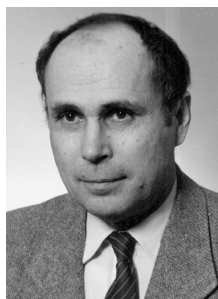


Проектирование систем управления территориально распределенными объектами



М. Ю. Шестопалов,
д. т. н., доцент,
зав. кафедрой,
кафедра автоматики
и процессов управления,
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
shestopalov_08@mail.ru



Д. Х. Имаев,
д. т. н., профессор,
кафедра автоматики
и процессов управления,
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
damir.imaev@mail.ru



Ю. А. Кораблев,
к. т. н., доцент,
кафедра автоматики
и процессов управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
juri.korablev@gmail.com



С. В. Квашнин,
зам. генерального
директора – технический
директор,
АО «НПФ «Система-Сервис»
ikvaser@mail.ru

Обсуждается проблема создания систем управления территориально распределенными объектами по условиям инвариантности к воздействиям среды. Предлагается итерационная процедура синтеза и проектирования систем по динамическим моделям с раскрытой причинно-следственной топологией и геометрическим моделям, отражающим пространственное размещение компонентов и источников возмущений.

Ключевые слова: система, управление, модели, структура, граф, инвариантность, синтез, топология, геометрическое моделирование.

Проблема проектирования систем управления территориально распределенными объектами по условиям инвариантности к воздействиям среды

Современные системы управления (СУ) сложными технологическими процессами образованы множеством взаимодействующих подсистем управления различных уровней иерархии, обеспечивающих компромиссные решения по достижению как собственных, так и общесистемных целей. В качестве примера можно привести многоуровневые СУ газотранспортными предприятиями, обеспечивающими транзит и поставку газа потребителям. Компрессорные станции и магистральные газопроводы вместе с газораспределительными станциями формируют распределенную в пространстве структуру. Особенностью таких систем является рассредоточенность оборудования, компонентов и линий связи на весьма обширных территориях.

Известные методы структурного и параметрического синтеза систем управления по причинно-следственным (информационно-алгоритмическим) моделям классической и современной теории управления полагают, что заданы точки приложения, спектры и интенсивности возмущений, к которым должна быть обеспечена инвариантность управляемых переменных [1]. Синтез СУ предваряется не только моделированием и идентификацией объекта, но также сигналов среды функционирования, непосредственно приложенных к системе.

Пространственная распределенность обуславливает зависимость среды функционирования систем от размещения элементов и способов их соединения, что затрудняет адекватное моделирование возмущений. При расчете систем децентрализованного управления, компоненты которых территориально распределены, достаточной определенности модели среды нет. Могут быть заданы более или менее локализованные в пространстве координаты источников нежелательных физических воздействий механической, тепловой или/и электромагнитной природы.

Модель среды расширяется — она включает причины воздействий и характеристики каналов передачи воздействий до компонентов системы. Свойства каналов зависят от характера излучений и среды распространения, расстояния между источниками и компонентами оборудования, а также от чувствительности «приемников». Модели возмущений и их точки приложения зависят от размещения компонентов систем управления в пространстве и трассировки каналов передачи данных, т. е. от «геометрической модели», или, результата «физического» проектирования.

Поскольку заранее не известна геометрическая модель ССУ — пространственная топология ССУ — то невозможно построение адекватных моделей возмущений. С другой стороны, только синтез ССУ по причинно-следственным моделям

дает информационно-алгоритмическую топологию — множество элементов и связи между ними, что определяет пространственную конфигурацию системы.

Итерационная процедура синтеза и проектирования СУ, интегрирующая расчеты по причинно-следственным и геометрическим моделям

Замкнутый круг неопределенностей разрывается, как обычно, методом «проб и ошибок» — проектирование СУ представляет собой итерационный процесс, интегрирующий процедуры динамического синтеза и геометрического проектирования. Пусть исходная причинно-следственная модель СУ $M^{(0)}_{RS}$ задает априорную информацию о вероятных точках приложения, спектрах и интенсивности возмущений $F^{(0)}$.

Дальнейшие шаги укрупненно можно описать следующим образом.

1. Синтез из условия обеспечения инвариантности к возмущениям определяет причинно-следственную топологию ССУ — пути компенсации возмущений и/или контуры, ослабляющие их последствия до приемлемых уровней.
2. Решаются задачи размещения и трассировки, в результате которых получится геометрическая модель $G^{(0)}$.
3. Модель $G^{(0)}$ позволяет уточнить модель возмущений $F^{(1)}$, т. е. корректируются точки приложения и характеристики сигналов возмущений.
4. Синтезируется ССУ $M^{(1)}_{RS}$.
5. Если топология не изменилась, то задача решена. Иначе — корректируются схемы размещения и трассировки, в результате чего появится геометрическая модель $G^{(1)}$.
6. Уточняется модель возмущений $F^{(2)}$ и на 1° .

Если итерационный процесс сходится, то результатом синтеза и проектирования являются модели обоих видов — причинно-следственные (информационно-алгоритмические) и геометрические — принципиальные схемы размещения компонентов и трассировки связей.

