

R. I. Solnitsev, A. I. Al-Kiswani
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

RAPPID PROTOTYPING IN DESIGN AND MANUFACTURE OF PRECISION DEVICES BASED ON ADDITIVE TECHNOLOGY

The features of precision instruments (navigation, medical, measuring, etc.), including the requirements for achieving high accuracy with minimal weight and dimensions, leads to the manufacture of parts with hidden cavities, complex geometry, which requires prototyping. The article presents the results of the analysis and selection of the most appropriate additive technology for the design and production of precision instruments, the preparation of consumables from plastics (photopolymers, polyamides, polystyrenes), metal powders (Titanium, aluminum alloys, etc.), programs managing 3D printers, including the transition from the 3D drawing of the details in the .stl format and through the Slicer by converting to G-Code, the selection of 3D printers, the results of modeling the adaptation processes of additive technology to precision instruments. Advantages of additive technology are shown, especially at the stages of design and technological preparation of production.

Additive technologies, rapid prototyping, design and manufacture of precision instruments, selective laser sintering, 3D printing, finite element method, CNC machines

УДК 681.5

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

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

Топологический синтез селективно-инвариантных систем управления

Обсуждаются способы обеспечения селективной инвариантности систем управления с произвольной причинно-следственной топологией. Рассматриваются линейные стационарные модели топологического, структурного и параметрического рангов неопределенности в форме сигнальных графов. Условием независимости установившейся реакции системы от возмущения является наличие в графе внутренней модели среды дуги, нули или полюсы передаточной функции которой равны спектру возмущения. Топологическая формула для передаточной функции сигнального графа, преобразованная к полиномиальной форме, позволяет получить условия локализации дуги относительно пути в сильно связанном графе. Поскольку требования к инвариантности и устойчивости оказываются противоречивыми, решается задача декомпозиции процедуры синтеза. Приведен иллюстративный пример коррекции инвариантной системы в комплексно-частотной области.

Система управления, топология, структура, сигнальный граф, селективная инвариантность, возмущение, спектр, синтез

Целью управления большинством промышленных объектов является поддержание заданных технологических режимов в условиях неконтролируемых воздействий среды. Независимость переменных от возмущений в терминах классической теории управления называется *инвариантностью*. Свойство, когда установившаяся

реакция системы не зависит от конкретных типов воздействий, называют *селективной* (избирательной) инвариантностью. Различные формы инвариантности и селективной инвариантности являются первичными требованиями к системам управления. Хотя проблеме устойчивости традиционно уделяется особое внимание, следует заме-

тять, что многие объекты устойчивы, а системы становятся неустойчивыми именно из-за стремления обеспечить инвариантность к воздействиям путем создания контуров с большим усилением на частотах возмущений.

Теория инвариантности систем автоматического управления зародилась и развивалась в трудах Г. В. Щипанова, Н. Н. Лузина, В. С. Кулебакина, Б. Н. Петрова, А. И. Кухтенко, А. А. Вавилова, А. Р. Гайдука и многих других (см., например, [1]–[7]). В классических работах рассматриваются линейные стационарные модели систем с непрерывным временем, на которые действуют сигнальные (аддитивные) возмущения среды. Современная теория селективной инвариантности развивается в направлении расширения класса моделей – рассматриваются нелинейные, нестационарные и стохастические модели, системы с запаздыванием [8], проблемы адаптации инвариантных систем [9], а также многомерные системы [10]. В англоязычной технической литературе термин «инвариантность» практически не используется, а применительно к свойству компенсации возмущений и ослабления их последствий предпочтение отдается терминам «disturbance rejection» и «disturbance attenuation» [11]. Расширяется и понятие «возмущения»: к ним относят любые отклонения от исходной модели, что сближает идеи инвариантности, адаптации, робастности [12], а также пассивной отказоустойчивости систем управления [13].

Большинство работ по теории инвариантности основано на моделях в форме систем уравнений без учета причинно-следственного характера взаимосвязи переменных. Между тем именно ориентированность связей является принципиальной особенностью моделей теории управления и отличает их от структурных моделей физических систем вообще. В публикациях по теории инвариантности обычно рассматриваются системы типовой структуры. Мало работ, посвященных методам синтеза структур инвариантных систем управления [6], [14]. Современные управляющие комплексы представляют собой совокупности взаимодействующих подсистем с собственными и общесистемными функциями и целями, вследствие чего структура их моделей весьма развита как по «горизонтали» (многоконтурность), так и по «вертикали» (иерархичность). Структурная сложность систем управления требует выбора адекватных форм представления моделей. И само понятие структуры систем нужда-

ется в уточнении. Целесообразно различать топологию причинно-следственных связей переменных и структуру операторов преобразования переменных (порядки уравнений, степени операторных полиномов).

