

О проектировании многоканальных систем автоматического управления

В.А. Жмудь^{1,2,3,4}

¹ Новосибирский государственный технический университет, Россия

² Институт лазерной физики СО РАН, Россия

³ Сибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы СО РАН

⁴ АО «Новосибирский институт программных систем»

Аннотация. Теория автоматического управления содержит множество специальных терминов и определений. Произвольное использование сложившихся терминов в ином смысле, обоснованное введение новых терминов или обоснованное расширение сложившихся понятий на первый взгляд является безобидным действием. Но по сути такие методы позволяют формировать новые защищаемые положения и приписывать себе новейшие достижения следующими способами: во-первых, называя известные понятия новыми терминами, можно утверждать о достижении результатов, которые по-новому звучат в новой терминологии; во-вторых, такое необоснованное переименование позволяет утверждать о достижении таких результатов, которые в случае корректного использования терминологии не были ещё достигнуты, либо даже являются принципиально недостижимыми. За чистоту терминологии, таким образом, столь же важно бороться, как за чистоту науки в целом. Данная статья предназначена для студентов, аспирантов и молодых ученых, выполняющих исследования в области теории автоматического управления или с применением этой теории.

Ключевые слова: Многоканальные системы управления, MIMO, MISO, SIMO, управление, стабилизация

ВВЕДЕНИЕ

«Моё дело сказать правду, а не заставлять верить в неё»

Ж. Ж. Руссо

В данной статье автор рискнул поднять вопрос о самых элементарных понятиях теории автоматического управления (ТАУ) с целью очищения этих понятий от необоснованных притязаний на решение нерешаемых задач и на достижение принципиально недостижимых целей. Любая терминология позволяет некоторые девиации, подобно тому, как некоторые слова в любом языке со временем утрачивают свой первоначальный смысл и приобретают другой. Иногда изменения столь сильны, что диву даёшься. Например, слово «наверное» раньше означало «достоверно», «наверняка» а теперь означает «не достоверно», «возможно, но не точно». В теории автоматического управления есть свои термины, которые крайне нежелательно разрешать перетолковывать по-своему каждому новому соискателю. Так если имеется понятие «многоканальный объект» или «вход объекта», «выход объекта», то произвольное толкование таких понятий может позволить приписывать себе такие достижения, которые вообще невозможны принципиально. Согласиться с подобными расширениями уже никак нельзя. Можно сказать, что для любого бессудства должны быть всё-таки какие-то пределы.

Кроме того, вследствие необходимости осуществления преподавательского процесса в области ТАУ, мы не можем допустить обоснованного внедрения необоснованных

терминов, которые вследствие амбиций и некоторых организационных возможностей научных руководителей подобных соискателей даже закрепляются справками о внедрении результатов в учебный процесс. Действительно, если преподаватель читает предмет, имеющий отношение к области исследования его аспиранта, он может подготовить справку от своего имени о том, что полученные результаты внедрены в учебный процесс, в частности, утверждая, что он сам пользуется ими при чтении лекций. Никакой заведующий кафедрой или декан, и тем более кто-то иной в руководстве не сможет отрицать подобного утверждения, поскольку для проверки его пришлось бы внимательно изучать читаемый курс и сопоставлять его с прежним вариантом. При наличии подобных справок и высокорейтинговых публикаций любое утверждение (вне зависимости от его справедливости) постепенно приобретает оттенок научно установленной истины, достижения, принадлежащего данной научной школе. А выпускники такой научной школы, получив звания кандидатов наук, далее имеют право давать отзывы и рецензии, поддерживать наслоение новых тезисов, не проверенных практикой, не доказанных, не обоснованных, но опубликованных вследствие достижения статьями требований мимикрии, то есть подобия научным статьям по внешнему виду. Этот разлагающий процесс, похоже, коснулся ТАУ, что беспокоит автора данной статьи как специалиста, которому ТАУ дало всё – и работу, и хобби, и понимание сложной картины мира во многих аспектах её сложности. Если сегодня мы согласимся с возможностью решения одной

нерешаемой задачи, завтра придётся согласиться с возможностью решения другой нерешаемой задачи, и вскоре вся эта наука (по меньшей мере в рамках отдельно взятой научной школы) превратится в фарс, в фейк, в насмешку над здравым смыслом.

Поэтому мы попробуем разобраться с тем, что такое многоканальные объекты управления, чем они отличаются от одноканальных, как необходимо осуществлять подсчет каналов управления, и что из этого следует.

1. ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многоканальными (многомерными, многосвязными) объектами управления называют только такие объекты, которые имеют более одного входа и более одного выхода, и при этом обязательно имеется влияние более чем одного входа на более чем один выход.

В англоязычной литературе используются следующие термины: *SISO* – один вход и один выход (*single inputs single outputs*), *MIMO* – много входов и много выходов (*many inputs many outputs*).

При большом желании создать новую терминологию (и видимость новых научных достижений) можно дополнить эту классификацию промежуточными вариантами, например, *SIMO* и *MISO*, где, как легко догадаться, в первом случае имеется в виду один вход и много выходов, а во втором случае – много входов и один выход. Большого смысла в этой терминологии не усматривается. Также для любителей создавать новые термины большое поле деятельности даёт фантазия о несовпадении количества входов и выходов для случая *MIMO*, а указанные примеры *SIMO* и *MISO* являются частным случаем этого класса объектов.

Отметим, что несовпадение количества входов и выходов вполне часто может встречаться в технических системах, и при этом такое несовпадение может иметь свой существенный смысл, однако, как правило, количество входов и выходов все же совпадает.

