



УДК 681.5

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

Оптимальное реконфигурирование в системах отказоустойчивого управления

Рассмотрены методы оптимизации топологии и структуры при восстановлении неисправных систем управления.

Система управления, неисправность, восстановление, отказоустойчивость

Современные технические системы оснащаются все более сложными средствами управления, позволяющими поддерживать режимы нормального функционирования объектов. С усложнением систем растет и вероятность неисправностей, способных привести к отказам. Традиционные методы проектирования не гарантируют создания систем управления (СУ), сохраняющих способность удовлетворительно функционировать при непредусмотренных изменениях характеристик датчиков, исполнительных механизмов, каналов передачи данных и преобразователей сигналов, нарушениях в работе прикладных программ. Потребности практики, а также эволюция принципов адаптации и развитие технической диагностики привели к идее построения систем отказоустойчивого управления (СОУ).

В последние десятилетия по тематике отказоустойчивости или толерантности СУ к неисправностям (*англ.* Fault-Tolerant Control Systems – FTCS) опубликовано большое число работ (см., например, [1], [2]). Подавляющее большинство исследований по толерантным СУ проводится зарубежными учеными, практически отсутствуют ссылки на публикации российских исследователей. Развитие методов разработки СОУ – нового типа систем гражданского назначения, для которого не накоплен достаточный опыт эксплуатации и практически отсутствуют аналоги и прототипы, ставит перед отечественными исследователями и инженерами ряд задач, типичных для проблематики управления, но обладающих принципиальной новизной [3].

В сложных технических системах имеются естественные предпосылки «самовосстановления» СУ при неисправностях – принятия активных мер по поддержанию временной работоспособности в автоматическом режиме.

1. Большое число измерительных элементов и исполнительных механизмов (десятки и сотни) позволяют комбинировать источники информации и средства управления. Например, при неисправности одного из датчиков информацию о состоянии объекта можно получать обработкой данных от других датчиков, а при неисправности исполнительного механизма воздействие на объект могут оказывать другие устройства.

2. Цифровой характер сигналов и устройств их обработки позволяет реконфигурировать топологию информационных связей, реструктурировать алгоритмы и подстройку параметров СУ программным способом.

3. Практическое отсутствие ограничений объема памяти контроллеров дает возможность заранее подготовить варианты восстановления систем («горячее» виртуальное» резервирование).

Методы восстановления неисправных СУ нуждаются в развитии; недостаточно формализованы постановки целого ряда задач. В статье обсуждаются вопросы реконфигурирования топологии, реструктуризации алгоритмов и подстройки параметров СУ, потерявших запас устойчивости вследствие неисправностей.

Модели СУ. Задачи локализации неисправностей и восстановления СУ решаются на основе структурированных моделей, причем уровень структуризации определяется требуемой глубиной локализации потенциальных неисправностей. Топология иерархических СУ L -го уровня представляется в форме множественных отношений на множествах переменных подсистем (гиперграфов). На рис. 1 иллюстрируется отображение

$$\mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{F} : \text{переменных выхода } \mathcal{Y} = \bigcup_m Y^m \text{ и входа } \mathcal{F} = \bigcup_m F^m \text{ трех подсистем } S = \{S_1^{L-1}, S_2^{L-1}, S_3^{L-1}\}.$$

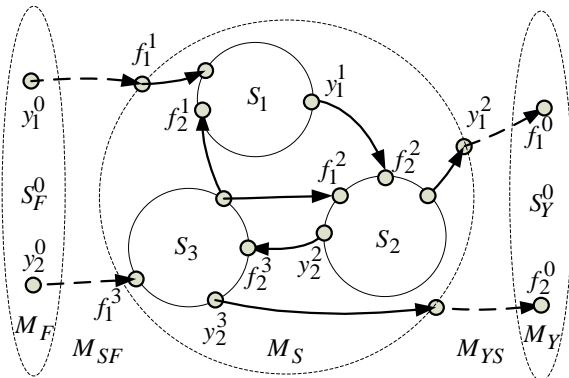


Рис. 1

Дальнейшее раскрытие модели СУ зависит от глубины структуризации подсистем $(L-1)$ -го уровня (рис. 2). Подсистемы со «свернутой» структурой (рис. 2, а) задаются в форме пространства состояний матрицами $[A, B, C, D]$ или в форме передаточных матриц $W(s) = \{W_{qr}(s)\}$. Если подсистемы представлены структурными схемами или сигнальными графами (рис. 2, б) и имеют формальный уровень $L=1$, то СУ в целом имеет уровень $L=2$. В общем случае СУ L -го уровня представляют взаимосвязь подсистем нижележащего $(L-1)$ -го уровня иерархии (рис. 2, в). В статье рассматриваются линейные стационарные модели СУ в форме структурных схем и сигнальных графов (рис. 2, б).