Характер анализа структурно сложных систем становится в большей степени объяснительным. На первый план выходят задачи выявления зависимости свойств от топологии системы (путей передачи информации и контуров обратных связей) и структур операторов компонентов, оценки влияния компонентов и подсистем на динамику системы, чувствительности системы к вариациям связей между подсистемами и степени автономности подсистем. Синтез сложных систем управления редко удается свести к параметрической оптимизации скалярных или векторных критериев. Практика ставит задачи выбора структур алгоритмов управления, а также более общие задачи топологического синтеза, в частности – выбора точек съема сигналов, несущих информацию о состоянии объекта и среды, мест оказания управляющих и компенсирующих воздействий.

В данной статье идеи инвариантности систем управления развиваются применительно к линейным стационарным моделям с произвольной причинно-следственной топологией на основе комплексно-частотного подхода. Условия инвариантности исследуются на базе сформулированных А. А. Вавиловым принципов системного подхода к моделированию, анализу и эволюционному синтезу сложных систем управления, прежде всего, принципа последовательного раскрытия неопределенности и принципа избыточности [15].

Модели систем управления в форме сигнальных графов. Инвариантность относится к свойствам «расширенных» систем управления [15]–[17], модели которых

$$M_{RS} = \langle M_Y, M_{YSF}, M_F \rangle$$

включают модель системы со связями со средой

$$M_{YSF} = \langle M_{YS}, M_S, M_{SF} \rangle,$$

которая, в свою очередь, содержит: модель собственно системы M_S , модели среды на входе M_F и выходе M_Y , описание связей системы со средой на выходе и входе M_{YS} и M_{SF} . Расширение модели системы сводится к указанию переменных, инвариантность которых исследуется, заданию точек приложения сигнальных (аддитивных) воздействий, а также их спектра и интенсивности.

Связь условий инвариантности систем с их топологией и структурой операторов удобно устанавливать по моделям в форме графов. Графы – универсальный язык описания структур. Ориентированный граф (орграф) на языке теории отношений представляется как пара $G = \langle X, W \rangle$ – несимметричное бинарное отношение W на множестве X . Если элементы базового множества X интерпретируются как сигналы, а элементы бинарного отношения W – как преобразователи сигналов, то это *сигнальный* граф [19]. Операторы преобразования переменных, как правило, задаются в форме передаточных функций (ПФ) и частотных характеристик. Несимметричное бинарное отношение X на множестве звеньев W определяет *C-граф*, который дуален по отношению к *G-графу*. Вершинам *C-графа* (звеньям) соответствуют операторы преобразования, а элементам отношения X – сигналы. В вершинах линейных графов переменные заходящих дуг суммируются. Поэтому в случае неединичных степеней вершин в *C-графах* отсутствуют некоторые дуги, отвечающие переменным-причинам, а в *G-графах* – вершины, отвечающие переменным-следствиям.

При относительно небольшом числе переменных в целях наглядности рисуют *диаграммы* графов, которые при «правильном» размещении вершин и дуг несут дополнительную информацию для проектировщика. На диаграммах графов Мэйсона вершины в виде кружочков представляют переменные (сигналы). Преобразователям сигналов отвечают дуги графа – линии со стрелками. На диаграммах *C-графов* вершинам в форме прямоугольников отвечают преобразователи, а дугам – переменные.

К свойствам орграфов относится соединимость [18], проявлением которого, в частности, являются важнейшие топологические понятия пути, контура и отношения касания. *Путь* в ориентированном графе – чередующаяся последовательность вершин и дуг, в которой все вершины различны; *контур* – замкнутый путь; *касание* – наличие общей вершины. Образование контура обратной связи оказывается единственным способом стабилизации неустойчивых систем и ослабления следствий возмущений, которые нельзя непосредственно измерять. Хорошо известно, что контур, касающийся пути, способен радикально изменять характеристики передачи. Дополнительный путь компенсации возмущения является необходимым условием реализации абсолютной инвариантности [4].

Принцип последовательного раскрытия неопределенности означает, что в эволюционном процессе построения моделей более определенная модель системы получается дополнением предыдущей модели некоторой информацией, позволяющей решать новые задачи анализа и синтеза. Переход от модели системы M_S к более определенной модели M_{YSF} означает добавление информации о связях системы со средой M_{YS} и M_{SF} , а переход от модели M_{YSF} к расширенной системе M_{RS} – описание среды M_F и M_Y . Топология системы, структуры операторов и значения параметров раскрываются последовательно в соответствии с рангами неопределенности моделей $M_S(R)$; $R = 0, 1, 2, 3$. Модель нулевого ранга $M_S(0)$ – множество переменных; первый ранг $M_S(1)$ задает топологию причинно-следственных связей переменных; $M_S(2)$ – структурный ранг, который получается дополнением модели топологического ранга информацией о структурах операторов дуг; конкретизация параметров дает полностью определенные модели третьего ранга $M_S(3)$.