Чтобы избежать путаницы, полезно определиться с терминологией, что именно называют входами и выходами объекта.

Главное – это понимать, что входы – это наши возможности по управлению объектом, а выходы – это задачи, стоящие перед нами.

Если у объекта один вход и один выход, это означает, что перед проектировщиком ставится задача управления единственной выходной величиной, и для этого в его распоряжении имеется единственная входная величина, которая оказывает влияние на указанную выходную величину.

Если количество входов совпадает с количеством выходов, это наиболее распространённая задача управления

многоканальным объектом, т. е. задача создания многоканальной системы управления.

Целью управления в таком случае является достижение по возможности наиболее точной прямой зависимости каждого выхода объекта от соответствующего входа системы.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОНЯТИЯ «ВХОД ОБЪЕКТА»

Вход системы отличается от входа объекта. Вход системы – это вход того сигнала, который предписывает соответствующему выходу быть равным по величине этому сигналу. Например, если вход номер два изменил своё значение с нуля на единицу, это означает, что мы требуем от объекта, чтобы его второй выходной сигнал, который принимал в этот момент нулевое значение, изменился бы на единичное значение. Между входами системы и входами объекта мы располагаем регулятор, который преобразует эти входные сигналы задания (т. е. предписанных значений) в сигналы управления (т. е. в сигналы, воздействующие на объект, которые как раз и подаются на входы объекта). В любом регуляторе используются также знания о фактическом состоянии выходов объекта, для этих целей служит обратная связь.

Для примера на *Рис. 1* показано графическое представление объекта управления, принятое в теории автоматического управления. На *Рис. 2* показано графическое представление двухканального объекта управления.

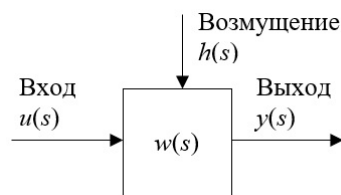


Рис. 1. Графическое представление объекта управления, принятое в теории автоматического управления: $w(s)$ – передаточная функция объекта

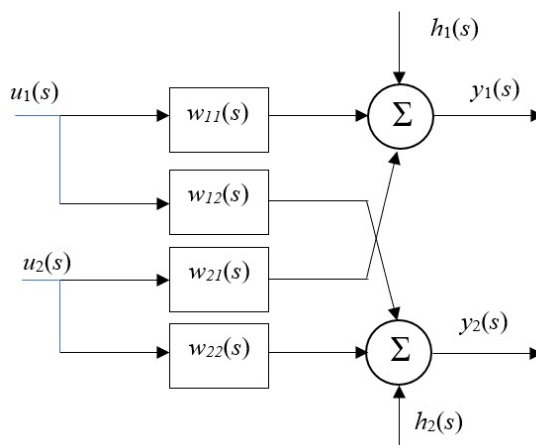


Рис. 2. Графическое представление двухканального объекта управления

В двухканальном объекте присутствует влияние каждого входа на каждый выход, что иллюстрируется соответствующими связями с передаточными функциями. Также на каждый выход прикладывается помеха. Безусловно, помеха может действовать в любой точке объекта, в том числе несколько помех могут действовать в нескольких местах. Но всё совокупное действие всех помех можно отобразить как добавление результата действия всех этих помех к выходу как совокупной помехи, что и отражено на *Рис. 2*.

Чем больше входов, тем больше возможностей воздействовать на объект. Проблемы «лишних входов» никогда не возникает, поскольку дополнительные возможности не могут, во всяком случае, мешать.

На *Рис. 4* показано графическое представление объекта управления размерностью 3×2 (три входа и два выхода). Если мы хотим с помощью трех сигналов получать какие угодно результаты на двух выходах, такая задача легко выполнима. Поэтому объект, у которого выходов больше, чем входов, может быть полностью управляемым, трудностей с его управлением никаких не возникает.

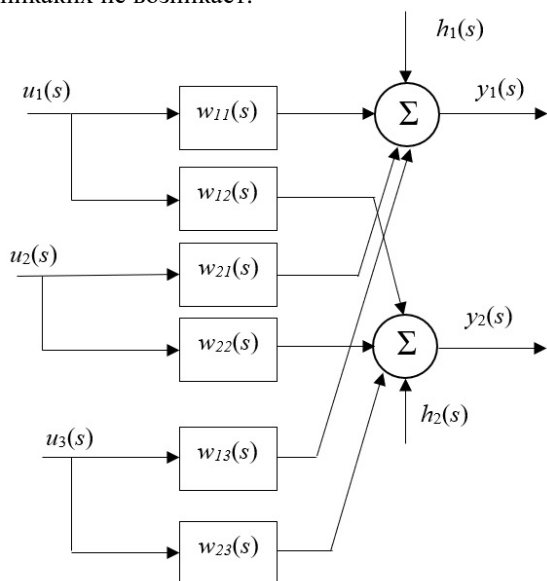


Рис. 3. Графическое представление объекта управления размерностью 3×2 (три входа и два выхода)

Разработчик всегда имеет право не использовать те входы, которые ему не нужны. Поэтому добавление количества входов, как минимум, не усложняет задачу управления. Они могут давать дополнительные возможности, и в этом случае задача управления упрощается (это не значит, что её решение чисто математически упрощается, это означает, что если разработчик в полной мере владеет методами проектирования, то он может извлечь из дополнительных входов пользу, а если не владеет, то, по

меньшей мере, может выбрать наилучшие входы, а остальные игнорировать).

Таким образом, превышение количества входов над количеством выходов, как минимум, не хуже полного равенства количества входов и выходов.

