

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

AUTOMATIC CONTROL
AND IDENTIFICATION

УДК 62-83: 531.3

**Системы автоматического управления
с избыточной размерностью вектора управления:
определение и цели использования***

А.М. МАЛЫШЕНКО

643050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: mat@tpu.ru

Статья включает в себя определение класса систем автоматического управления, у которых число управляющих воздействий в каком-либо из режимов работы или какой-то их совокупности превышает число целенаправленно управляемых при этом величин. К этому классу, в частности, можно отнести самонастраивающиеся системы, адаптивные системы с дуальным управлением, с переменной структурой, отказоустойчивые системы, системы с резервированием. Такими являются системы автоматического управления, например, у многих современных летательных аппаратов, роботов с кинематической избыточностью, у технологических установок и комплексов химических производств. Предложено определение управления как целенаправленного изменения состояний, свойств, характеристик и/или протекающих в объекте управления процессов. Вводятся понятия координатных, параметрических, структурных и алгоритмических управляющих воздействий, возмущений и управляемых величин в системах автоматического управления. Пространство состояний объекта и/или системы управления предложено расширить за счет включения в него не только координатных, но и параметрических, структурных и алгоритмических переменных, изменяющихся в процессе управления целенаправленным образом или под действием внешней среды, или при отказах отдельных устройств. Оно названо обобщенным пространством состояний. Систематизированы типовые задачи управления и указаны те из них, которые относятся к регулированию. Такая систематизация особенно практически значима для учебных изданий по теории автоматического управления. Перечислены возможные 14 целей использования указанной избыточности, в том числе для целенаправленного изменения фундаментальных свойств объектов и систем автоматического управления. Показана необходимость разработки типовых математических моделей для такого класса систем и их использования при разработке методов синтеза и анализа этого достаточно широкого класса систем автоматического управления на единой математической базе.

Ключевые слова: объект управления, система автоматического управления, типовые задачи управления; координатные, параметрические, структурные и алгоритмические переменные системы, обобщенное пространство состояний системы, избыточная размерность вектора управления, цели использования избыточности, фундаментальные свойства управляемых объектов и систем

DOI: 10.17212/1814-1196-2014-4-31-40

ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления (ТАУ), основы которой были заложены еще в середине девятнадцатого века, за прошедшие полтора столетия превратилась в строгую хорошо математизированную научную дисциплину. Развитые в ней принципы построения, методы анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ) успешно используются в инженерной практике. На ее основе в последние десятилетия достигнуты впечатляющие результаты, в первую очередь связанные с созданием САУ для сложных ракетно-космических, робототехнических систем, ядерно-энергетических установок, химических производств, гибких про-

* Статья получена 17 ноября 2014 г.

изводственных комплексов и предприятий, работающих большую часть времени в автоматическом режиме.

По многим разделам ТАУ полученные к настоящему времени научные результаты создают заметный опережающий задел для практической реализации более совершенных автоматических систем. К ним, в частности, можно отнести развитые методы и алгоритмы оптимизации [1, 2, 3], адаптации [4, 5], модальные методы синтеза САУ [6].

Вместе с тем все острее ощущается отставание ТАУ от потребностей практики в части синтеза управляющих устройств и алгоритмов управления для сложных многорежимных объектов управления. В частности, несмотря на то что в практических реализациях САУ для таких объектов широко используются управления избыточной размерности (относительно размерности вектора выходных управляемых переменных), еще мало опубликовано научных работ с систематизированным изложением теоретических и прикладных проблем систем автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления (САУ с ИРВУ). Да и само определение этого класса систем еще не стало общепризнанным. Это приводит к тому, что схемотехнические решения и параметрическая настройка таких систем на практике до сих пор базируются в основном на интуиции и опыте разработчиков. При этом эффективность принимаемых проектных решений зачастую далека от той, которая потенциально достижима для данного конкретного объекта управления.

Избыточность в самых различных проявлениях является характерным свойством объектов живой природы. Она используется, прежде всего, для их самосохранения как индивидуумов, для многоцелевого использования одних и тех же составляющих их частей (органов) и достижения большей эффективности осуществляемых процессов. В частности, кинематическая избыточность, заложенная в руке человека (свыше 25 степеней подвижности), позволяет нам совершать ею разнообразные сложные операции, в том числе с преодолением и обходом препятствий. Поэтому человечество, всегда стремившееся заимствовать у природы ее эффективные решения, уже с давних пор использует избыточность при создании технических средств, в том числе средств и систем автоматизации. Улучшения их эксплуатационных характеристик при этом зачастую добиваются за счет применения различных видов избыточности – аппаратной, функциональной, структурной, алгоритмической, информационной и/или временной.