В соответствии с принципом избыточности выявление конкретного свойства не требует привлечения полностью определенной модели. Формы представления моделей систем со сложной структурой должны позволять естественное выделение частных моделей, содержащих только необходимую информацию о рассматриваемом свойстве. Линейные модели M_S описывают свободные движения автономной системы и представляют данные для исследования устойчивости. Модели M_{YSF} описывают каналы передач от входов к выходам системы и представляют данные для выявления свойства инвариантности. По модели расширенной системы M_{RS} исследуется свойство селективной инвариантности. Выполнение необходимых условий инвариантности проверяется по моделям топологического ранга $M_{YSF}(1)$, а селективная инвариантность выявляется по моделям структурного ранга $M_{RS}(2)$ и т. п.

Понятие о рангах неопределенности моделей собственно систем, систем со связями и расширенных систем управления применимо к любым формам представления моделей. В том случае, когда модели динамики систем управления представлены в форме систем дифференциальных уравнений в причинно-следственной форме [20], пары номеров строк и столбцов ненулевых недиа-

гональных элементов матрицы системы дают бинарное отношение W , т. е. топологию системы M_S (1). Структура системы M_S (2) задается степенями операторных полиномов дифференциальных уравнений, а параметры – их коэффициентами. Связи системы со средой на входе описывает матрица правой части системы. В случае единственного входа M_{SF} – матрица-столбец с единичным элементом в строке, номер которой отвечает точке входа системы. В случае единственного выхода системы указание номера переменной дает модель M_{YS} .

В теоретических исследованиях предпочтительнее сигнальные G -графы. На рис. 1 изображен фрагмент графа линейаризованной модели системы управления частотой вращения ротора газовой турбины M_S (1): $|X| = 13$, $W = \{(2, 1), (1, 10), (3, 2), (4, 3), (5, 4), (6, 5), (7, 6), (8, 7), (9, 8), (9, 10), (10, 9), (11, 7), (12, 11), (12, 10), (13, 12)\}$. Связи системы со средой задаются номерами вершин, где суммируются воздействия среды $M_{SF} = \{1, 9\}$ и вершин, переменные которых приняты за выходы $M_{YS} = \{10, 13\}$.

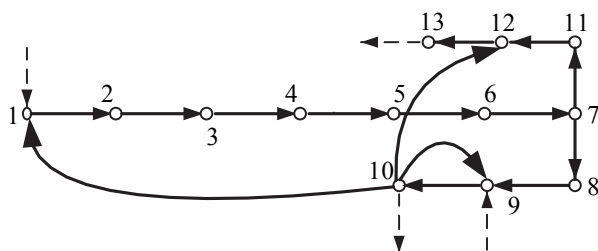


Рис. 1

В инженерной практике распространены структурные схемы, в которых функции суммирования переменных выделяются как отдельные

элементы. В прямоугольные блоки-вершины удобнее вписывать ПФ линейных звеньев, условные обозначения нелинейностей и иных классов операторов, а также функции компонентов систем управления. На рис. 2 изображена несколько упрощенная структурная схема системы управления газовой турбиной [21] на языке графического редактора программы MATLAB/Simulink (приводится из [22]).

Топологические условия инвариантности.

Условия инвариантности исследуются по модели системы со связями со средой M_{YSF} . Связи системы со средой далее принимаются единичными. Достаточным условием инвариантности переменной y_q к возмущению f_r является отсутствие пути в графе системы из вершины r в вершину q . При этом переменная абсолютно инвариантна к любым сигналам, о которых нет никакой информации. Проверка условия основана на анализе путей в орграфе по наименее определенной модели топологического ранга M_{YSF} (1). Условие не зависит от структур операторов и значений параметров, а распространяется и на более сложные классы моделей (нелинейные, нестационарные).

В сильно связанных (*сильных*) графах топологические условия инвариантности менее тривиальны. По определению, в сильном графе существует путь между любыми парами вершин, а значит, все дуги принадлежат контурам.

Пусть имеется единственный путь из вершины r в вершину q . Формула Мэйсона [19] для ПФ графа запишется так:

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

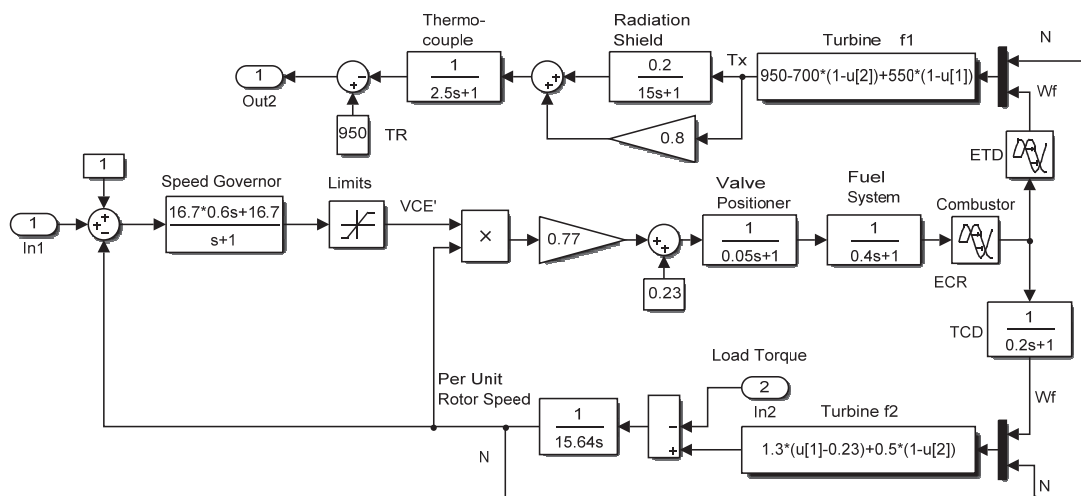


Рис. 2

где $P_{qr}(s)$ – ПФ пути из вершины r в вершину q ; $\Delta_{qr}(s)$ – минор пути, равный определителю подграфа, полученного удалением пути;