Поэтому постановка задачи управления объектом при количестве входов больше, чем количество выходов, не является чем-то революционным, новым, актуальным [1]. Подобная задача может решаться только в связке с задачей получения лучших результатов, нежели могут быть получены при равенстве входов и выходов, в этом случае решение такой задачи представляет научный и практический интерес [2].

Вход – это сокращенное название подразумеваемого более полного названия «Вход сигнала, влияющих на выходные сигналы объекта». Имеется в виду, что на любой из таких входов имеется техническая возможность подавать сигнал, не зависимо от того, что подаётся на другие входы. Сигналом, как правило, является электрический сигнал, то это не обязательно, может использоваться воздействие любой физической величиной, например, давление в поршне пневматического устройства, тепло, выделяемое нагревателем, и так далее. Как правило, наиболее легко понимаемые примеры связаны с подачей определенных напряжений на какое-либо устройство. Напряжения поступают через разъемы. Если на переднюю панель устройства добавить несколько дополнительных разъемов и соединить их со входами каких-либо других входов, это не добавит количество входов для управления объектов. Также если, например, на входе объекта установить суммирующий усилитель, таким образом, что прежний входной сигнал станет формироваться как сумма двух других сигналов, это увеличит количество возможных подаваемых сигналов на объект, но это не увеличит количество входов объекта.

Допустим, объект имеет передаточную функцию

$$W_1(s) = \frac{K}{1+Ts}, \quad (1)$$

где K – коэффициент усиления, T – постоянная времени, s – оператор преобразования Лапласа. Это одна из форм записи дифференциального уравнения, связывающего входную величину $x(t)$ и выходную величину $y(t)$.

Поскольку передаточная функция – это отношение изображения выходной величины к изображению входной величины,

$$W_1(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}, \quad (2)$$

то из (1) и (2) легко выводится соотношение

$$\frac{K}{1+Ts} = \frac{Y(s)}{X(s)}. \quad (3)$$

Из этого следует

$$KX(s) = (1 + Ts)Y(s). \quad (4)$$

Это уравнение преобразуется из операторной форму в форму во временной области следующим образом:

$$Kx(t) = y(t) + T \frac{dy(t)}{dt}. \quad (5)$$

Если мы введём суммирующий усилитель, фактически, мы введём две новые величины $x_1(t)$ и $x_2(t)$, и прежнюю величину определим как сумму этих новых,

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t), \quad (6)$$

то это ничего не даёт нового, не прибавляет никаких возможностей по управлению этим объектом. Мы и без такого нововведения используем метод формирования управляющего воздействия, который допускает суммирование сигналов, а также их интегрирование, дифференцирование и другие виды преобразований.

Устройство, которое осуществляет преобразование измеренной ошибки управления в управляющий сигнал, далее подаваемый на объект, называется регулятором. Регулятор может иметь много входов, но сколько бы входов он ни имел, количество входов объекта управления определяется именно количеством входов объекта, на которые мы можем подавать сигналы независимо друг от друга (это не запрещает нам вводить какую-либо зависимость этих сигналов от чего бы то ни было). Эти входы должны по-разному влиять на поведение объекта, то есть на его выходные сигналы. Например, если имеется несколько линейных входов, которые абсолютно одинаково влияют на все выходы объекта, это не добавляет нам возможностей по управлению таким объектом, поскольку любой результат, который может быть получен подачей разных сигналов на эти входы, может быть столь же успешно получен путем подачи суммы этих сигналов на любой из этих входов. Если имеются входы, влияние которых отличается только коэффициентом усиления, и более ничем, то в случае линейного объекта это также не добавляет возможностей управления объектом, поскольку можно вместо подачи сигналов на эти разные входы осуществить подачу на единственный вход суммы этих сигналов с соответствующими коэффициентами.

3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОНЯТИЯ «ВЫХОД ОБЪЕКТА»

Выходом объекта управления называют только такую его выходную величину, в отношении которой ставится задача независимого управления ей, то есть по возможности эта величина должна повторять предписание, и не зависеть от каких-либо иных факторов или сигналов. Выход – это задача. Если у объекта два выхода, следовательно, приходится решать одновременно две задачи управления. Чем больше выходов, тем сложнее задача. Никогда проектировщик не может попросту игнори-

ровать какое-то количество выходов, потому что **выходы, которые допустимо игнорировать, выходами не являются.**

Например, если мы хотим управлять скоростью движения трамвая на участке без развилки, у нас, по сути, имеется лишь одна выходная величина, именно скорость его движения. При этом мы, разумеется, управляем и перемещением трамвая, поскольку перемещение есть интеграл от скорости. Разумеется, мы управляем и ускорением трамвая, так как ускорение – это производная от скорости. Если скорость изменяется в точности по предписанному закону, следовательно, и ускорение изменяется так, как оно изменяется в этом предписанном законе, и перемещение также. Мы не можем, например, потребовать, чтобы скорость трамвая была ненулевой, а перемещение не изменялось, это невозможно. Соответственно, мы не можем потребовать, чтобы перемещение изменялось, а скорость была нулевой. Эти величины связаны между собой, поэтому принято говорить об одной величине и о её производных (или реже о её интегралах). Если самая старшая производная выходной величины изменяется строго так, как ей это предписано, то и младшие производные изменяются так, как это предписано, поскольку все эти сигналы взаимосвязаны. Выходная величина в совокупности с её производными всё равно остаётся выходной величиной, единственной, а не многими величинами. В скалярных системах, то есть в системах с одним входом и одним выходом, также говорят о векторе состояний объекта, имея в виду вектор выходной величины и всех её производных, от первой до самой старшей (а ещё более старшие производные при этом не рассматриваются, поскольку они пренебрежимо малы).