Развитие инновационной процедуры синтеза и проектирования ССУ ставит перед исследователями целый ряд непростых задач разработки:

- специализированных «языков» описания геометрических моделей рассредоточенных в пространстве систем управления;
- методов размещения компонентов и трассировки связей, т. е. построения геометрических моделей по причинно-следственным моделям;
- методов моделирования воздействий среды на ССУ по геометрическим моделям, т. е. построения причинно-следственных моделей по геометрическим.

В рамках теории систем и теории управления хорошо развиты языки моделирования систем со сложной причинно-следственной структурой, основанные на теории графов и гиперграфов (см., например, [2, 3]). Большое число публикаций по теории и методам автоматизации проектирования (см., например, [4-9]) посвящено геометрическим моделям.

Реализация итерационной процедуры синтеза и проектирования ССУ ставит целый ряд задач по созданию специализированных инструментальных средств для автоматизации построения принципиально разных моделей и переходов между ними.

Причинно-следственные модели СУ

Причинно-следственные модели СУ должны быть в необходимой степени структурированными, отражающими принципы управления и реализующие их механизмы получения, передачи и преобразования данных (сигналов — носителей информации) с целью ослабления нежелательных воздействий среды.

Построение математических моделей ССУ представляется как последовательное раскрытие неопределенности моделей: собственно системы M_S , системы со связями со средой $M_{YSF} = \langle M_{YS}, M_S, M_{SF} \rangle$ и расширенной системы $M_{RS} = \langle M_Y, M_{YSF}, M_F \rangle$ [2, 3]. Линейные модели M_S описывают свободные движения системы, т. е. объясняют устойчивость движений и процессы при ненулевых начальных условиях. Модели M_{YSF} описывают каналы передач от входов к выходам системы, т. е. свойства инвариантности к любым возмущениям, а расширенные модели M_{RS} привлекаются для изучения вынужденных движений, в частности, независимости (слабой зависимости) установившихся движений к конкретным типам возмущений (селективной инвариантности). Модели ССУ дополняются формализованным описанием влияния среды функционирования как источника возмущений, влияние которых должно ослабляться путем компенсации или действия обратных связей.

Переход от M_S к модели M_{YSF} означает добавление информации о связях системы со средой на выходе M_{YS} и входе M_{SF} . Переход от модели M_{YSF} к расширенной системе $M_{RS} = \langle M_Y, M_{YSF}, M_F \rangle$ означает добавление модели среды M_F и «модели» проектировщика, M_Y — формализации цели системы и требований к качеству процессов.

В соответствии с принципом последовательного раскрытия неопределенности рассматриваются причинно-следственные модели различных рангов неопределенности $M(R)$, $R=0, 1, 2, 3$. Базовое множество элементов представляет собой модель нулевого ранга $M(0)$. Если на множестве функциональных элементов вводится бинарное отношение, то получится модель $M(1)$. Дополнение данных структурами операторов дает модель $M(2)$. Наконец, в результате уточнения параметров получают полностью определенные модели третьего, параметрического ранга $M(3)$.

Для большинства структурированных моделей систем управления топология инвариантна к операторам, приписываемым отношениям, что позволяет сделать методически и практически важный вывод о том, что результаты анализа и формирования топологии систем управления имеют первостепенное значение и не зависят от значений параметров, типа и даже класса и структуры операторов.

Под структурой понимается множество компонентов направленного действия и их причинно-следственные отношения. Графы — универсальный

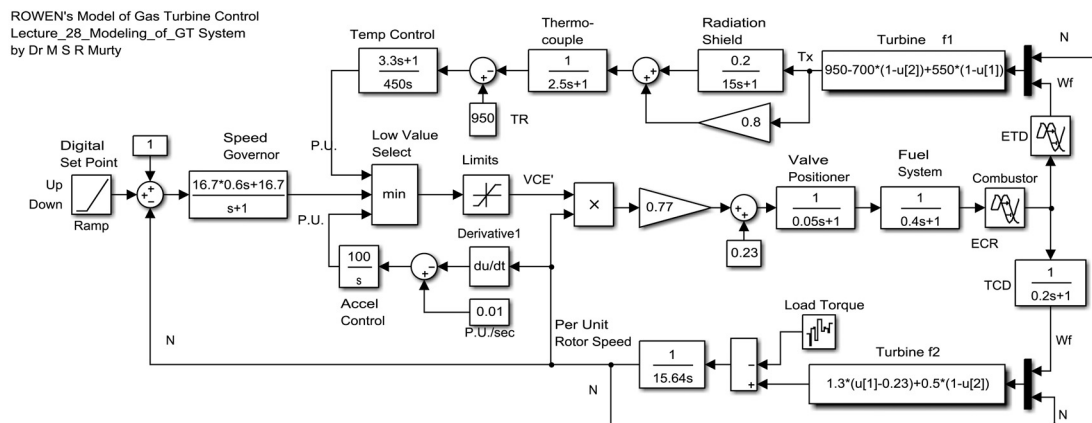


Рис. 1. Структурная схема СУ газовой турбины (W. Rowen [10], приводится из [11])

язык описания структур. С точки зрения математики граф — это множество элементов и отношение на этом множестве. Несимметричное бинарное отношение дает ориентированный граф. Ориентированность графов отражает принципиальную особенность моделей систем управления — причинно-следственный характер взаимодействия подсистем. Именно ориентированность элементов и их взаимосвязей отличает модели систем управления от структурных моделей физических систем вообще. Имея в виду структуру связей элементов, говорят о топологии причинно-следственных (информационно-алгоритмических) отношений.