$$\Delta(s) = 1 - \sum_k K_k(s) + \sum_{k,l} K_k(s)K_l(s) - \dots \quad (2)$$

– определитель графа; $K_k(s)$ – ПФ k -го контура, $K_k(s)K_l(s)$ – произведение ПФ попарно некасающихся контуров и т. д. Если рациональные ПФ контуров заменить отношениями полиномов и привести выражение (2) к общему знаменателю, то определитель сильного графа запишется как отношение

$$\Delta(s) = \frac{A(s)}{A_0(s)} = \frac{A_0(s) + \delta A(s)}{A_0(s)}$$

– характеристический полином (ХП) замкнутой $A(s)$ и полностью разомкнутой систем $A_0(s)$, который равен произведению ХП всех дуг $A_i(s)$. Если у всех дуг графа степени полиномов числителей ПФ ниже степеней знаменателей, то степень полинома $\delta A(s)$ ниже степени $A_0(s)$, т. е. ХП системы $A(s)$ и полностью разомкнутой системы $A_0(s)$ имеют одинаковые степени.

Выделяют различные позиции дуги графа относительно пути [23]: 1 – дуга принадлежит пути; 2 – дуга принадлежит контуру, касающемуся пути; 3 – дуга принадлежит контуру, не касающемуся пути. Преобразуем формулу (1): вместо составляющих в виде рациональных функций комплексного аргумента подставим отношения полиномов числителей и знаменателей (аргумент s опущен):

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

где A_{qr}^{Δ} – ХП подграфа, образованного дугами в поз. 3, т. е. принадлежащими контурам, не касающимся пути. В сильном графе полиномы A_{qr} и $A_{qr}^{\Delta 0}$ являются делителями полинома A_0 , 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 сокращений формула для передачи графа (1) запишется в полиномиальном виде [24], [25]

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

где $B_{qr}^{(1)}$ – произведение полиномов числителей ПФ дуг в поз. 1; $A^{(2)}$ равен произведению знаме-

нателей ПФ дуг, находящихся в поз. 2; $B_{qr}^{(3)}$ – числитель определителя подграфа на дугах в поз. 3 (ХП подграфа).

Связь условий инвариантности с топологией системы следует из (3). Для абсолютной инвариантности должны тождественно равняться нулю: числитель ПФ дуги в поз. 1, знаменатель ПФ дуги в поз. 2 или ХП подграфа, образованного дугами в поз. 3 к пути. Условия указывают путь организации причинно-следственных связей переменных системы с целью исключения последствий возмущений, о которых нет никакой информации. Однако попытка реализации абсолютной инвариантности наталкивается на принципиальные проблемы. Абсолютная инвариантность не достижима в системах с единственным путем (исключая тривиальный способ обнуления передачи пути). Бесконечное усиление контура (дуги в поз. 2) на всех частотах дает неустойчивую систему, которую невозможно реально стабилизировать, так как пришлось бы действовать в области «немоделируемой» динамики. Равенство нулю ХП подграфа, в частном случае – наличие единичного контура, не касающегося пути, обуславливает не только неустойчивость системы, но также вырождение системы и катастрофическую негрубость. Примером являются системы с «косвенным измерением возмущения» [3]. В системах управления с обратными связями реализуются только условия *инвариантности до ε* .

Условия селективной инвариантности. Селективная инвариантность относится к свойствам расширенной системы и исследуется по моделям M_{RS} .

При нулевых предначальных условиях реакция линейной системы с ПФ $\Phi_{qr}(s_k) = \frac{B_{qr}(s)}{A(s)}$ на воздействие $f_r(t)$ с рациональным изображением $F_r(s) = \frac{B_F(s)}{A_F(s)}$ представляется как сумма переходной и установившейся составляющих

$$y_{qr}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{B_{qr}(s_i)}{A'(s_i)} F_r(s_i) e^{s_i t} + \sum_{k=1}^{n_F} \Phi_{qr}(s_k) \frac{B_F(s_k)}{A_F'(s_k)} e^{s_k t},$$

где $n = \deg A$ – порядок системы, $n_F = \deg A_F$; s_i – простые (некратные) полюсы ПФ системы, т. е.

$A(s_i) = 0$; s_k – полюсы изображения (спектр) воздействия, т. е. $A_F(s_k) = 0$. Пусть $A(s_k) \neq 0$, т. е. отсутствует обобщенный резонанс. Знак (') означает дифференцирование полинома по аргументу.