Вместе с тем следует сказать, что возможности использования избыточности в технических системах до сих пор далеко не исчерпаны. В определенной мере сдерживающим фактором является недостаточная теоретическая проработка проблем использования избыточности. По этой причине к актуальным научным задачам в области естественных наук отечественной Академией наук еще в 1980-е годы были выделены: создание теоретических основ построения и реализации систем управления с различными формами избыточности, позволяющих повысить качество функционирования и надежность, а также методы управления сложными механическими системами со многими степенями свободы.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИЗБЫТОЧНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ ВЕКТОРА УПРАВЛЕНИЯ

В большинстве реализованных САУ для относительно простых объектов число управляющих воздействий выбирают равным числу независимо управляемых величин. Тем самым добиваются упрощения в технической реализации систем. В то же время многие объекты управления (ОУ) имеют число пригодных для целенаправленных воздействий на них со стороны управляющего устройства управлений, превышающее размерность вектора управляемых переменных. Подобная избыточность в определенной мере характеризует имеющиеся у объекта резервы по управлению. Она может быть повышена и часто повышается за счет встраивания в ОУ дублирующих исполнительных устройств, использования дополнительных каналов воздействия на него. При разумном и эффективном использовании такой избыточности удается не только парировать частичные отказы в его системе управления за счет реконфигурации управляющего устройства (а в ряде случаев и самого объекта управления), но и оптимизировать режимы функционирования объекта, повысить точность и улучшить другие показатели качества управления, адаптировать систему к изменениям внешней среды, внутренних параметров.

Применительно к САУ с ИРВУ в теории автоматического управления к настоящему времени наиболее проработаны лишь методы и алгоритмы анализа протекающих в них процес-

сов, причем в основном это касается лишь систем, управляемые объекты в которых, обладая ИРВУ, подвержены воздействию только координатных управлений.

С учетом вышеизложенного и в связи со все более широким использованием в создаваемых САУ управлений различных типов, в том числе и избыточных по размерности, назрела необходимость в дальнейшем обобщении и разработке единой теории систем с комбинированными управлениями на базе уже развитых концептуальных основ, методов анализа и синтеза систем с координатными, параметрическими, структурными управлениями.

Несмотря на относительно широкое распространение в самых различных областях применения систем автоматического регулирования и управления с избыточной размерностью вектора управления, до сих пор фактически нет строгого, достаточно полного и общепринятого определения (дефиниции) класса САУ с ИРВУ. Данное автором в [7] подобное определение из-за малой доступности указанной публикации лишь частично восполнило этот пробел.

К классу САУ с ИРВУ в данной работе и в [7] отнесены такие САУ, в которых в отдельно взятом штатном режиме функционирования ОУ или какой-либо их совокупности размерность вектора всех автоматически формируемых управляющих воздействий на объект управления и само управляющее устройство превышает размерность вектора всех управляемых выходов объекта в этом режиме или в выбранной их совокупности.

Применяемые во многих публикациях, посвященных системам этого класса, определения САУ чаще всего связываются с целевым назначением используемой избыточности в размерности вектора управляющих воздействий по сравнению с размерностью вектора управляемого выхода системы, с принципом функционирования последней или способом ее достижения. К таковым, в частности, можно отнести самонастраивающиеся и адаптивные системы, системы с дуальным управлением, с переменной структурой, отказоустойчивые системы. В робототехнике таковыми являются манипуляционные роботы с кинематической избыточностью, определяемые иногда и как манипуляторы с избыточной подвижностью, в гироскопических системах – избыточные или кратные гиросиловые системы, или гиросиловые системы с избыточной структурой.

При таком разнообразии определений САУ, использующих управления избыточной размерности (в смысле ИРВУ), затушевывается общность систем всех этих типов и единство многих проблем анализа их свойств и синтеза.

Следует также отметить, что до сих пор не систематизированы принципы и цели использования управлений избыточной размерности, отсутствует классификация систем этого типа. В этой связи представляется необходимым восполнить вышеуказанные пробелы в ТАУ и на этой основе наметить программу теоретических и прикладных исследований, необходимых для целенаправленных и более эффективных применений в САУ управлений избыточной размерности.