Можно сколько угодно выдумывать промежуточные сигналы или величины путем включения в этот перечень производных, или интегралов от фактических выходных величин, или, например, используя делитель или усилитель, можно получить другие прообразы выходной величины. Если использовать несколько различных датчиков выходной величины, можно получить разные оценки этой величины, причем, если эти датчики в разных частотных областях при этом имеют различные преимущества, такое использование весьма эффективно, оно оправдано. Но это не превращает объект в объект с большим количеством выходных величин, чем их было исходно. Если нам требуется управлять единственной выходной величиной, сколько бы датчиков этой величины мы не применяли, объект всё равно останется скалярным, то есть объектом с одним выходом.

Количество выходов всегда должно быть, как минимум, не больше количества независимых явно входов. Если выходов больше, тогда

мы не можем управлять ими всеми. Естественно, нам остаётся либо отказаться от решения этой задачи как нерешаемой, либо заранее установить, что какими-то определенными лишними выходами мы управлять не будем, и просто понадеемся, что их значения этих выходных сигналов (состояний) будет оставаться в пределах допустимых. Других вариантов просто нет.

Понятие, например, «три выхода» заключает в себе постановку задачи таким образом, чтобы мы могли **независимо изменять состояние каждого из этих выходов**. Например, мы можем потребовать, чтобы какой-то из выходов принял единичное значение, а остальные оставались равными нулю, после этого мы можем потребовать это в отношении другого выхода, а все прочие установить в ноль, включая тот, который ранее был установлен в единичное состояние, и так далее. **Каждый выход должен управляться автономно**, вне зависимости от того, что устанавливается на других выходах.

На *Рис. 4* показано графическое представление объекта управления размерностью 2×3 (два входа и три выхода). Если мы хотим с помощью только двух сигналов получать какие угодно результаты на трёх выходах, такая задача невыполнима. Поэтому объект, у которого выходов больше, чем входов, не может быть полностью управляемым.

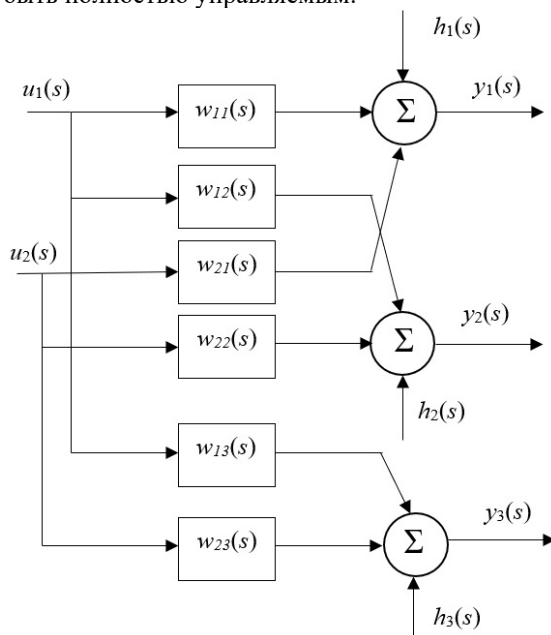


Рис. 4. Графическое представление объекта управления размерностью 2×3 (два входа и три выхода)

Если один из «выходов», например, является производной от другого «выхода», это означает, что данные два «выхода» названы выходами неправомерно, ведь в этом случае мы не можем произвольно и автономно устанавливать различные значения на этих двух «выходах», так что это не выходы. Пример такого объекта

показан на *Рис. 5*. По внешним признакам кажется, что у этого объекта три выхода, на самом деле у него только два выхода. Между сигналами, обозначенными как $y_2(s)$ и $y_3(s)$ существует явная связь, один из них, $y_3(s)$, является интегралом от другого, т. е. от сигнала $y_2(s)$. Интегратор обозначается как $1/s$. Они связаны между собой, следовательно, управляя одним выходом, мы управляем также и другим выходом, но не произвольно, а так, как это получается вследствие управления другим зависимым выходом.

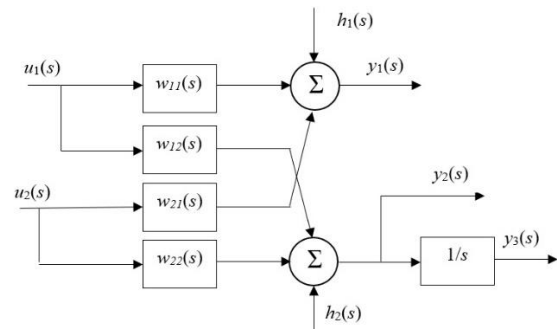


Рис. 5. Пример объекта управления размерностью 2×2 (два входа и два выхода) несмотря на кажущееся наличие третьего выхода, который на самом деле выходом не является

Если мы можем изменять у объекта не только его выходную величину, но и скорость её изменения, то этот объект является объектом с предоставлением возможности измерения промежуточных сигналов в нём, эти промежуточные сигналы не являются дополнительными выходами, так как наличие этих выходных сигналов не ставит дополнительной задачи управления ими отдельно от управления основным выходом.

Если же задача ставится именно так (т.е. независимое, автономное управление каждым выходом), то она будет не решаемой.