Установившаяся реакция системы

$$y_{q \text{ уст}}(t) = \sum_{k=1}^{n_F} \Phi_{qr}(s_k) \frac{B_F(s_k)}{A_F(s_k)} e^{s_k t}$$

равна нулю, если ПФ обращается в нуль на спектре воздействия, т. е. нули ПФ системы равны полюсам изображения воздействия

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

Абсолютная селективная инвариантность наблюдается при условиях: ПФ дуги в поз. 1 к единственному пути имеет нуль, равный спектру сигнала; ПФ дуги в поз. 2 имеет полюс, равный спектру сигнала; корни ХП подграфа, образованного дугами в поз. 3 к пути, совпадают со спектром сигнала.

Переходная составляющая реакции селективно-инвариантной системы является следствием посленулевых начальных условий, определяется полюсами ПФ системы s_i и в общем случае отличается от нуля.

Синтез селективно-инвариантных систем.

Классические графоаналитические процедуры синтеза [26] рассматривают системы типовой структуры с минимально-фазовыми ПФ. Синтез складывается из этапов обеспечения селективной инвариантности переменной ошибки, т. е. точности воспроизведения задания или подавления возмущения, и коррекции – стабилизации без потери достигнутых условий инвариантности. Современные инструментальные средства позволяют вычислять ПФ систем сложной структуры, контролировать их нули и полюсы, строить и визуализировать частотные характеристики. Благодаря этому снимаются ограничения на структуры систем и расположение нулей и полюсов ПФ, а двухэтапная процедура синтеза селективно инвариантных систем обобщается и на системы произвольной топологии.

Этап обеспечения селективной инвариантности состоит из трех частей: топологической, структурной и параметрической. Во-первых, формируется топология системы из условий потенциальной возможности обеспечения равенства спектру возмущения: 1 – нулей ПФ пути передачи воздействия; 2 – полюсов ПФ дуги в поз. 2 к пу-

ти; 3 – корней ХП подграфа в поз. 3. Если в графе нет дуг, удовлетворяющих перечисленным условиям, то их следует ввести, т. е. решить задачу топологического синтеза. Предпочтителен вариант образования и формирования контура, касающегося пути. Если имеется несколько вариантов включения дуги, образующей контур, ставится задача выбора. Предпочтителен вариант топологии, когда вводимая дуга занимает поз. 2 по отношению к максимальному числу путей передачи возмущений. Во-вторых, выбирается структура оператора дуги. Условие – число полюсов ПФ контура должно равняться числу полюсов изображения воздействия. В-третьих, подбираются параметры звена из условия совпадения полюсов ПФ контура и изображения воздействия. Указанный способ обеспечения селективной инвариантности называют принципом внутренней модели [27]. Хорошо известна роль интеграторов в контуре управления. Благодаря нулевому полюсу ПФ достигается нулевая установившаяся ошибка воспроизведения постоянных любого уровня (астатизм). Встречаются примеры введения в контур консервативного звена, ПФ которого имеет мнимые полюсы. Это обеспечивает нулевую установившуюся ошибку системы при гармонических возмущениях любой амплитуды.

Системы с «внутренними компенсаторами» возмущений робастны [28]: установившаяся ошибка системы равна нулю вне зависимости от значений некоторых параметров системы и амплитуд воздействий. Абсолютно селективно-инвариантные системы робастны и по отношению к вариациям структур операторов и топологии системы. Как следует из (3), абсолютная селективная инвариантность достигается при равенстве спектру возмущения: нулей ПФ пути передачи воздействия; полюсов ПФ дуги в поз. 2 к пути; корней ХП подграфа в поз. 3. Параметрические, структурные или топологические вариации системы, не нарушающие этих условий, не влияют на установившуюся ошибку.

Во многих практических задачах известен лишь диапазон частот воздействия. Повышение усиления контура до необходимого уровня на этих частотах обеспечивает селективную инвариантность до ϵ .

Введение внутреннего компенсатора и повышение усиления контура в большинстве случаев вызывают потерю устойчивости системы. Это ставит задачу коррекции – стабилизации системы без потери ранее достигнутого свойства селек-

тивной инвариантности. Процедура коррекции выполняется по моделям M_S и состоит из трех частей: топологической, структурной и параметрической. Выбор места коррекции относится к топологическому синтезу. Для перемещения «плохих» корней ХП, появившихся в результате обеспечения селективной инвариантности, необходимо изменить контурную часть системы. Это достигается путем подстройки параметров существующего контура, реструктуризации контура или реконфигурирования графа системы. По терминологии классической теории автоматического управления реструктуризация контура означает введение в контур дуг (последовательная коррекция), а реконфигурирование системы – образование новых контуров (параллельная коррекция или корректирующая обратная связь).