В зависимости от содержания элементов базового множества и отношения на этом множестве модели с раскрытой причинно-следственной топологией могут быть представлены в форме структурных схем, сигнальных графов и др.

Структурная схема (С-граф) на языке теории бинарных отношений определяется как пара

$$C = \langle W, X \rangle,$$

где W — множество звеньев, X — несимметричное бинарное отношение, т. е. множество упорядоченных пар номеров звеньев, элементам которого отвечают сигналы. Вершинам линейного С-графа соответствуют операторы преобразования сумм переменных заходящих дуг.

При небольшом числе элементов и связей наглядны геометрические образы — диаграммы графов (структурные схемы). Важнейшие понятия теории орграфов — путь, контур, отношения их касания — отражают информационно-алгоритмический подход, принимаемый при моделировании систем управления. Путь в ориентированном графе — чередующаяся последовательность вершин и дуг, в которой все вершины различны; контур — замкнутый путь. На диаграммах С-графов вершинам в виде прямоугольников отвечают элементы, а дугам (линиям со стрелками) — причинно-следственные связи. На рис. 1 изображен пример модели системы управления газовой турбиной на языке графического редактора программы Simulink.

Если элементы базового множества интерпретируются как сигналы, а элементы несимметричного отношения — как преобразователи сигналов, то это граф сигнальный. Сигнальный граф $G = \langle X, W \rangle$ определяется как несимметричное бинарное отношение $W = \{(x_i, x_j)\}$ на множестве переменных $X = \{x_1, \dots, x_N\}$. На диаграммах сигнальных графов переменным X отмечают вершины графа, в которых суммируются сигналы заходящих дуг, а элементам отношения W — дуги, которым ставятся в соответствие линейные операторы преобразования переменных.

Хотя структурная схема (С-граф) и сигнальный граф являются дуальными формами представления

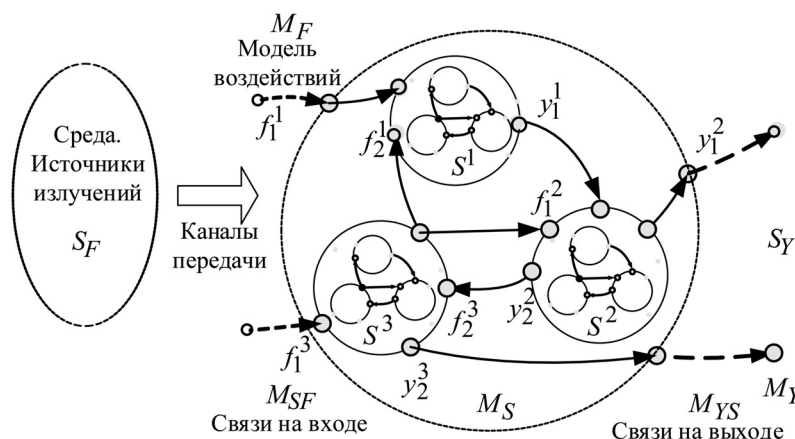


Рис. 2. Пример диаграммы гиперграфа ССУ

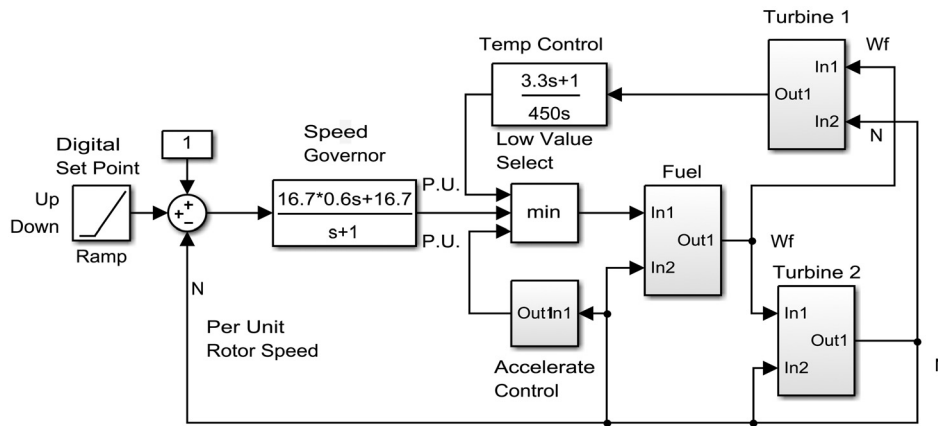


Рис. 3. Блок-граф системы управления газовой турбиной

моделей, в теоретических исследованиях более предпочтительными оказываются сигнальные графы.