Можно сказать классический пример объекта с двумя входами и двумя выходами – это бассейн, у которого имеется постоянный слив воды и который наполняется горячей и холодной водой из двух труб. Если стоит задача управления уровнем и температурой воды, мы имеем два входа – расход горячей воды и расход холодной воды, и два выхода – уровень воды и температура воды. Ни один из этих входов не позволяет сам по себе автономно управлять лишь одним из выходов, оба они влияют на оба выхода совместно. Но если мы для изменения температуры будем изменять разность расхода горячей и холодной воды (вращать вентили в противоположные стороны), а для изменения уровня будем изменять одинаковое приращение расхода воды в каждой трубе (будем вращать вентили в одинаковую сторону), то задача легко может быть решена. Итак, два входа достаточны для управления двумя выходами. Мы могли бы

отказаться от управления одним из выходов, оставив только использование одного входа только ценой потери контроля над одним из выходов. Например, если нам оставят возможность изменять только расход горячей воды, мы сможем либо управлять только уровнем воды в бассейне (а температура будет изменяться так, как получится, тут мы ничего сделать уже не сможем), либо мы смогли бы управлять только температурой воды в бассейне (а уровень будет изменяться произвольно, не так, как мы этого желаем). Если нам оставят в распоряжение только кран холодной воды, мы опять будем иметь возможность управлять только одной величиной. Если добавить третий вход, мы сможем управлять ещё какой-то дополнительной величиной. Например, если будет труба с солёной водой, мы сможем управлять ещё и уровнем солёности этой воды, если сможем её оперативно измерять.

4. ОБЪЕКТ С КВАДРАТНОЙ МАТРИЧНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ

Для скалярного объекта, если он линеен, достаточное математическое описание зависимости между его входом и выходом даётся передаточной функцией.

Если объект многоканальный, то его модель задаётся матричной передаточной функцией, например,

$$W_{n \times n}(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & \dots & w_{1n}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{n1}(s) & \dots & w_{nn}(s) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

В данном случае количество входов равно количеству выходов, функциональная матрица слева в соотношении (7) является квадратной.

Если один или несколько столбцов этой матрицы, например, нулевой, то матрица уже не будет квадратной. Также точно она не будет квадратной если одна или несколько строк нулевые. Матрица может быть формально записана с количеством элементов $n \times n$, либо в её написании можно опустить нулевые столбцы или строки, тогда матрица будет неквадратной в явном виде. К сожалению, того факта, что матрица является квадратной, недостаточно для того, чтобы утверждать, что задача управления объектом решаемая. Может оказаться, что какие-то два или более столбцов или строк пропорциональны друг другу. Тогда матрица будет вырожденной, её детерминант равен нулю. Объект, описываемый такой матричной передаточной функцией, также не является полностью управляемым, то есть мы не можем управлять всеми его выходами произвольно.

Проще всего было бы управлять объектом, если бы его матрица (7) была диагональной, то есть все элементы этой матрицы, кроме тех, которые стоят на главной диагонали, были бы

нулевыми, и ни один из элементов на главной диагонали не был бы нулевым.

Задача управления n отдельными одномерными объектами намного проще задачи управления многомерным объектом размерности $n \times n$. Это столь же очевидно, как очевидно, что обращение диагональной матрицы проще, чем обращение матрицы такой же размерности, в которой все члены ненулевые. Действительно, за счет большого количества нулевых членов расчетное соотношение становится намного проще.

Если не все элементы матрицы нулевые, и даже если все они ненулевые, управлять объектом можно. Но если детерминант матрицы равен нулю, он не может быть полностью управляемым, то есть, как минимум, один из выходов объекта не поддаётся нашему целенаправленному воздействию, мы не сможем каждый из выходов заставить изменяться произвольно так, как требуется.

Разумеется, мы можем управлять не всеми выходами, а те изменения, которые будет претерпевать неуправляемый выход (или неуправляемые выходы) мы можем называть желаемыми, и в этом случае получим возможность обманывать всех, что мы добились именно того, чего хотели. «Если вы не можете иметь того, что желаете, то желайте иметь то, что можете» – любит повторять один профессор по теории автоматического управления. Но это не будет полным управлением, это будет частичным управлением, полученным с частично управляемым объектом.

Например, если у нас имеется автомобиль, и мы весьма успешно управляем его скоростью, но не управляем поворотом передних колёс, то есть не имеем возможности управлять направлением движения, понятно, что ехать на таком автомобиле нельзя, это опасно для пассажиров и для других участников движения.

В том же примере с бассейном, если нам удастся лишь управлять уровнем воды, но не удастся управлять температурой, бассейн не будет иметь своих потребительских свойств. Это же произойдёт, если нам удастся управлять только температурой воды, а уровень воды будет изменяться произвольно. Таким образом, в большинстве практических случаев неполностью управляемый объект – значит, фактически, неуправляемый объект.

Неполностью управляемым многоканальный объект может быть, таким образом, в следующих случаях:

1. Если количество выходов превышает количество входов (матричная передаточная функция объекта неквадратная, причем количество строк меньше, чем количество столбцов).

2. Даже при совпадении количества выходов и количества входов матричная передаточная функция объекта является

вырожденной, т. е. несмотря на то, что матрица квадратная, её детерминант равен нулю; это происходит, если имеются пропорциональные строки или столбцы.

5. ПРИМЕРЫ РАЗРЕШИМЫХ И НЕРАЗРЕШИМЫХ ЗАДАЧ

К сожалению, некоторым студентам и даже «специалистам» трудно понять то, что написано выше, поэтому мы приведем самые простые аналогии.

Пример 1. Рассмотрим задачу отыскания n переменных из m линейных уравнений. Математический аппарат решения этой задачи в точности такой же, каким может быть один из методов решения задачи управления многоканальным объектом.

Из курса алгебры известно, что если количество уравнений совпадает с количеством неизвестных, т.е. $n = m$, то задача в общем случае решаемая.