Особенностью коррекции является обеспечение избирательной управляемости «плохих» корней ХП. «Хорошие» полюсы ПФ системы, напротив, желательно оставить на месте. Предлагается использовать прием искусственного образования диполей – компенсирующих друг друга нулей и полюсов ПФ [24]. Введение дуги (a, b) изменяет положение только некомпенсированных нулями полюсов s_i ПФ $\Phi_{ba}(s)$. Действительно, если числитель и знаменатель ПФ

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

имеют нетривиальный общий делитель $d(s)$, то независимо от ПФ дуги $W_{ab}(s) = B_{ab}(s)/A_{ab}(s)$ ХП скорректированной 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 при замыкании контура.

Топологическим условием корректируемости является существование вершин измерения b и воздействия на систему a , когда ПФ системы не имеет нулей, компенсирующих перемещаемые полюсы $\Phi_{ba}(s_i) \neq 0$. Достаточным условием корректируемости является большое усиление системы на интервалах частот, содержащих модули «плохих» корней

$$\text{mod } \Phi_{ba}(j | s_i |) \gg 1.$$

В частности, необходимо, чтобы «плохие» нули находились далеко от перемещаемых корней.

Если выполнение указанных условий оставляет выбор, то необходим критерий оптимального

реконфигурирования, в качестве которого предлагается принять оценки модуля функций чувствительности (ФЧ) определителей графов [17], [29]. Как следует из разложения определителя (2) 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 систем до конкретизации операторов дуг коррекции. Задача решается как максимизация модуля $T_{ab}^\Delta(j\omega)$ на интервале средних частот, которому принадлежат подлежащие перемещению корни. Чем больше модуль ФЧ, тем меньше необходимое усиление дуги коррекции.

Проблема синтеза инвариантных систем заключается в принципиальном противоречии между требованиями к установившимся и переходным процессам в системах управления с обратной связью. Свойство робастности разрешает указанное противоречие и является основой декомпозиции синтеза. На этапе коррекции должны соблюдаться условия разделения движений: дуга коррекции не образует новых путей в графе, полюсы ПФ дуги коррекции в поз. 1 к пути, нули ПФ дуги коррекции в поз. 2, а также ХП подграфа на дугах в поз. 3 к пути не равны спектру возмущения. Тогда при любой структуре и значениях параметров коррекции не меняются положения нулей ПФ системы по каналу возмущения.

Относительная независимость этапов обеспечения селективной инвариантности до ε и коррекции системы достигается в комплексно-частотной области. Принимается допущение о принадлежности спектров собственно системы и возмущения разным диапазонам частот. Как правило, спектр воздействий относится к диапазону низких частот. Коррекция формирует частотную характеристику на более высоких относительно спектра воздействия средних частотах. Разделение вынужденных установившихся и собственных движений системы управления оказывается вполне естественным в случае постоянных и степенных воздействий, изображения которых имеют нулевые полюсы.

Применение современных инструментальных средств создает предпосылки развития комплексно-частотного метода коррекции. Факторизация рациональных ПФ позволяет контролировать нули и полюсы, их точную или приближенную компенсацию. Метод сводится к выбору оптимально-

го места коррекции с последующим формированием структуры эквивалентного контура с ПФ, т. е. к выбору коэффициента усиления k_{cb} , нулей и полюсов ПФ компенсатора $W_{dc}^{ком}$ и корректора $W_{ac}^{кор}$ (рис. 3) [24].

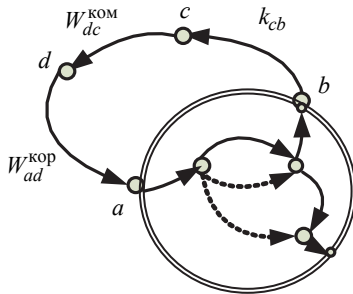


Рис. 3

Иллюстративный пример. На рис. 4 иллюстрируется ЛАЧХ эквивалентного контура, ПФ которого имеет нулевой полюс. Это обеспечивает абсолютную селективную инвариантность к постоянным возмущениям. Замкнутая система имеет два «плохих» полюса $s_{1,2}$. Выбор коэффициента усиления k_{cb} из условия $L_1(|s_{1,2}|) > 16$ дБ обеспечивает их достаточную подвижность. Кружочками показаны компенсируемые «хорошие» полюсы p_1 и p_2 , введение которых дает числитель ПФ компенсатора

$$W_{dc}^{ком}(s) = \frac{((1/|p_1|)s + 1)((1/|p_2|)s + 1)}{((1/|p_3|)s + 1)((1/|p_4|)s + 1)}.$$

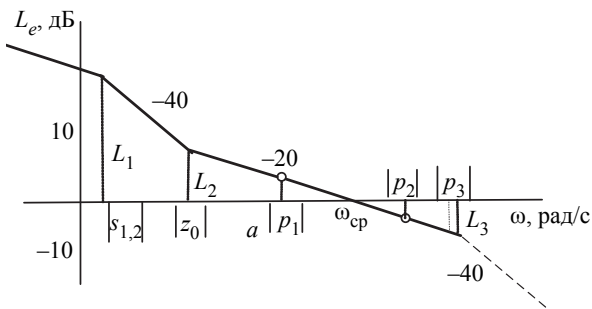


Рис. 4

Для выполнения условия реализуемости ПФ компенсатора дополнена действительными отрицательными полюсами p_3, p_4 . Большие по модулю полюсы в области малых усиления ($L_3 \leq -10 \dots -18$ дБ) практически не меняются при замыкании контура. Для формирования типового вида ЛАЧХ в области средних частот ПФ контура дополняется нулем z_0 , который вычисляется по значению $L_2 = 4 \dots 8$ дБ. Значения L_2 и L_3 выби-