Для определения указанного класса объектов и систем автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления необходимо сделать уточнение относительно самого понятия «управление». К сожалению, даже среди специалистов по теории управления до сих пор существует разное толкование основополагающих для ТАУ понятий – «управление» и «регулирование», на что совершенно справедливо указывалось еще в [8]. К таковым, на наш взгляд, относится трактовка регулирования лишь как решения задачи стабилизации, т. е. обеспечения постоянства каких-либо управляемых выходных величин (координат) объекта, и определение управления как решение задачи создания условий, обеспечивающих требуемое протекание процесса (поддержание необходимого режима или изменение во времени одной или нескольких координат в объекте управления) и т. п. Такое характерное для многих учебных пособий и монографий по ТАУ определение управления не раскрывает всех целей и используемых в современных САУ видов управлений.

Более корректным представляется определение управления, рекомендуемое в [9]. Здесь управление определяется в самом общем смысле как процесс выработки и осуществления управляющих воздействий, при которых обеспечивается достижение желаемых результатов функционирования управляемого объекта. Однако и в этом определении остаются не полностью раскрытыми цели управления.

Рискуя впасть в какую-либо другую ошибку, связанную с введением дефиниций (определений) для конкретных понятий, определим управление как процесс выработки и реализации целенаправленных воздействий на объект управления, при котором обеспечивается достижение желаемого характера протекающего в нем процесса или желаемое поддержание или изменение его состояния, какого-либо свойства или характеристики либо его связей с внешней средой.

К сожалению, даже в ставших фактически уже классическими и широко используемых учебных изданиях по теории автоматического управления, в частности в [2, 10, 11], нет клас-

сификации (типизации) задач, решаемых в системах управления, в том числе и в системах автоматического управления (САУ).

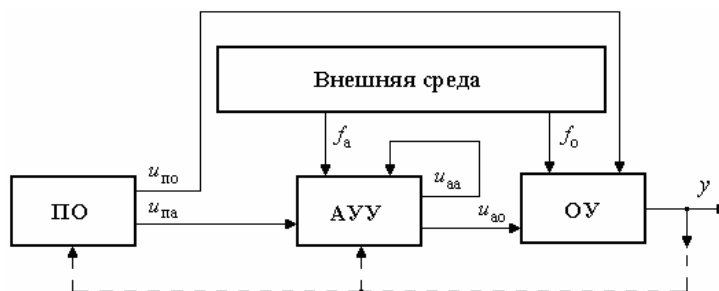
К числу типовых задач управления техническими объектами, по мнению автора, правомерно отнести:

- параметрическую перенастройку;
- изменение связей между отдельными элементами (устройствами) объекта управления и/или его связей с внешней средой;
- переалгоритмизацию переалгоритмизируемых частей объекта управления;
- финитное управление;
- терминальное управление;
- стабилизацию;
- слежение;
- программное управление;
- поддержание экстремума заданной функции, характеризующей объект управления;
- противоаварийное управление;
- восстанавливающее управление.

Суть части из этих задач управления достаточно четко определена в [7, 9].

При этом под регулированием следует понимать процессы, реализуемые только при решении задач стабилизации, слежения, программного управления и поддержания экстремума заданного функционала, характеризующего объект управления. Таким образом, регулирование есть вид управления, обеспечивающий решение только этой части типовых задач управления.

Если рассматривать САУ во взаимодействии с внешней средой, в том числе и с управляющим работой этой системы персоналом, то ее обобщенную схему можно представить согласно рисунку, где ОУ – объект управления; АУУ – автоматическое управляющее устройство; ПО – персонал (оператор), управляющий работой САУ.



Обобщенная схема системы автоматического управления
во взаимодействии с внешней средой

В ряде случаев САУ входит в состав системы автоматического управления более высокого уровня, и тогда формирование целей и задач автоматического управления программно и/или аппаратно осуществляет не оператор, а автоматическая система управления более высокого уровня. При этом, по сути, такие управления при анализе процессов работы САУ нижнего уровня фактически не отличаются от управляющих воздействий со стороны обслуживающего персонала (операторов). И потому в этом плане системы автоматического и автоматизированного управления обладают общностью.

В приведенном выше рисунке использованы следующие обозначения: y – управляемые величины (переменные) в объекте управления; f_a , f_o – возмущающие воздействия со стороны внешней среды соответственно на АУУ и ОУ; u_{ij} , $i, j \in \{п, а, о\}$ – управляющие воздействия. При этом автоматическое управляющее устройство в общем случае формирует управляющее воздействие (или воздействия) $u_{ао}$ на объект управления и может так же (как в случае адаптивных систем управления) формировать управляющие воздействия $u_{аа}$ на само себя. Оператор или САУ более высокого уровня также может формировать управления и на объект управления ($u_{по}$), и на автоматическое управляющее устройство ($u_{па}$). Все перечисленные выше переменные САУ могут быть как скалярными, так и векторными величинами.