При моделировании сложных объектов управления их расчленяют на взаимосвязанные подсистемы с учетом планируемой глубины раскрытия структуры. При необходимости подсистемы, в свою очередь, подвергают декомпозиции, что приводит к моделям иерархической структуры. Структура иерархических ССУ отражает подчиненность функций подсистем и децентрализацию управления.

Описание структур ССУ на теоретико-множественном языке дает гиперграфы — многоместные отношения на множествах подсистем с несколькими входами и выходами. Иллюстративная диаграмма гиперграфа, образованного на множестве из трех вершин, изображена на рис. 2. Перечисление множества подсистем и их переменных выхода и входа задает модель нулевого ранга L -го уровня иерархии $M^L_S(0)$. Топология ССУ $M^L_S(1)$ задается путем перечисления пар переменных (выход–вход). Дальнейшее раскрытие модели зависит от глубины структуризации подсистем. На рис. 2 условно показано, что воздействия на систему являются результатом опосредованного влияния источников излучений среды на компоненты и линии связи.

На рис. 3 модель СУ газовой турбиной (см. рис. 1) приведена в форме диаграммы гиперграфа (блок-графа).

Синтез топологии СУ по условиям инвариантности

Независимость или слабая зависимость переменных системы к сигналу возмущения в терминах классической теории управления представляется как обеспечение инвариантности. Различные формы инвариантности являются первичными требованиями к системам. Теория инвариантности систем управления развивалась в трудах Г. В. Щипанова, Н. Н. Лузина, В. С. Кулебакина, Б. Н. Петрова, А. И. Кухтенко, А. А. Вавилова и др. (см., например, [1, 12, 13]). Некоторые результаты анализа взаимосвязи условий инвариантности и структуры систем управления приведены в [13, 14].

Связь условий инвариантности с топологией устанавливается по модели СУ в форме сигнального графа. Модель системы M_S дополняется перечислением вершин входа сигналов среды $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{X}, f_r; r = 1, \dots, R$, а также множества $\mathcal{Q} \subseteq \mathcal{X}$ вершин q , на которые не должны влиять возмущения.

Если в сигнальном графе существует единственный путь из вершины r в вершину q , то топологическая формула Мэйсона для передаточной функции (ПФ) графа примет вид:

$$\Phi_{qr}(s) = \frac{P_{qr}(s)\Delta_{qr}(s)}{\Delta(s)}, \quad (1)$$

где

$$\Delta(s) = 1 - \sum_k K_k(s) + \sum_{k,l} K_k(s)K_l(s) - \dots -$$

определитель графа; $K_k(s)$ — ПФ k -го контура; $P^p_{qr}(s)$ — ПФ p -го пути из r в q ; $\Delta^p_{qr}(s)$ — минор p -го пути, равный определителю подграфа, полученного удалением p -го пути.

Достаточным топологическим условием абсолютной инвариантности переменной $y_q; q=1, \dots, Q$, к любому возмущению f_r с изображением $F_r(s)$ является отсутствие путей в графе из вершин r в вершину q

$$\forall p: P^p_{qr}(s) \equiv 0 \Rightarrow \Phi_{qr}(s) \equiv 0.$$

Проверка условия основана на анализе путей в орграфе по модели топологического ранга M_{YSF} (1) и не зависит от класса операторов дуг графа, т. е. распространяется на нелинейные, нестационарные и вероятностные модели, как с сосредоточенными, так и распределенными параметрами. Переменная абсолютно инвариантна к сигналам, о которых отсутствует всякая информация (даже статистического характера).

Необходимое и достаточное условие инвариантности переменной $y_q; q=1, \dots, Q$ к сигналу неисправности f_r запишется так:

$$\exists r \in \mathcal{R}; \exists q \in \mathcal{Q}; \forall s: \Phi_{qr}(s) = 0.$$

Практически требуется выполнение условия

$$\exists r \in \mathcal{R}; \exists q \in \mathcal{Q}; \forall \omega \in \Omega: \text{mod } \Phi_{qr}(j\omega) < \varepsilon,$$

где Ω — множество существенных частот; ε — «порог», определяемый количественными требованиями к инвариантности.

Преобразуем формулу (1); вместо составляющих в виде рациональных функций комплексного аргумента подставим отношения соответствующих полиномов числителей и знаменателей. Введем следующие обозначения для ПФ пути и его минора (аргумент s опущен):

$$P_{qr} = \frac{B_{qr}}{A_{qr}} = \frac{B_{qr}}{A^{(1)}}; \Delta_{qr} = \frac{A_{qr}^{\Delta}}{A_{qr}^{\Delta 0}} = \frac{A_{qr}^{\Delta}}{A_{qr}^{(3)}},$$