Действительно, возьмем уравнения следующего вида

$$\begin{aligned} 2a + 3b &= 15, \\ 3a + 2b &= 12. \end{aligned}$$

Отсюда легко получить простейшее решение. Для начала, умножим первое уравнение на 3, а второе на 2, получим:

$$\begin{aligned} 6a + 9b &= 45, \\ 6a + 4b &= 24. \end{aligned}$$

Если из верхнего уравнения вычтем нижнее, получим

$$5b = 21.$$

Следовательно,

$$b = 21/5 = 4,2.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} 2a + 3 \times 4,2 &= 15, \\ a &= (15 - 12,6)/2 = 2,4/2 = 1,2. \end{aligned}$$

Проверим путем подстановки найденных значений в первые уравнения:

$$\begin{aligned} 2 \times 1,2 + 3 \times 4,2 &= 2,4 + 12,6 = 15, \\ 3 \times 1,2 + 2 \times 4,2 &= 3,6 + 8,4 = 12. \end{aligned}$$

Итак, система из двух линейных уравнений с двумя неизвестными дало единственное решение.

Пример 2. Предположим, что мы имели бы двухканальный объект с матричной передаточной функцией вида

$$W_{2 \times 2}(s) = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

При этом нам необходимо получить на первом выходе объекта значение, равное 15 единиц, а на втором выходе значение, равное 12 единиц. Теперь мы знаем, что необходимо сделать, а именно: на первый вход объекта мы должны подать величину $x = 1,2$, а на второй вход объекта требуется подать величину $y = 4,2$. Как видим, связь между системой линейных уравнений и многоканальными объектами самая однозначная и очевидная.

Пример 3. Рассмотрим другой пример.

$$2a + 2b = 16,$$

$$3a + 3b = 24.$$

Если первое уравнение разделить на два, а второе на три, то получим два идентичных уравнения:

$$a + b = 8,$$

$$a + b = 8.$$

Эта система уравнений имеет множество решений. Например, подойдет $a = 4$, $b = 4$. Но также подойдет и множество других решений, как целых, так и дробных, одно из чисел может быть отрицательным или нулевым, даже иррациональным, даже могут быть комплексные числа, лишь бы их сумма равнялась восьми. Например, $a = 2 + \pi$, $b = 6 - \pi$. Таким образом, в данном случае имеется бесконечное множество решений данной задачи.

Пример 4. Предположим, что мы имеем объект с матричной передаточной функцией следующего вида:

$$W_{2 \times 2}(s) = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 3 & 3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Если мы хотим, чтобы на выходах объекта получались сигналы, связанные соотношением $3y_1 = 2y_2$ мы можем это обеспечить множеством различных способов. Например, если мы хотим получить $y_1 = 16$, $y_2 = 24$, можем подать следующие сигналы:

$$x_1 = 4, x_2 = 4.$$

Также можем подавать, например, сочетания сигналов

$$x_1 = 8, x_2 = 0 \text{ или } x_1 = 0, x_2 = 8, \text{ и т. п.}$$

Но если мы хотим получить любое другое соотношение, мы не имеем ни одного варианта для обеспечения этого требования. Нельзя предложить такого сочетания входных сигналов, чтобы, например, получить следующие сигналы на выходах объекта $y_1 = 1$, $y_2 = 0$, или наоборот, $y_1 = 0$, $y_2 = 1$.

Если мы не заботимся о том, какое значение примет, например, сигнал на втором выходе, мы можем обеспечить любое значение для сигнала на первом выходе. Также мы можем игнорировать результат на первом выходе и получить любой требующийся результат на втором выходе. Но мы не можем управлять обоими выходами. Задача управления объектом размерности 2×2 с передаточной функцией вида (9) не решаемая. То есть такой объект не управляем полностью.

Пример 5. Рассмотрим третий пример.

$$2a + 2b = 16,$$

$$3a + 3b = 30.$$

Если первое уравнение разделить на два, а второе на три, то получим два уравнения, левые части которых идентичны, а правые не совпадают:

$$a + b = 8,$$

$$a + b = 10.$$

Одна и та же сумма чисел не может одновременно быть равна восьми и десяти.

Таким образом, данная задача не имеет ни одного решения.

Такие же исходы могут быть при решении задачи управления объектом с двумя входами и двумя выходами. В нашем случае совпадение количества неизвестных и количества уравнений не гарантирует, что система имеет единственное решение, но такое возможно.

Данному математическому примеру нельзя дать аналогии в области задач автоматического управления, такой пример равнозначен ошибочной идентификации модели объекта. В формулировке исходных математических соотношений используется невозможный результат. Применительно к теории автоматического управления подобная задача не только не решаемая, она ошибочна по своей постановке: невозможно сопоставить соотношения, сформулированные в этой постановке задачи, с какими-либо техническим средством, на котором бы оба эти соотношения выполнялись.

Рассмотрим теперь случай, когда количество уравнений не совпадает с количеством неизвестных.

Пример 6. Для начала рассмотрим случай, когда количество уравнений меньше, чем количество неизвестных, например,

$$2a + 3b = 15.$$

Из этого соотношения мы можем вывести только связь между неизвестными переменными, но ни одну из переменных мы вычислить не можем. Задача не может быть решена. Это не то же самое, что задача не имеет решений. Значения переменных, которые бы удовлетворяли этому соотношению, могут быть предложены, но решений множество.