В набор y , в зависимости от назначения САУ, режима ее функционирования, могут входить величины, определяющие состояние, свойство, характеристику объекта и/или протекающий в нем процесс. Они могут быть в общем случае разделены на четыре подмножества: координатные y_k , параметрические y_p , структурные y_c и алгоритмические y_a управляемые величины, т. е. объект управления может иметь $y \in \{y_k \cup y_p \cup y_c \cup y_a\}$. Аналогично и вся совокупность возмущающих воздействий на объект управления может быть разделена на такие же подмножества. В этой связи и все множество управляющих воздействий, прикладываемых к управляемому объекту со стороны АУУ и ПО или к АУУ со стороны ПО, в зависимости от того, какими элементами вектора y они способны управлять, может быть в общем случае разделено на координатные u_k , параметрические u_p , структурные u_c и алгоритмические u_a управления.

Более того, для сложных объектов управления с $y \in \{y_k \cup y_p \cup y_c \cup y_a\}$ при математическом описании протекающих в них процессов в широко используемой на практике форме «вход–состояние–выход» фактически необходимо другое понятие «состояние» динамического объекта (а в случае описания процессов в САУ этими объектами, то и для этих систем) по сравнению с тем, которое ныне обычно используется в теории автоматического управления, восходит в первую очередь к публикациям Р. Калмана [12, 13] и характеризует, по сути, только координатное состояние.

По этой причине сложные объекты и системы автоматического управления правомерно характеризовать вектором состояния x , представляемым в виде $x \in \{x_k \cup x_p \cup x_c \cup x_a\}$, т. е. объединяющим в себе координатное x_k , параметрическое x_p , структурное x_c , и алгоритмическое x_a состояния. Подобного типа состояние может быть определено как «обобщенное состояние системы». При этом следует включать в параметрические, структурные и алгоритмические составляющие этого вектора только те величины, которые изменяются в процессе функционирования объекта и/или системы управления в соответствии с реализуемой программой их работы и прикладываемых к ним управляющих воздействий.

С учетом вышеизложенного приведем далее определения понятий координатных, параметрических, структурных и алгоритмических управлений.

При этом под *координатным управлением* далее будем понимать такое управляющее воздействие на объект, которое определяется на поле вещественных чисел, изменения которого порождают изменения лишь координатного состояния объекта.

Параметрическое управление – это такое управляющее воздействие на объект, которое сводится к изменению одного или нескольких параметров объекта, т. е. физических величин, входящих в математической модели объекта в ее параметры. Параметрическое управление также определяется на поле вещественных (но возможно и комплексных) чисел.

Алгоритмическим управлением будем называть такое управляющее воздействие на объект, при котором, если оно прикладывается в состоянии покоя ОУ, изменяется лишь алгоритм функционирования переалгоритмизируемой части последнего. Оно может целенаправленно изменяться не только в состоянии покоя объекта управления, но и в других его установившихся динамических и переходных режимах. Примером такого управления является процесс смены программ в станках с числовым программным управлением, в манипуляционных роботах, в гибких автоматизированных и автоматических комплексах.

Структурным управлением будем далее называть такое управляющее воздействие на объект, которое непосредственно приводит к изменению хотя бы одной структурной связи между элементами (устройствами) внутри объекта управления или какой-либо его части с внешней средой. Подобное управление чаще всего используют для смены режимов функционирования ОУ, их реконфигурации при отказах отдельных элементов с целью поддержания объекта в работоспособном состоянии.

Используемые в САУ управляющие воздействия (управления) определяют класс этих систем. В частности, они относятся к системам с координатным, параметрическим, структурным, алгоритмическим, координатно-параметрическим, координатно-структурным, структурно-алгоритмическим или к другим подобным управлениям.

Принципиально важной особенностью САУ является их принадлежность к многорежимным динамическим системам. Причем чем сложнее объект управления, тем большей, как правило, мощностью характеризуется множество режимов функционирования его САУ. В учебных пособиях и монографиях по теории автоматического управления этому факту часто не уделяется должного внимания. В то же время в инженерной практике при синтезе САУ это обстоятельство является, безусловно, существенным и требует учета при выборе их структур, набора управляющих воздействий, алгоритмической и аппаратной реализации. Именно по этой причине многие САУ в итоге реализуются как системы с ИРВУ.