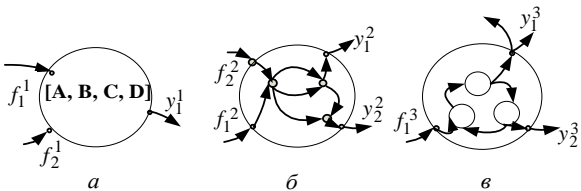


Рис. 2

Оптимальное реконфигурирование СУ.

Пусть подсистема диагностирования обнаруживает неисправность СУ, локализует подсистему,

потерявшую запас устойчивости, и идентифицирует корни характеристического полинома (ХП) $A_0(s)$, недопустимо приближившиеся к границе устойчивости. Следует изменить сильный компонент графа подстройкой параметров, реструктуризацией операторов дуг или более радикально – введением дуг (a, b) , образующих новые контуры. Эти меры изменяют определитель графа

$$\Delta(s) = 1 - \sum_k K_k(s) + \sum_{k,l} K_k(s) K_l(s) - \dots = \frac{A(s)}{A_0(s)}, \quad (1)$$

где $K_k(s)$ – передаточные функции (ПФ) контуров; $K_k(s)K_l(s)$ – произведение ПФ некасающихся (не имеющих общих вершин) контуров и т. д.; $A(s)$ – ХП восстановленной системы.

Особенностью задачи восстановления СУ является селективная (избирательная) управляемость «плохих» корней ХП и неуправляемость «хороших» корней. Реконфигурирование, т. е. введение дуги (a, b) с ненулевым оператором изменяет положение только некомпенсированных нулями полюсов s_i ПФ $\Phi_{ba}(s)$ – корней ХП $A_0(s)$. Действительно, если числитель и знаменатель

$$\Phi_{ba}(s) = \frac{B_{ba}(s)}{A_0(s)} = \frac{d(s)B_{ba1}(s)}{d(s)A_{01}(s)},$$

имеют нетривиальный общий делитель $d(s) = \prod_i (s - s_i)$, то независимо от ПФ вводимой дуги

$W_{ab}(s) = B_{ab}(s)/A_{ab}(s)$ ХП восстановленной системы

$$A(s) = d(s)[A_{ba1}(s)A_{ab}(s) + B_{ba1}(s)B_{ab}(s)]$$

имеет сомножитель $d(s)$, корни которого останутся неподвижными.

Условие восстанавливаемости формулируется как селективная (избирательная) управляемость «плохих» полюсов s_i ПФ, т. е. корней ХП $A_0(s)$, что означает отсутствие у ПФ нулей, равных полюсам s_i :

$$\Phi_{ba}(s_i) \neq 0. \quad (2)$$

Если вариант включения дуги (a, b) , удовлетворяющий условию (2), не единственный, то выбор целесообразно сокращать с учетом условия селективной неуправляемости «хороших» полюсов s_j , что означает наличие у ПФ нулей, равных полюсам s_j :

$$\Phi_{ba}(s_j) = 0. \quad (3)$$

Если выполнение условий (2) и (3) оставляет выбор, то необходим критерий *оптимального реконфигурирования*, в качестве которого предлагается принять оценки модуля функций чувствительности (ФЧ) определителей графов. Как следует из разложения определителя (1) по дуге

$$\Delta(s) = \Delta_0(s) + T_{ab}^\Delta(s)W_{ab}(s),$$

абсолютная ФЧ $T_{ab}^\Delta(s)$ не содержит оператора дуги (a, b) . Это позволяет оценивать *потенциальную эффективность* вариантов реконфигурирования, т. е. выбирать топологию восстановленных систем до конкретизации операторов дуг коррекции [4]. Задача решается как максимизация модуля $T_{ab}^\Delta(j\omega)$ на интервале частот Ω , которому принадлежат подлежащие перемещению корни. Чем больше модуль ФЧ, тем меньше необходимое усиление дуги коррекции, тем менее сложной получается восстановленная система.

В [4] показана равносильность двух критериев минимизации сложности средств восстановления:

$$\begin{aligned} \text{mod } T_{ab}^\Delta(j\omega) &\xrightarrow{\Omega_{\max}} \rightarrow, \\ \text{mod } \Phi_{ab}^\Delta(j\omega) &\xrightarrow{\Omega_{\max}} \rightarrow. \end{aligned} \quad (4)$$

Достаточным условием восстанавливаемости служит большое усиление $\text{mod } \Phi_{ba}(js_i) \gg 1$ системы на интервалах частот Ω , содержащих модули «плохих» корней.