где A_{qr}^{Δ} — характеристический полином (ХП) подграфа, образованного дугами в позиции 3, т. е. принадлежащими контурам, не касающимся пути. В сильном графе полиномы A_{qr} и $A_{qr}^{\Delta 0}$ являются делителями полинома $A^0(s)$, так как представляют произведения полиномов знаменателей ПФ дуг пути от вершины r до вершины q , т. е. находящихся в поз. 1 по отношению к пути, и дуг в поз. 3. После сокращения формула для передачи сигнального графа (1) запишется в следующем виде

$$\Phi_{qr}(s) = \frac{B_{qr}(s)}{A(s)} = \frac{B_{qr}^{(1)}(s)A_{qr}^{(3)}(s)A_{qr}^{(2)}(s)}{A(s)}. \quad (2)$$

Полином $A^{(2)}$ равен произведению знаменателей ПФ дуг, находящихся в поз. 2, т. е. входящих в контуры, касающиеся пути, но в него не входящие, $A_{qr}^{(3)}$ — ХП подграфа на дугах в поз. 3; $B_{qr}^{(1)}$ — произведение полиномов числителей ПФ дуг в поз. 1.

Связь условия инвариантности с топологией ССУ следует из (2). Должны тождественно равняться нулю: 1 — числители ПФ дуг в поз. 1 к пути; 2 — знаменатели ПФ дуг в поз. 2 к пути; 3 — ХП подграфа, образованного дугами в поз. 3 к пути.

Форма инвариантности, когда обеспечивается независимость установившейся реакции системы на конкретные типы воздействий, называется селективной инвариантностью. Условие селективной абсолютной инвариантности записывается как равенство нулю ПФ системы на полюсах s_k изображения возмущения

$$\forall s_k: |\Phi_{qr}(s_k)| = 0. \quad (3)$$

Условие (3) формулируется в виде требований к нулям ПФ системы, а его обеспечение предполагает идентификацию спектра сигнала. Под спектром $f_r(t)$ подразумеваются полюсы его изображения

$$Fr(s) = (B_r(s))/(A_r(s))$$

т. е. множество $\{s_k: A_r(s_k) = 0; k = 1, 2, \dots\}$.

Дополнение модели M_{YSF} информацией о среде дает расширенную модель системы M_{RS} , позволяющую конкретизировать условия инвариантности:

$$\exists r \in R; \exists q \in Q: \forall k: \Phi_{qr}(s_k) = (B_{qr}(s_k))/(A(s_k)) = 0.$$

Если $A(s_k) \neq 0$, т. е. отсутствует так называемый обобщенный резонанс, то условие инвариантности запишется так:

$$\forall k: B_{qr}(s_k) = 0. \quad (4)$$

Для селективной инвариантности переменной к сигналу с известным спектром ПФ системы должна иметь нули, равные полюсам изображения сигнала. Условие селективной инвариантности (4) формулируется в виде требований к нулям ПФ системы, а его обеспечение предполагает идентификацию спектра сигнала неисправности.

Действительно, переходная $y_{q \text{ пер}}(t)$ и установившаяся $y_{q \text{ уст}}(t)$ составляющие реакции $y_q(t)$ на воздействие $f_r(t)$ выражаются так [1]:

$$y_{qr}(t) = L^{-1}\{\Phi_{qr}(s)F_r(s)\} = \sum_{i=1}^n \frac{B(s_i)}{A'(s_i)} F_r(s_i) \exp(s_i t) + \sum_{k=1}^{n_F} \Phi_{qr}(s_k) \frac{B_F(s_k)}{A'_F(s_k)} \exp(s_k t),$$

где n — порядок системы; $n_F = \deg A_F$; знак «'» означает дифференцирование полинома по аргументу. Принято, что полюсы ПФ простые (некратные) и выполняется условие $\forall i, k: s_i \neq s_k$. Переходная составляющая вынужденного движения $y_{\text{пер}}(t)$ вызвана ненулевыми начальными условиями, вызванными внезапно приложенным возмущением.

Установившаяся реакция системы $y_{q \text{ уст}}(t)$, обусловленная полюсами изображения воздействия s_k , равна нулю при условиях: 1 — ПФ дуг графа в поз. 1 к единственному пути имеют нуль, равный спектру сигнала; 2 — ПФ дуг в поз. 2 имеют полюс, равный спектру сигнала; 3 — ХП подграфа, образованного дугами в поз. 3 к пути, имеет корни, совпадающие со спектром сигнала.

Селективная инвариантность к возмущению может быть обеспечена при следующих условиях.