Применительно к задаче управления это означало бы, что у нас имеется два входа и один выход:

$$y_1 = 2x_1 + 3x_2.$$

Если нам требуется обеспечить на выходе какое-то значение, мы это можем сделать без проблем. Второго выхода нет в принципе.

$$W_{1 \times 2}(s) = [2 \quad 3]. \quad (10)$$

Пример 7. Эту задачу можно записать и в виде квадратной матричной передаточной функции с нулевой нижней строкой:

$$W_{2 \times 2}(s) = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Но это будет означать иное: в данной записи (11) предполагается, что второй выход все-таки имеется, но на него никак не влияют никакие из входных сигналов. В этом случае второй выход нельзя называть выходом в полном смысле этого понятия.

Пример 8. Например, мы управляем трамваем, повернуть мы никуда не можем, направление движения задаётся направлением рельсами, а мы можем лишь управлять его скоростью, причем, у нас есть два способа увеличения скорости. Задача простая, понятная, если бы имелся всего лишь один вход, она бы

имела решение, наличие второго входа, по меньшей мере, не усложняет решение этой задачи, строить какую-то особую новую теорию тут не на чем. Рассуждения о подобном объекте пустопорожние.

Пример 9. Если же мы бы старались управлять автомобилем, и вторая нулевая строка означала бы, что мы не можем управлять поворотом колес, а можем управлять лишь скоростью автомобиля, понятно, что такой автомобиль был бы непригоден к эксплуатации. Наличие двух входов при единственном выходе – это не проблема. Наличие двух входов и двух выходов без возможности влияния на второй выход в том случае, когда управление обоими выходами необходимо, – это нерешаемая задача. Заниматься решением такой задачи бесполезно, бессмысленно, она не может быть решена.

Пример 10. Рассмотрим теперь ситуацию, когда количество уравнений больше, чем количество неизвестных.

Пусть у нас имеется n неизвестных и m уравнений, причем $n < m$. Произвольно назовём первые n уравнений базовыми, а остальные $m - n$ уравнений дополнительными.

Если хотя бы одно дополнительное уравнение не является линейно независимым от базовых, то система не имеет решений. Если же все дополнительные уравнения являются линейными комбинациями базовых, то они просто лишние, их можно отбросить, игнорировать.

Действительно, возьмем уравнения следующего вида

$$\begin{aligned} 2a + 3b &= 15, \\ 3a + 2b &= 12, \\ 5a + 5b &= 27. \end{aligned}$$

Третье уравнение излишнее, оно может быть получено простым суммированием первых двух. Данная система по сути является системой из двух независимых уравнений. Это нормальная ситуация, она соответствует примеру с соотношением (8), просто третье уравнение лишнее, ошибочно добавленное.

Пример 11. Предположим, мы имели бы следующую передаточную функцию объекта:

$$W_{3 \times 2}(s) = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 2 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Предположим также, что требуется, чтобы на третьем выходе сигнал был бы равен сумме сигналов на первом и втором выходе. В этом случае такое условие будет соблюдаться автоматически, можно о нем забыть и считать, что мы имеем дело с объектом с квадратной матричной передаточной функцией вида (8), а дополнительное условие, выполняющееся автоматически, никак не влияет на способ решения поставленной задачи. Если в новом усеченном виде задача будет решена, то весь результат будет такой, какой требуется.

Пример 12. Рассмотрим теперь систему следующего вида

$$2a + 3b = 15,$$

$$3a + 2b = 12,$$

$$5a + 5b = 50.$$

Третье уравнение не является линейной комбинацией первых двух. Оно исключает возможность отыскания результата. Мы имеем в этом случае нерешаемую задачу.

Пример 13. Аналогия с задачей из теории управления такая: допустим, мы имели бы объект с матричной передаточной функцией вида (12), но при этом хотели бы, чтобы на трёх выходах объекта были получены следующие выходные сигналы: $y_1 = 15$, $y_2 = 12$, $y_3 = 50$. Эта задача не решаемая, получить требуемый результат нельзя.

6. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ И КОММЕНТАРИИ К ПРОБЛЕМЕ НЕКВАДРАТНЫХ МАТРИЧНЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

Квадратные матричные передаточные функции рассматриваются чаще всего. И это происходит не потому, что авторы не догадались рассмотреть иное, а потому, что рассмотрение иного, как правило, не имеет смысла (за исключением тех примеров, о которых сказано, например, в работе [2]).

Объекты с неквадратной матричной передаточной функцией следует разделить на два вида, отличающиеся друг от друга принципиально.

Объекты, в которых количество входов больше, чем количество выходов, не представляют проблемы в сравнении с объектами с квадратной матричной передаточной функцией. Выделять их в какой-то отдельный класс можно, но задачу управления такими объектами ни при каких обстоятельствах не следует считать более сложной задачей, чем задача управления традиционными объектами (то есть объектами с квадратной матричной передаточной функцией). Никакого достижения в управлении таким объектом нет, кроме случая, когда наиболее эффективно используются все доступные входы для того, чтобы получить качество управления выше, чем это достижимо без использования хотя бы одного из этих входов. Об этом мы ниже поговорим отдельно.

Дополнительные регулировки дают дополнительные возможности, поэтому тем, кто справился с «проблемой», якобы возникающей вследствие наличия этих дополнительных регулировок, нечем хвалиться. **Задача управления объектом, имеющим больше входов, чем выходов, тривиальна.**

Объекты, в которых количество входов меньше, чем количество выходов, не решается. **Задача управления объектом, имеющим больше выходов, чем входов, не решаемая.**

Утверждение о том, что какому-либо коллективу авторов удаётся управлять объек-

тами, у которых количество выходов больше, чем количество входов, аналогично утверждению, что данный коллектив научился решать задачу, рассмотренную в Примере 13 и подобные ей. При ближайшем рассмотрении оказывается, что такие авторы решают задачи, аналогичные задаче Примера 11, что является тривиальной задачей. Решение задачи, подобной Примеру 11, с последующими утверждениями о том, что данный коллектив исследователей разработал методику решения задач, подобных задаче Примера 13, является подлогом, фейком, антинаучной провокацией.

