Р.* Исследование вероятностей коррозионных состояний продуктопроводов моделированием на графах // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. № 5. С. 49—52.
4. *Владова А. Ю., Владов Ю. Р.* Структурная и параметрическая идентификация множества состояний оболочковых технических объектов на мультиграфах // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. № 5. С. 18—22.

Сведения об авторах

Олег Иванович Лисов

— д-р техн. наук, профессор; Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, кафедра информатики и программного обеспечения вычислительных систем, Москва; E-mail: olivlis@mail.ru

Чжо Зо Е

— канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, кафедра информатики и программного обеспечения вычислительных систем, Москва; E-mail: kyawzawye.47@gmail.com

Пайе Тэйн Наинг

— аспирант; Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, кафедра информатики и программного обеспечения вычислительных систем, Москва; E-mail: pyitheinnaing27@gmail.com

Рекомендована кафедрой информатики и программного обеспечения вычислительных систем

Поступила в редакцию
31.10.13 г.