1. В графе системы существует дуга (a, b) , входящая в путь передачи воздействия (поз. 1), нули ПФ которой $W_{ab}(s)$ могут выбираться равными полюсам изображения сигнальной неисправности.
2. В граф можно ввести дугу в поз. 2, полюсы ПФ которой могут выбираться. Такое реконfigurирование системы увеличивает модуль определителя графа, т. е. знаменатель ПФ системы (2), что уменьшает усиления канала передачи сигнала. Хорошо известен прием с введением в контур СУ интегратора (ПФ которого имеет нулевой полюс), что обеспечивает астатизм — нулевую установившуюся ошибку при постоянных возмущениях (изображения которых имеют нулевой полюс). Реже встречаются примеры введения в контуры консервативных звеньев (ПФ которых содержит мнимые полюсы), что обеспечивает нулевую установившуюся ошибку СУ при гармонических возмущениях (изображения которых имеют мнимые полюсы). Такой способ обеспечения селективной инвариантности формулируется как принцип внутренней модели Уонэма: «в каждой хорошей системе управления должна быть модель внешнего мира». Эффект абсолютной селективной инвариантности объясняется тем, что «внутренние компенсаторы» обеспечивают бесконечное усиление контуров, касающихся путей передачи воздействий, на частотах воздействий. Это сводит к нулю передачу пути на частоте воздействия. Си-

стемы с «внутренними компенсаторами» возмущений — моделями воздействий среды — обладают и свойством робастности к амплитудам сигналов и изменениям некоторых параметров системы [15].

3. Корни ХП подграфа в поз. 3 к пути могут выбираться. Это позволяет уменьшать минор пути, т. е. числитель ПФ системы. Однако этот способ обеспечения инвариантности менее эффективен и может привести к катастрофической негрубости системы при отсутствии информации о спектре сигналов [13].

Пример СУ территориально распределенным объектом

Основными функциями системы управления газотранспортным предприятием (СУ ГТП) являются оптимизация режимов работы магистрального газопровода (ГП), корректировка технологических схем компрессорных станций (КС), формирование программ управления и уставок для контроллеров системы нижележащего уровня — СУ КС. В свою очередь, СУ КС контролирует режимы работы станции и линейной части МГ, формирует управляющие воздействия на СУ компрессорными цехами (КЦ). Системы более низкого уровня — СУ КЦ поддерживают процесс перекачки газа для определенной нитки газопровода, в том числе: стабилизируют давление или расход газа на выходе КЦ; распределяют нагрузку между газоперекачивающими агрегатами; формирует команды на запуск или останов агрегатов при недостаточной или избыточной производительности и др.

Таким образом, СУ ГТП представляет собой иерархическую многоуровневую систему (рис. 4).

Газоперекачивающий агрегат (ГПА) — основная единица, выполняющая функции компримирования (сжатия) газа — образуется взаимосвязью множества узлов: газотурбинный или электрический привод нагнетатель (компрессором), система маслообеспечения и система обеспечения буферным газом и барьерным воздухом; система электроснабжения, подачи топливного и пускового газа, входной и выхлопной тракт, воз-

духоочистительное и антиобледенительное устройства и др. СУ ГПА выполняет функции: регулирования частоты вращения роторов, включая автоматическое поддержание частоты вращения ротора компрессора; противоположного регулирования компрессора; предельного регулирования температуры продуктов сгорания, частоты вращения нерегулируемого вала и давления воздуха за воздушным компрессором турбины с целью ограничения мощности газотурбинного привода при регулировании частоты вращения.

Ставится задача построения динамической причинно-следственной моделей подсистем управления и СУ ГТП в целом, моделей воздействий среды их функционирования, формализации целей управления, а также требований к качеству процессов их достижения. В результате синтеза по условиям инвариантности к нежелательным воздействиям среды должна быть сформирована топология причинно-следственной модели подсистем управления ГПА, КЦ, КС и ГТП в целом.

Одновременно проектируется пространственная топология перечисленных систем по геометрическим моделям в зависимости от выбранных средств автоматики и вычислительной техники, условий их размещения и трассировки соединений.

В настоящее время парк систем автоматизации контроля и управления процессом компримирования газа на объектах добычи и транспорта представлен большей частью современными системами, построенными на импортной элементной базе. В их основе лежит однотипная структура, в которой выделен центральный программируемый логический контроллер или система разбита на ряд подзадач, реализацией каждой из которых занимается свой контроллер (рис. 5).

Ввод-вывод параметров осуществляется через подключенные к контроллеру устройства связи с объектом (УСО). Взаимодействие между контроллерами осуществляется по проприетарным протоколам с использованием на физическом уровне «витой» пары или оптического канала связи Ethernet. Реже применяется Modbus RTU/RS-485.

Компоненты систем контроля и управления устанавливаются в непосредственной близости от объекта,