В каждой конкретной САУ (САР) обеспечивающие всю совокупность управляемых режимов работы системы управления u_{ao} , u_{aa} , u_{na} , u_{no} представляют собой наборы из u_k , u_p , u_c , u_a , фиксированные по типу и числу входящих в них составляющих. При этом множества u_{no} и u_{aa} могут быть и пустыми. Управляемые переменные объекта управления также могут быть из числа координатных, параметрических, структурных и/или алгоритмических. И при этом они могут отличаться в разных режимах работы САУ. Примером тому может быть САУ транспортным роботом (ТР), работающим в составе гибкого автоматического или автоматизированного производственного комплекса. В режиме позиционирования на постах загрузки и разгрузки управляемыми переменными ТР являются координаты его ориентации и местоположения в рабочем пространстве, а в режиме перемещения между позициями загрузки и разгрузки – скорость перемещения и положение относительно заданной траектории движения. В первом случае САУ должна обеспечивать терминальное управление транспортным роботом, а во втором – одновременно и стабилизацию, и слежение.

В связи с тем, что класс систем автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления еще недостаточно изучен и определен, введем формализованное определение объектов и систем автоматического управления этого типа (с ИРВУ).

Введем следующие обозначения: пусть M – мощность множества штатных режимов рассматриваемой САУ; R_i , $i \in \overline{1, M}$ – i -й штатный режим системы; y^i – вектор управляемых переменных состояния ОУ в i -м режиме; u_{ao}^i , u_{aa}^i – векторы используемых в САУ управлений в ее i -м режиме (см. рисунок).

В таком случае систему автоматического управления или регулирования будем называть *системой с избыточной размерностью вектора управления* в режиме R_i , если

$$\dim \left[\left(u_{ao}^i \right)^T, \left(u_{aa}^i \right)^T \right]^T > \dim y^i,$$

или по всей совокупности штатных режимов, если

$$\dim \left[\left(u_{ao} \right)^T, \left(u_{aa} \right)^T \right]^T > \dim y,$$

где

$$y = \bigcup_{i=1}^M y^i; \quad u_{ao} = \bigcup_{i=1}^M u_{ao}^i; \quad u_{aa} = \bigcup_{i=1}^M u_{aa}^i.$$

По аналогии можно говорить, что объект управления имеет избыточную размерность вектора управления в режиме R_i , если

$$\dim \left[\left(u_{ao}^i \right)^T, \left(u_{no}^i \right)^T \right]^T > \dim y^i,$$

или по всей совокупности режимов и переходов между ними, если

$$\dim \left[\left(u_{ao} \right)^T, \left(u_{no} \right)^T \right]^T > \dim y.$$

Здесь дополнительно к ранее введенным обозначениям использовано

$$u_{no} \triangleq \bigcup_{i=1}^M u_{no}^i.$$

Таким образом, избыточность в размерности вектора управления далеко не всегда является избыточностью в том смысле, что в рассматриваемом объекте или системе используется лишнее число управляющих воздействий. Она лишь отражает факт задействования в объекте или системе в отдельных режимах их функционирования или во всей их совокупности управляющих воздействий, превышающих по численности совокупность управляемых (целенаправленно изменяемых) в них величин.

2. ЦЕЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В САУ УПРАВЛЕНИЙ ИЗБЫТОЧНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Изучение объектов живой природы, где избыточность используется в самых различных ее проявлениях и обуславливает повышенные адаптационные возможности, живучесть использующих ее индивидуумов, дает возможность сформулировать те цели, для достижения которых может использоваться избыточность в технических системах, в частности в системах автоматического управления, а также те принципы, на которых они могут реализовываться.

Заметим, что проблеме всестороннего анализа возможностей, которые дает разработчикам САУ введение в создаваемые ими системы различных типов избыточности, до сих пор, на наш взгляд, не уделялось должного внимания. Отсутствуют и систематизированные практические рекомендации на этот счет (пожалуй, лишь за исключением рекомендаций по использованию аппаратной избыточности для повышения надежности систем). Практически нет подобного систематизированного анализа, соответствующих рекомендаций и применительно к другим техническим объектам.

Перечислим те основные цели, для достижения которых в системах автоматического управления могут использоваться управления с ИРВУ.

1. *Обеспечение управления выходами объекта, зависящими от мультипликативно связанных управляющих входов.* В подобных ситуациях даже при одномерном выходе ОУ без использования управлений с избыточностью по размерности их общего вектора обеспечить целенаправленное управление выходом принципиально невозможно. Примером подобных объектов управления могут служить, в частности, электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением от электрической сети.

2. *Расширение функциональных возможностей управляемых объектов.* Подобная цель преследуется, например, при перепрограммировании робототехнических комплексов, многооперационных станков и другого технологического оборудования в составе гибких производственных комплексов при обеспечении их работы в автоматическом режиме.