Дополнительные условия выбора топологии связаны с ограничениями и критериями, вытекающими из условий воспроизведения задания и инвариантности системы к возмущениям. Усиление эквивалентного контура $K_e(s) = \Phi_{ba}(s)W_{ab}(s)$ на полюсах s_k изображения воздействия $F(s)$ должно быть малым

$$\text{mod } K_e(s_k) \ll 1.$$

Реструктурирование неисправных СУ. Структура оператора дуги (a, b) формируется последовательно (рис. 3): 1 – выбор компенсатора $W_{\text{ком}dc}$, обеспечивающего селективную неуправляемость (3), путем введения нулей $z_j = s_j$ в ПФ $W_{ab}(s)$; 2 – выбор корректора $W_{\text{кор}ad}$ и коэффициента усиления k_{cb} , обеспечивающих распределение перемещаемых корней.

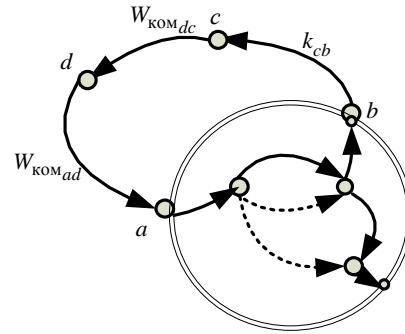


Рис. 3

Связь условия (3) с топологией СУ устанавливается по формуле для ПФ графа [5], приведенной к полиномиальному виду:

$$\Phi_{ba}(s) = \frac{B_{ba}(s)}{A_0(s)} = \frac{B_{ba}^{(1)}(s)A_{ba}^{(3)}(s)A^{(2)}(s)}{A_0(s)}. \quad (5)$$

В числителе ПФ (5) полином $B_{ba}^{(1)}$ равен произведению полиномов числителей ПФ дуг, образующих путь (поз. 1); $A^{(2)}$ – произведению знаменателей ПФ дуг, входящих в контуры, касающиеся пути, но в него не входящие (поз. 2), $A_{ba}^{(3)}$ – ХП подграфа на дугах в поз. 3. Таким образом, корни ХП системы s_j неподвижны, т. е. неисправная система селективно неуправляема по каналу $b \rightarrow a$, если нули ПФ дуг графа в поз. 1 или полюсы ПФ в поз. 2, или корни ХП подграфа на дугах в поз. 3 равны s_j .

Методы восстановления неисправных систем модифицируют известные подходы теории управления к синтезу СУ [6] и развивают их с применением современных инструментальных средств.

1. Полиномиальный (операторный) метод восстановления. Пусть дифференциальное уравнение неисправной СУ, полученное в результате компенсации «хороших» полюсов ПФ, записано в операторной форме

$$A_0(p)y(t) = B_0(p)u(t), \quad p \equiv d/dt,$$

где полиномы A_0 и B_0 взаимно просты. Требования к восстановленной системе представлены в форме желаемого ХП $A^*(s)$. Необходимо найти дифференциальное уравнение дуги коррекции:

$$A_R(p)u(t) = -B_R(p)y(t)$$

из тождества

$$\begin{aligned} A_{\text{вос}}(p) &= A_0(p)A_R(p) + \\ &+ B_0(p)B_R(p) \equiv A^*(p). \end{aligned} \quad (6)$$

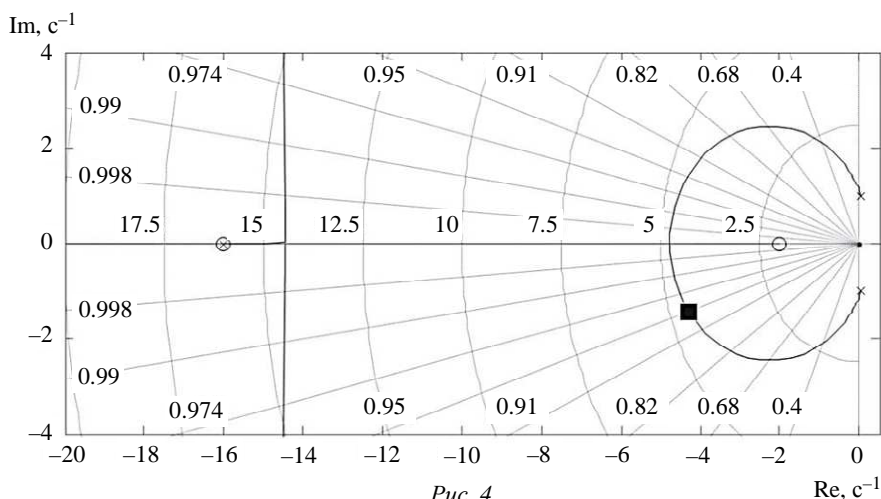


Рис. 4

Уравнения вида (6) называют *диофантовыми*, поскольку полиномы, как и целые числа, образуют алгебраическую структуру – *кольцо* с операциями сложения, вычитания и умножения (без деления).