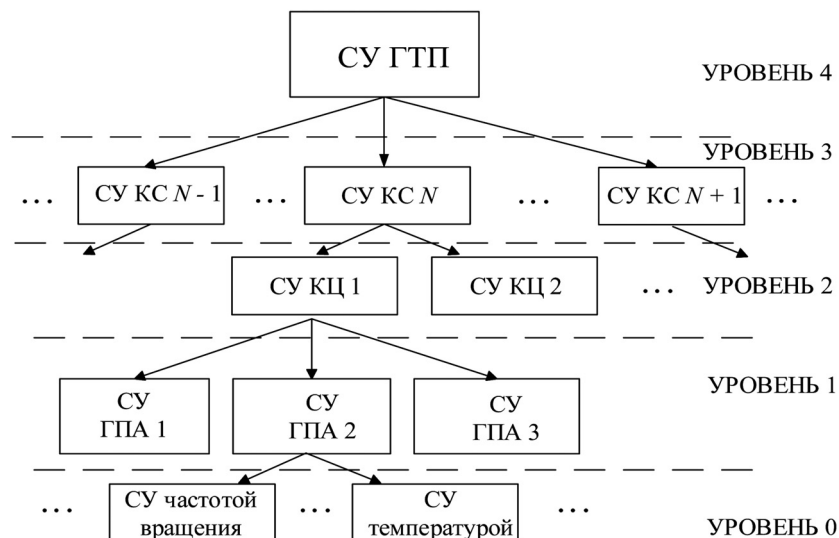


Рис. 4. Иерархия управления газотранспортным предприятием

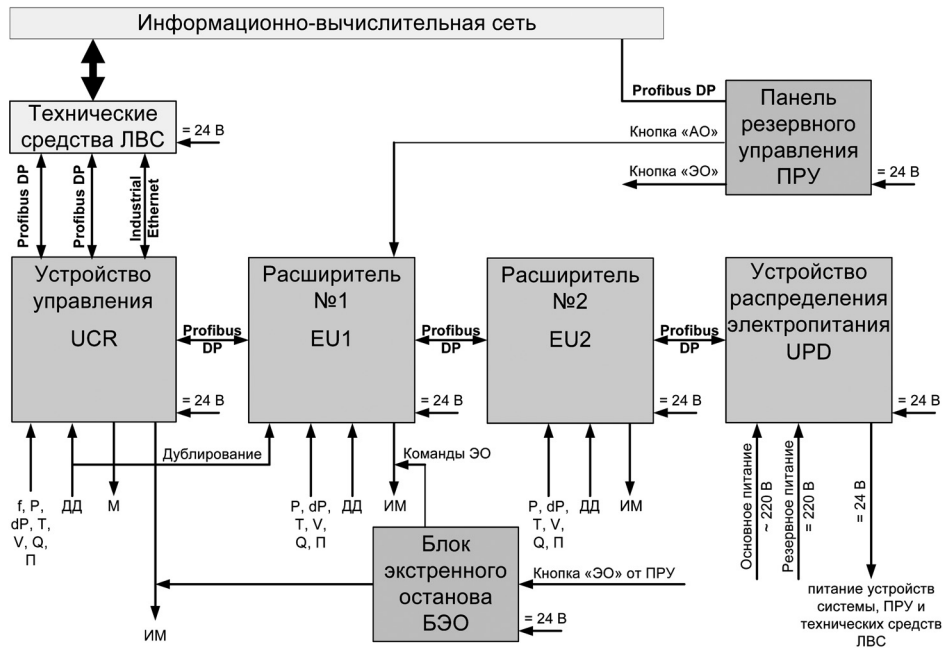


Рис. 5. Типовая структура СУ

однако требуют специальных помещений (блоков, контейнеров), учитывающих требования по типу взрывозащиты, сейсмостойкости, огнестойкости в соответствии параметрами места установки. Исполнительные механизмы размещаются на технологических трубопроводах объекта управления и соединяются с входными клеммами технических средств систем управления посредством кабелей, коммутационных коробок, кабельных эстакад, кабельных прямиков и узлов прохода через стены блоков и контейнеров. Кроме того, традиционно в аппаратных шкафах подключение к модулям УСО выполняется через промежуточный клеммник. Датчики устанавливаются, как правило, непосредственно на трубопроводах и узлах технологического оборудования и работают в критических условиях эксплуатации.

В случае опасных производств, к которым относятся объекты нефтегазовых отраслей промышленности, создаются системы отказоустойчивого управления (СОУ) — системы, толерантные к неисправностям (англ. Fault-Tolerant Control Systems) [16-19].

Актуальные задачи уменьшения влияния воздействий среды функционирования на системы пассивным способом, связанным с сокращением длины кабельных линий и количества соединений. Кроме того, при приближении аналого-цифровых преобразователей к датчикам достигается снижение себестоимости за счет сокращения длины кабельных линий, клеммных коробок и клемм, кабельных лотков, существенно расширяются возможности по диагностике линии связи.

Заключение

Территориальная распределенность объектов приводит к зависимости среды функционирования систем управления от размещения элементов и способов их соединения, что затрудняет адекватное моделирование возмущений и синтез по условиям инвариантности

к ним. Синтез по причинно-следственным моделям дает информационно-алгоритмическую топологию, которая лежит в основе решения задач размещения компонентов и трассировки соединений. Выйти за замкнутый круг неопределенностей позволяет выбор подходящего процесса сходящихся итераций, интегрирующих процедуры динамического синтеза и геометрического проектирования систем управления. Сказанное определяет актуальность проблемы разработки подходов и методик моделирования и проектирования систем управления территориально распределенными объектами, инвариантных к воздействиям среды.

Развитие инновационной процедуры синтеза и проектирования СУ ставит перед исследователями целый ряд нетривиальных задач разработки:

- специализированных «языков» описания геометрических моделей рассредоточенных систем управления конкретными объектами;
- методов размещения и трассировки соединений, т. е. построения геометрических моделей по причинно-следственным моделям систем управления;
- методов моделирования воздействий среды по геометрическим моделям, т. е. построения причинно-следственных моделей по геометрическим и др.