3. *Целенаправленное изменение фундаментальных свойств, характеризующих управляемый объект* как таковой, прежде всего его автономизируемости, управляемости [14, 15], каузальности [16, 17], которая определяет не только структуру вход-выходных отображений в объекте управления, но и его быстроедействие, маневренность [18], функциональную воспроизводимость [16], т. е. класс реализуемых управляемых переменных в объекте, что особенно значимо для следящих систем и систем программного управления.

4. *Увеличение областей достижимости в пространстве состояний или выхода объекта* [7, 14, 15]. Эта цель, в частности, преследуется часто в электроприводах с двигателями постоянного тока независимого возбуждения, сводится к расширению диапазона изменения их регулируемой скорости вращения и достигается за счет управления уровнем напряжения не только якорной цепи, но и цепи возбуждения.

5. *Обеспечение обхода запретных областей в пространстве состояний или выхода объекта управления.* В частности, для манипуляционных роботов эта цель актуальна в ситуациях, когда они должны работать в среде, где расположены другие объекты.

6. *Уменьшение влияния нежелательных свойств объекта управления на качество процесса управления.* Примером подобного использования управлений с ИРВУ является двухдвигательный привод звеньев манипуляторов с целью уменьшения влияния люфтов в его механических передачах [19].

7. *Обеспечение необходимого множества режимов функционирования объекта и системы управления в целом, возможности перемены цели и решения большего числа задач объектом управления* в процессе приспособления его к окружающей среде и изменения общих задач функционирования систем более высоких уровней иерархии по отношению к данной системе.

8. *Обеспечение желаемого характера протекания процесса в САУ*, например, скользящего режима, как это часто реализуется в системах с переменной структурой [20].

9. *Придание САУ адаптационных свойств* и на этой основе снижение влияния нестационарности свойств объекта управления и воздействий внешней среды на него и систему в целом.

10. *Улучшение, в том числе оптимизация, показателей качества управляемого процесса*, в частности быстродействия, расхода энергоресурсов; создание предпосылок для достижения инвариантности или ковариантности выходов системы относительно ее входов.

11. *Автономизация одновременно протекающих в объекте управления процессов*. При подобном требовании к управлению избыточность в векторе управляющих воздействий может оказаться тем средством, которое создает необходимые для этого условия.

12. *Идентификация объекта управления и/или отдельных частей управляющего устройства*. В ряде случаев это может быть вспомогательной целью при адаптации или оптимизации процессов в системе либо может быть самостоятельной целью, если управление объектом проводится одновременно с исследованием его свойств.

13. *Повышение надежности системы автоматического управления* путем горячего, теплого или холодного резервирования управляющих воздействий на объект.

14. *Повышение живучести объекта и системы автоматического управления в целом* при нерегламентированных воздействиях на них внешней среды и выходах из строя элементов системы.

Приведенный здесь перечень целей использования в САУ управлений избыточной в указанном смысле размерности, скорее всего, не полный. Однако даже он свидетельствует о довольно большом количестве значимых для практики полезных эффектов, которые могут быть обеспечены за счет использования ИРВУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Такие классы систем автоматического управления, как самонастраивающиеся, адаптивные, системы с дуальным управлением, с переменной структурой, с резервированием, чаще всего представляют собой системы автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления относительно вектора управляемых переменных в отдельных режимах работы САУ или какой-либо их совокупности. Во многих случаях (но не всегда) в этих системах задействованы сочетания из координатных, параметрических, структурных и/или алгоритмических управляющих воздействий, управляемых выходов и/или возмущений. По этой причине для математического описания процессов в подобных системах целесообразно использовать и расширенное толкование понятия «состояние системы» как совокупности координатных, параметрических, структурных и алгоритмических переменных. Такое пространство в статье предложено называть «обобщенным пространством состояний» динамического объекта и/или системы автоматического управления. Оно может включать одновременно и вещественные переменные для описания координатных и параметрических переменных, и логические переменные для описания структурных и алгоритмических переменных. В последнем случае описываемая САУ относится к логико-динамическим.