раются по номограммам связи корневых показателей качества с параметрами ЛАЧХ в зависимости от ее типа [17]. По модулям $|z_0|$ и $|p_3|$ записывается ПФ дуги коррекции

$$W_{ad}^{кор}(s) = (1/|z_0|s + 1),$$

которую следует дополнить большими по модулю действительными отрицательными полюсами. Последовательное соединение усилителя, компенсатора и корректора (рис. 3) дает ПФ дуги коррекции

$$W_e(s) = \Phi_{ba}(s)k_{cb}W_{dc}^{ком}(s)W_{ad}^{кор}(s).$$

Современные управляющие комплексы представляют собой совокупности взаимодействующих подсистем с собственными и общесистемными функциями и целями, вследствие чего структура их моделей развита как по «горизонтали», так и по «вертикали». Сложность систем требует выбора адекватных форм представления моделей, а понятие структуры систем нуждается в уточнении. Следует различать топологию причинно-следственных связей переменных и структуру операторов их отображения.

Различные формы инвариантности и селективной инвариантности являются первичными требованиями к системам управления. Хотя проблеме устойчивости традиционно уделяется приоритетное внимание, следует заметить, что многие промышленные объекты устойчивы, а системы становятся неустойчивыми именно из-за стремления обеспечить инвариантность к воздействиям путем создания контуров с большим усилением на частотах возмущений. В статье обсуждаются способы обеспечения селективной инвариантности систем управления с произвольной причинно-следственной топологией. Рассматриваются линейные стационарные модели топологического, структурного и параметрического рангов неопределенности в форме сигнальных графов. Условием независимости установившейся реакции системы от возмущения является наличие в графе дуги, передаточная функция которой имеет нули или полюсы, равные спектру возмущения («модели среды»). Преобразованная к полиномиальному виду топологическая формула передач сигнального графа позволяет получить условия включения такой дуги относительно единственного пути в сильно связанном графе.

Поскольку в системах с обратной связью требования к инвариантности и устойчивости оказываются противоречивыми, ставится задача деком-

позиции процедуры синтеза. Показано, что свойство робастности селективно-инвариантных систем к некоторым вариациям структур операторов и топологии системы является основой декомпозиции синтеза. Приведен пример коррекции инвариантной системы в комплексно-частотной области, иллюстрирующий прием избирательной неуправляемости полюсов.