Для упрощения задачи *структурного* синтеза степени полиномов $A_R(p)$ и $B_R(p)$ приняты равными: $m_R = n_R$. Число неизвестных параметров равно $2n_R + 1$. Таким же должно быть число уравнений, составленных из равенства коэффициентов полиномов в левой и правой частях тождества (6). Поскольку коэффициенты при старших степенях единичны, то число уравнений равно степени полиномов $n_0 + n_R$. Отсюда: $n_0 + n_R = 2n_R + 1$, что однозначно определяет структуру корректора $W_{корad}$: $n_R = n_0 - 1$. Параметрический синтез – определение коэффициентов полиномов A_R и B_R . Условие равенства коэффициентов полиномов $A_{вос}$ и A^* дает систему уравнений, матрица которой формируется из коэффициентов полиномов A_0 и B_0 . Матрица оказывается так называемой матрицей Сильвестра. Ее определитель – *результант* полиномов A_0 и B_0 – отличен от нуля, так как полиномы взаимно просты. Это гарантирует существование и единственность решения

2. *Матричные методы восстановления систем управления.* Для синтеза корректора можно использовать методы пространства состояний. Решается задача *параметрического* синтеза – вычисления матрицы коэффициентов обратной связи по состоянию и матрицы наблюдателя состояния. Регулятор и наблюдатель состояния образуют динамический регулятор, порядок которого равен порядку управляемой части неисправной системы.

Таким образом, если принять полиномиальный или матричный методы восстановления, то структура восстановленной системы определяется на стадии формирования компенсатора $W_{комdc}$.

3. *Метод корневых годографов.* Пусть выбрано место включения реконфигурирующей дуги (a, b) и вычислена ПФ неисправной системы, которая имеет пару неустойчивых полюсов $s_{1,2} = 0.05 \pm 1.0i$ и «хорошие» полюсы: $s_3 = -16$ и $s_4 = -32$. Компенсатор, обеспечивающий селективную неуправляемость полюса p_3 , дополняет ПФ нулем $z_3 = -16$. Для коррекции контура вводится ноль $z_2 = -2$, что дает ПФ скорректированного контура:

$$\Phi_{корba}(s) = \frac{(s+16)(s+2)}{(s+32)(s+16)(s^2 - 0.1s + 1)}$$

Корневой годограф позволяет выбрать усиление контура $k_{ab} = 223$, обеспечивающее желаемое положение доминирующей пары корней: $-4.3 \pm 1.43i$. В целях минимизации порядка компенсатора полюс p_3 не компенсируется; «малоподвижность» достигается за счет малого усиления контура (рис. 4).

4. *Комплексно-частотный метод восстановления.* Применение современных программных средств создает предпосылки развития комплексно-частотного подхода к восстановлению неустойчивых систем управления. Рациональные ПФ представляются в факторизованной форме, что позволяет контролировать нули и полюсы, их точную или приближенную компенсацию. Метод сводится к последовательному формированию ЛАЧХ эквивалентного контура $L_e(\omega)$ с наклоном