За счет реализации систем автоматического управления с ИРВУ, как было показано выше, удастся достигать очень важных в практическом плане эффектов. Именно по этой причине чем сложнее и ответственнее объект управления, тем с большей вероятностью можно утверждать, что создаваемая для него САУ будет системой с избыточной размерностью вектора управления. В частности, для осуществления новых видов маневров самолетов и вертолетов предлагается и в дальнейшем создавать их с системами управления с избыточным числом органов управления [21]. В этой связи развитие теории систем автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления, связанной, прежде всего, с типизацией математических моделей, разработкой методов синтеза и анализа для такого класса систем, является актуальной задачей в теории автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lewis F.L., Vrabie D., Syrmos V.L. Optimal Control. – 3 ed. – Hoboken: Wiley, 2012. – 552 p.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т. / под общ. ред. К.А. Пупкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – (Методы теории автоматического управления: цикл учебников и учебных пособий).
3. Афанасьев В.Н. Оптимальные системы управления. Аналитическое конструирование. – М.: Изд-во физ. фак. МГУ, 2011. – 170 с.
4. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2008. – 244 с.
5. Tyukin I. Adaptation in dynamical systems. – New York: Cambridge University Press, 2011. – 428 p.
6. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново: ИГЭУ, 2006. – 255 с.
7. Малышенко А.М. Системы автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2005. – 302 с.
8. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования: кн. 1: Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. – 770 с.
9. Теория управления. Терминология / отв. ред. Б.Г. Волик. – М.: Наука, 1988. – 56 с. – (Сборники рекомендуемых терминов / АН СССР. Институт проблем управления; вып. 107).
10. The control handbook: in 2 vol. / ed. by W.S. Levine. – 2nd ed. – New York: CRC Press, IEEE Press, 2010. – 1566 p.
11. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern control systems: Textbook & instructor's solution manual. – 12th ed. – London: Prentice Hall, 2011. – 832 p.
12. Калман Р.Е. Об общей теории систем управления // Теория дискретных, оптимальных и самонастраивающихся систем: труды 1 Международного конгресса ИФАК по автоматическому управлению. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – Т. 2. – С. 521–547.
13. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем: пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 398 с.
14. Sontag E.D. Mathematical control theory. Deterministic finite dimensional systems. – 2nd ed. – New York: Springer, 1998. – 544 p.
15. Стрейтц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления. – М.: Наука, 1985. – 296 с.
16. Малышенко А.М. Индексы каузальности динамических систем и их использование в схмотехническом проектировании и при оценке функциональной воспроизводимости систем автоматического управления // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 5. – С. 37–43.
17. Малышенко А.М. Определение индексов каузальности вход-выходных нелинейных динамических систем // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 3 (56). – С. 37–47.
18. Малышенко А.М. Маневренность управляемых динамических систем и ее квалиметрия // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 5. – С. 2–6.
19. Петров Б.А. Манипуляторы. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 238 с.
20. Теория систем с переменной структурой / под ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592 с.
21. Агеев А.М., Сизых В.Н. Синтез оптимальных регуляторов системы управления самолетом через решение обратной задачи АКОВ // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 3 (56). – С. 7–22.

Малышенко Александр Максимович, доктор технических наук, профессор, действительный член Международной академии высшей школы и Академии электротехнических наук Российской Федерации, профессор кафедры интегрированных компьютерных систем управления Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основные направления научных исследований – теория автоматического управления, управление подвижными объектами, мехатроника и робототехника. Имеет более 250 публикаций, в том числе 11 монографий и учебных пособий. E-mail: mam@tpu.ru.

Automatic Control System with Redundant Dimensions of Vector Control: Definition and Application*

A.M. MALYSHENKO

National Research Tomsk Polytechnic University. 30 Lenin Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation, D. Sc.(Eng.), professor, integrated computer control systems department. E-mail: mam@tpu.ru

The article is concerned with the definition of the category of automatic control systems that have the number of control actions exceeding the number of controlled variables in any mode or any combinations of modes. In particular, adaptive systems, systems with dual control or a variable structure, fault-tolerant systems and systems with redundancy can be attributed to this category. A lot of modern aircraft, robots with kinematic redundancy, processing units/stations and chemical production complexes possess these very automatic control systems. The definition of control as a purposeful change of states, properties, characteristics and/or processes in a control plant is provided by the author. The concepts of incoordinate, parametric, structural and algorithmic control actions, disturbing effects and controlled variables

* Received 17 November 2014.

in automatic control systems are introduced. Further typical tasks of control are systematized and the tasks relating to regulation are specified. This systematization is especially important for educational publications in the automatic control theory. Fourteen possible purposes of using the given redundancy including purposeful changes of fundamental properties of plants and systems of automatic control are listed in the article.