Реализация итерационной процедуры динамического синтеза и «физического» проектирования систем управления становится возможной с помощью специализированных методов и инструментальных средств, развитие которых потребует определенных научных исследований, а разработка — значительных трудовых затрат. Эти усилия и затраты, безусловно, окупятся за счет повышения качества проектов и надежности систем управления опасными технологическими процессами и техническими объектами. Можно ожидать и сокращения сроков проектирования. Учитывая распределенность устанавливаемых

на площадке или технологической установке датчиков и исполнительных механизмов, реализация проектов (строительно-монтажные работы), включая установку средств автоматизации, прокладку кабельной продукции, осуществляется непосредственно на объекте строительства и в зависимости от климатического пояса может занять до двух лет.

Список использованных источников

1. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования/Под ред. В. В. Солодовникова. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1967. С. 770.
2. А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. С. 232.
3. А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев. Эволюционный синтез систем управления. Л.: ЛЭТИ, 1983. С. 80.
4. М. Ханан, Дж. Курцберг. Методы размещения. В кн. Теория и методы автоматизации проектирования вычислительных систем. М.: Мир, 1977. С. 147-225.
5. А. Фокс, М. Пратта. Вычислительная геометрия. Применение в производстве и проектировании. М.: Мир, 1982. С. 304.
6. Ф. Препарата, М. Шеймос. Вычислительная геометрия: введение/Под ред. Ю. М. Банковского. М.: Мир, 1989. С. 478.
7. Ю. Г. Стоян, С. В. Яковлев. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. Киев: Наук. думка, 1986. С. 265.
8. Г. Г. Забудский. Алгоритм решения минимаксной задачи размещения объекта на плоскости с запрещенными зонами// Автомат. и телемех. вып. 2, 2004. С. 93-100.
9. О. И. Кутузов, Т. М. Татарникова. Подход к оптимизации структуры межсетевых устройств с привлечением генетических алгоритмов//Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, № 11. 2006. С. 61-67.
10. W. I. Rowen. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines//ASME J. Eng. Power, vol. 105, 1983. P. 865-869.
11. S. K. Yee, J. V. Milanovic, F. M. Hughes. Overview and Comparative Analysis of Gas Turbine Models for System Stability Studies// IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 1, Feb. 2008. P. 108-118.
12. А. И. Кухтенко. Проблема инвариантности в автоматике. — Киев: Наук. думка, 1963. С. 376.
13. А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев. Анализ параметрической чувствительности и синтез структур инвариантных систем управления//Изв. ЛЭТИ. Вып. 111. Автоматическое управление и регулирование. Л.: ЛЭТИ, 1972. С. 8-24.
14. V. B. Yakovlev, D. H. Imaev. Structure synthesis of invariant control systems//Int. J. Control, 1989, vol. 49, no. 5. P. 1453-1463.
15. E. J. Davison. The robust control of a servomechanism problem for linear time-invariant multivariable systems//IEEE Trans on Automatic Control, vol. AC-21, no 1, February 1976. P. 25-34.
16. M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki. Diagnosis and Fault Tolerant Control. Control Systems, vol. 2. London: Springer-Verlag, 2006. P. 227.
17. М. Ю. Шестопапов. Системы отказоустойчивого управления технологическими процессами. СПб.: Изд-во «Элмор», 2013. С. 308.
18. Д. Х. Имаев, С. В. Квашнин, А. В. Черников, М. Ю. Шестопапов. Проектирование систем отказоустойчивого управления сложными техническими объектами//XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018). Сборник докладов в 2-х т. Санкт-Петербург. 25-27 мая 2018 г. Т. 1. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 295-297.
19. С. В. Квашнин, Ю. А. Кorablev, А. В. Черников и др. Управление и информационные технологии. Наука и образование. 2-е изд., доп./Под общ. ред. М. Ю. Шестопапова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 222.

Design of control systems for geographically distributed objects

M. Yu. Shestopalov, doctor of technical sciences, associate professor, head of department of automation and control processes, St. Petersburg state electrotechnical university «LETI» n. a. V. I. Ulyanov (Lenin).

D. H. Imaev, doctor of technical sciences, professor, department of automation and control processes, St. Petersburg state electrotechnical university «LETI» n. a. V. I. Ulyanov (Lenin).

Yu. A. Korablev, PhD, associate professor, department of automation and control processes, St. Petersburg state electrotechnical university «LETI» n. a. V. I. Ulyanov (Lenin).

S. V. Kvashnin, deputy SEO, CJSC «SPF «Systema-Service».

The problem of creating control systems for geographically distributed objects under the conditions of invariance to environmental influences is discussed. An iterative procedure for the synthesis and design of systems using dynamic models with an open causal topology and geometric models, reflecting the spatial distribution of components and sources of disturbances, is proposed.

Keywords: system, control, model, structure, graph, invariance, synthesis, topology, geometric modeling.