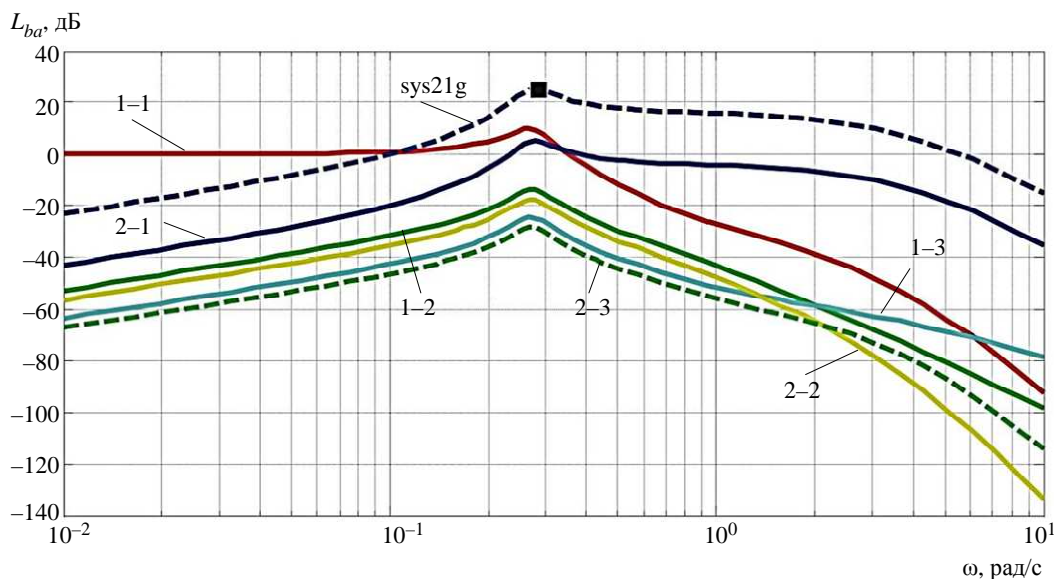


Рис. 7



Рис. 8

5 дБ (рис. 7). В контур обратной связи вводится звено с усилением 10, в результате чего ЛАЧХ канала поднимется на 20 дБ (линия sys21g на рис. 7). Для формирования типового вида ЛАЧХ в окрестности частоты среза в контур коррекции вводятся ноль $z_1 = -5$ и полюс $p_1 = -0.2$, в результате чего дуга (a, b) будет описываться ПФ

$$k \frac{\tau s + 1}{T s + 1} = 10 \frac{0.2s + 1}{5s + 1}. \quad (7)$$

Параметрическая оптимизация. Методы восстановления дают не только структуру, но также значения параметров. Вместе с тем, оптимизация параметров по практически обоснованным критериям может улучшить динамику восстановленных систем без усложнения их структуры.

Критерий параметрической оптимизации подбирается для конкретных систем и задач восстановления. Например, критерий в виде интеграла от мо-

дуля ошибки воспроизведения единичного ступенчатого воздействия $J = \int \text{abs}(y(t) - 1) dt$ в результате для оптимизации параметров k, τ, T (7) дает

$$W_{ab}(s) = k \frac{\tau s + 1}{T s + 1} = \frac{-2.4s + 1}{9.8s + 1}.$$

На рис. 8 приведены результаты имитации восстановленной системы. Видно значительное улучшение качества процессов реконфигурирования в результате оптимизации параметров.

Сравнительный анализ методов восстановления неисправных систем управления позволяет сделать вывод о предпочтительности комплексно-частотного метода, который интегрирует в едином базисе топологический и структурно-параметрический этапы синтеза, учитывает естественные свойства систем и использует декомпозицию задач в частотной области, что позволяет минимизировать сложность восстановленной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Ann. Rev. in Control. 2008. Vol. 32. P. 229–252.
2. Isermann R. Fault Diagnosis Applications – Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-Tolerant Systems. Springer, 2011. P. 354.
3. Шестопалов М. Ю. Системы отказоустойчивого управления технологическими процессами. СПб.: Элмор, 2013. С. 308.
4. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Эволюционный синтез систем управления / ЛЭТИ. Л., 1983. С. 80.
5. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 620.
6. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев и др.; под ред. В. Б. Яковлева. 3-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2009. С. 567.

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

OPTIMAL RECONFIGURATION IN THE FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEMS

The problem of auto-recovery in the fault-tolerant control systems is considered. An overview of reconfiguration procedures and structure optimization methods is given.

Control system, fault, reconfiguration, fault-tolerancy

УДК 62.83.523: 681.513.6

Б. Р. Андриевский,
Институт проблем машиноведения РАН

Н. Д. Поляхов, В. В. Путов, В. Н. Шелудько
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Адаптивное управление роботизированными подвижными объектами

Излагается краткий обзор современных мировых достижений, а также разработок научно-педагогического коллектива кафедры систем автоматического управления в области методов и разработок адаптивных систем управления подвижными объектами.

Адаптивное и робастное управление, роботизированные подвижные объекты, автономное и дистанционное управление, техническое зрение, мобильные роботы, распознавание образов, объезд и столкновение с препятствием, всенаправленные колеса, безопасность посадки, измерение и корреляция коэффициента сцепления с тормозными характеристиками самолета

1. Современные методы построения и работок адаптивных систем управления роботизированными подвижными объектами.

Общие методы адаптивного управления. Задача управления в условиях неполноты и неточности описания моделей объектов и условий их функ-

ционирования представляет собой одну из классических задач построения систем автоматического управления. Применение принципов адаптации для решения этой задачи привлекает внимание ученых и проектировщиков в течение многих десятилетий.