Системы распределенного управления энергетическими объектами функционируют в условиях множества интенсивных воздействий разной физической природы и различных спектров [25]. Задачам и методам моделирования расширенной среды, компенсации и ослабления влияния нескольких воздействий в системах управления сложной структуры должны быть посвящены отдельные исследования и разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щипанов Г. В. Теория инвариантности: труды и документы / сост. З. М. Лезина, В. И. Лезин. М.: Физматлит, 2004. 427 с.
2. Лузин Н. Н., Кузнецов П. И. К абсолютной инвариантности и инвариантности до ε в теории дифференциальных уравнений // Докл. АН СССР. 1946. Т. 51, № 4. С. 247–249.
3. Кухтенко А. И. Проблема инвариантности в автоматике. Киев: ГИТЛ УССР, 1963. 376 с.
4. Петров Б. Н. Теория автоматического управления. Избранные труды. Т. 1. М.: Наука, 1983.
5. Кулебакин В. С. Операторное $K(D)$ -изображение функций и его практическое применение // Тр. ВВИА им. Н. Е. Жуковского. 1958. Вып. 695. 59 с.
6. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Анализ параметрической чувствительности и синтез структур инвариантных систем управления // Изв. ЛЭТИ. 1972. Вып. 111. Автоматическое управление и регулирование. С. 8–24.
7. Гайдук А. Р. О синтезе систем автоматического управления при заданной форме воздействий // Автомат. и телемех. 1984. № 6. С. 13–20.
8. Пыркин А. А., Бобцов А. А., Никифоров В. О. и др. Компенсация полигармонического возмущения, действующего на состояние и выход линейного объекта с запаздыванием в канале управления // Автомат. и телемех. 2015. Вып. 12. С. 43–64.
9. Цыпкин Я. З. Адаптивно инвариантные дискретные системы управления // Автомат. и телемех. 1991. Вып. 5. С. 96–124.
10. Мисриханов М. Ш. Инвариантное управление многомерными системами. М.: Энергоатомиздат, 2003. 236 с.
11. Wang J., Yue H., Dimirovski G. Disturbance Attenuation in Linear Systems Revisited // Int. J. Control, Automation and Systems. 2017. Vol. 15 (4). P. 1611–1621.
12. Никифоров В. О., Ушаков А. А. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация и робастность. СПб.: Изд-во СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 232 с.
13. Jiang J., Yu X. Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches // Annual Reviews in Control. 2012. Vol. 36, iss. 1. P. 60–72.
14. Yakovlev V. B., Imaev D. H. Structure synthesis of invariant control systems // Int. J. Control. 1989. Vol. 49, № 5. P. 1453–1463.
15. Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. чл.-кор. АН СССР А. А. Вавилова. М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. 417 с.
16. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. С. 232.
17. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Эволюционный синтез систем управления / ЛЭТИ. Л., 1983. 80 с.
18. Харари Ф. Теория графов. М.: Мир, 1973. 300 с.
19. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы / пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 620 с.
20. Анисимов В. И. Топологический расчет электронных схем. Л.: Энергия, 1977. 240 с.
21. Rowen W. I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines // ASME J. Eng. Power. 1983. Vol. 105. P. 865–869.
22. Yee S. K., Milanovic J. V., Hughes F. M. Overview and Comparative Analysis of Gas Turbine Models for System Stability Studies // IEEE Trans. Power Syst. 2008. Vol. 23, № 1, Feb. P. 108–118.
23. Седлар М. Диполь чувствительности и метод точек чувствительности // Чувствительность автоматических систем. М.: Наука, 1968. С. 79–84.
24. Шестопапов М. Ю., Имаев Д. Х. Оптимальное реконфигурирование в системах отказоустойчивого управления // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 5. С. 55–61.
25. Проектирование систем управления территориально распределенными объектами / М. Ю. Шестопапов, Д. Х. Имаев, Ю. А. Кораблев, С. В. Квашнин // Инновации. 2018. № 10. С. 100–107.
26. 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. 567 с.
27. Уонэм М. Линейные многомерные системы управления. Геометрический подход. М.: Наука, 1980. 376 с.
28. Davison E. J. The robust control of a servo-mechanism problem for linear time-invariant multivariable systems // IEEE Trans. on AC-21. 1976. № 1. P. 25–34.
29. Вавилов А. А., Имаев Д. Х., Пошехонов Л. Б. Метод коррекции контурной части сложных систем, базирующийся на оценке функций чувствительности определителя графа // Вопросы теории систем автоматического управления: сб. статей Ленингр. гос. ун-та. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. С. 75–84.

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

S. V. Kvashnin
CJSC «SPF „Systema-Service“»

TOPOLOGICAL SYNTHESIS OF SELECTIV INVARIANT AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

The paper discusses various ways of achieving the property of selective invariance (disturbance attenuation or rejection) for automatic control systems with arbitrary causal structure. We consider linear time-invariant models of the topological, structural and parametric levels of certainty. An arc in the signal flow graph whose transfer function has zeros or poles equal to the disturbance spectrum provides the zero steady-state reaction of the system. Topological formula for the graph's transfer function, transformed to a polynomial form, allows obtaining localization conditions for the internal environment model placement. Since the requirements of invariance and stability contradict one another, the problem is to decompose the invariant control systems synthesis procedure. An illustrative example of the stabilization of an invariant system in the frequency domain is given.

Control system, topology, structure, signal flow graph, selective invariance, disturbance, spectrum, synthesis

УДК 37.042.2, 37.047

Н. А. Назаренко, П. И. Падерно
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

И. С. Никифоров
ООО «Би.Си.Си.»

Информационная поддержка ранней профориентации. Модель претендента. Паспорт

Рассмотрены особенности ранней профориентации, которая должна учитывать как пожелания школьников (и их родителей), так и их способности (возможности), а также требования конкретных профессий. При этом неправильная (завышенная) оценка способностей и возможностей ведет к неправильному выбору будущей профессии (области деятельности), переквалификации и появления психологического недовольства собой у претендента. Рассмотрен комплекс задач, решение которых нуждается в информационном сопровождении при ранней профориентации. Приведена обобщенная структура (верхний уровень) профессионального паспорта, включающая следующие основные компоненты: интеллектуальные, психологические, психофизиологические, физиологические и социальные, а также демографические характеристики, успехи и достижения, а также профессиональную траекторию. Приведен комплекс кортежей, формально описывающих верхний уровень личного профессионального паспорта. Проведен анализ основных пользователей и задач, нуждающихся в информационной поддержке. Рассмотрены особенности и структура информационной системы поддержки профориентации на ранних стадиях (школа), а также перспективы ее развития на основе использования личного профессионального паспорта с целью построения эффективной профессиональной траектории, наиболее соответствующей требованиям и возможностям претендента.

Профориентация, информационная поддержка, профессиональный паспорт, модель претендента, информационная система поддержки профориентации, профессиограмма

Под ранней профориентацией будем в дальнейшем понимать профориентацию школьников 6–8-го классов. При этом следует заметить, что

уникальные профессии (балерина, цирковой артист, фигурное катание, плавание и др.), для которых профориентация проводится значительно