Keywords: plant; automatic control system; model management tasks; coordinate, parametric, structural and algorithmic variables of the system; excessive dimensions of vector management, use of redundancy for vector control, fundamental properties of managed objects and systems

REFERENCES

1. Lewis F.L., Vrabie D., Syrmos V.L. Optimal Control. 3 ed. Hoboken, Wiley, 2012. 552 p.
2. Pupkov K.A., ed. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya* [The methods of classical and modern automatic control theory]: in 5 vol. 2nd ed. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004.
3. Afanas'ev V.N. *Optimal'nye sistemy upravleniya. Analiticheskoe konstruirovaniye* [Optimal control systems. Analytical design]. Moscow, Publisher of Physics Faculty MSU, 2011. 170 p.
4. Antonov V.N., Terekhov V.A., Tyukin I.Yu. *Adaptivnoye upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh* [Adaptive control in the technical systems]. St-Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2008. 244 p.
5. Tyukin I. Adaptation in Dynamical Systems. New York, Cambridge University Press, 2011. 428 p.
6. Tyutikov V.V., Tararykin S.V. *Robustnoe modal'noye upravlenie tekhnologicheskimi ob"ektami* [Robust modal control of the technological plants]. Ivanovo, ISPU Publ., 2006. 255 p.
7. Malysenko A.M. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s izbytochnoi razmernost'yu vektora upravleniya* [Automatic control systems with redundant dimension of control vector]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2005. 302 p.
8. Solodovnikov V.V., ed. *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya: kn. 1: Matematicheskoe opisanie, analiz ustoychivosti i kachestva sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Technical Cybernetics. Theory of automatic control. Book 1. Mathematical description and analysis of the sustainability and quality of automatic control systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 770 p.
9. Volik B.G., ed. *Teoriya upravleniya. Terminologiya*. Vyp. 107 [Control theory. Terminology. Iss. 107]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 56 p.
10. Levine W.S., ed. The control handbook. In 2 vol. 2nd ed. New York, CRC Press, IEEE Press, 2010. 1566 p.
11. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern control systems. Instructor's Solution Manual. 12th ed. London, Prentice Hall, 2011. 832 p.
12. Kalman R.E. [On the general theory of control systems]. *Trudy 1 Mezhdunarodnogo kongressa IFAC po avtomaticheskomu upravleniyu "Teoriya diskretnykh, optimal'nykh i samonastroyayushchikhsya sistem"* [Proceedings of the first International Congress on Automatic Control IFAC "Theory of discrete-time, optimal and self-adjusting systems"]. Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of SSSR. 1961, vol. 2, pp. 521–547.
13. Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A. *Topics in mathematical system theory*. 2nd ed., ster. New York, McGraw Hill, 1969. (Russ. ed.: Kalman R., Falb P., Arbib M. *Ocherki po matematicheskoi teorii sistem*. Moscow, Mir Publ., 1971. 398 p.).
14. Sontag E.D. Mathematical control theory. Deterministic finite dimensional systems. 2nd ed. New York, Springer, 1998. 544 p.
15. Strejc V. *State space theory of discrete linear control*. New York, Academia Prague and John Wiley, 1981. (Russ. ed.: Streits V. *Metod prostranstva sostoyanii v teorii diskretnykh lineinykh sistem upravleniya*. Moscow, Nauka Publ., 1985. 296 p.).
16. Malysenko A.M. Indeksy kauzal'nosti dinamicheskikh sistem i ikh ispol'zovanie v skhemotekhnicheskome proektirovanii i pri otsenke funktsional'noi vosproizvodimosti sistem avtomaticheskogo upravleniya [Dynamic systems causality indices and their use in schematic design and in functional reproducibility assessment of automatic control systems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 37–44.
17. Malysenko A.M. Opredelenie indeksov kauzal'nosti vkhod-vykhodnykh nelineinykh dinamicheskikh sistem [Definition of causality indexes of input-output nonlinear dynamic systems]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2014, no. 3 (56), pp. 37–47.
18. Malysenko A.M. Manevrennost' upravlyayemykh dinamicheskikh sistem i ee kvalimetriya [Maneuverability of control dynamic systems and his measuring]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, automation, control*, 2005, no. 5, pp. 2–6.
19. Petrov B.A. *Manipulyatory* [Manipulators]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1984. 238 p.
20. Emel'yanov S.V., ed. *Teoriya sistem s peremennoi strukturoi* [Theory of variable structure systems]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 592 p.
21. Ageev A.M., Sizykh V.N. Sintez optimal'nykh regulyatorov sistemy upravleniya samoletom cherez reshenie obratnoi zadachi AKOR [The flight control system optimal regulators synthesis through the solution of the inverse ACOR problem]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2014, no. 3 (56), pp. 7–22.