Данные замечания важны, поскольку возникла группа исследователей, которые недостаточно четко владеют этой терминологией, что приводит к ошибочному применению терминов «неквадратный объект» и родственных с ним терминов [3], [4]. Когда в терминологии путаются студенты, это, по-видимому, исправимо, если в терминологии путаются аспиранты, это уже очень плохо, если ясности в терминологии нет у соискателя ученой степени кандидата технических наук по той специальности, где эта терминология является основной, это уже никуда не годится, и, наконец, если ошибку в терминологии такого соискателя разделяет с ним его научный руководитель, профессор, доктор технических наук в этой области специальности, тут уж остаётся задуматься, что же происходит в данном случае – добросовестное заблуждение, или умышленная игра в фиктивные терминологии для создания наукообразия, то есть для создания публикаций на пустом месте.

7. ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С КВАДРАТНОЙ МАТРИЧНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ

Если матричная передаточная функция объекта (7) имеет диагональный вид, то управление им осуществляется наиболее просто. Действительно пусть функция (7) принимает следующий вид:

$$W_{n \times n}(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & w_{nn}(s) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Здесь все элементы, кроме элементов главной диагонали, равны нулю.

С математической точки зрения мы не имеем задачи многоканального управления, а имеем n задач одноканального управления скалярными объектами, передаточные функции которых являются скалярными функциями, стоящими в этой главной диагонали.

Такая задача намного проще, чем задача управления объектом размерностью $n \times n$.

Итак, задача распадается на расчет n изолированных контуров с отрицательной обратной связью. Каждая передаточная функция отдельного канала $w_{ii}(s)$ может содержать

особенности, усложняющие управление этим каналом. Если в передаточной функции не содержится звена запаздывания, тогда методов расчета регулятора больше, в том числе **аналитический метод расчета**. Если же в моделях объекта имеются звенья запаздывания, то аналитический метод расчета не может быть применен. Важным фактом является то наблюдение, что в любом реальном объекте запаздывание всегда имеется. Лишь в относительно малом количестве реальных ситуаций линейная модель объекта содержит настолько существенные инерционности в сравнении с этим запаздыванием, что величиной запаздывания можно пренебречь. Это может иметь место в случае объекта очень высокого порядка, или в случае многоканального объекта, элементы которого, по меньшей мере, имеют второй порядок (и постоянные времени этих элементов намного больше величин запаздывания в этих каналах). Поэтому получается, что аналитические методы расчета могут быть применены только в тех случаях, которые далеки от практических задач. Таким образом, аналитические методы не являются наиболее актуальным инструментарием для проектирования многоканальных систем.

Известны также **табличные методы**, такие как метод Циглера-Никольса, метод Козна-Куна, и так далее. Все эти методы могут применяться для очень узкого класса объектов, к которым не относятся многоканальные объекты, поэтому такие методы также можно игнорировать.

Наконец, известны **методы расчета регуляторов, основанные на численном моделировании и численной оптимизации**. Именно эти методы являются наиболее эффективными и поэтому наиболее актуальными методами, позволяющими осуществлять решение достаточно сложных задач.

Для начала отметим, что матричная передаточная функция объекта описывает зависимость между входными сигналами объекта и выходным вектором состояния:

$$X_{n \times 1}(s) = \begin{bmatrix} x_1(s) \\ \dots \\ x_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & \dots & w_{1n}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{n1}(s) & \dots & w_{nn}(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_1(s) \\ \dots \\ u_n(s) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Здесь $U(s) = [u_i(s)]$ – вектор входных величин, $X(s) = [x_i(s)]$ – вектор состояний.

Состояния на выходе объекта отличаются от выходных величин тем, что выходные величины содержат помимо прочего ещё и результат действия помех, которые можно считать приложенными на выходе объекта. Соответственно, связь между вектором состояний и вектором выходных величин $Y(s) = [y_i(s)]$ даётся уравнением следующего вида:

$$Y_{n \times 1}(s) = \begin{bmatrix} x_1(s) \\ \dots \\ x_n(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1(s) \\ \dots \\ h_n(s) \end{bmatrix} = X_{n \times 1}(s) + H_{n \times 1}(s). \quad (15)$$

Здесь $H_i(s) = [h_i(s)]$ – вектор возмущений.

Соотношения (14) и (15) в совокупности описывают объект управления.

Для управления объектом создаётся регулятор, который описывается следующими уравнениями:

$$U_{n \times 1}(s) = \begin{bmatrix} u_1(s) \\ \dots \\ u_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11}(s) & \dots & q_{1n}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{n1}(s) & \dots & q_{nn}(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_1(s) \\ \dots \\ e_n(s) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Здесь $E(s) = [e_i(s)]$ – вектор ошибок управления. Вектор ошибок вычисляются как разница между вектором предписанных величин и вектором выходных значений:

$$E_{n \times 1}(s) = \begin{bmatrix} v_1(s) \\ \dots \\ v_n(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_1(s) \\ \dots \\ y_n(s) \end{bmatrix} = V_{n \times 1}(s) - Y_{n \times 1}(s). \quad (15)$$

Здесь $V(s) = [v_i(s)]$ – вектор предписанных значений (задания).

Если матрица объекта диагональная, то и матрица регулятора может быть диагональной (иное просто является необоснованным усложнением). В качестве ненулевых элементов в диагонали матрицы такого регулятора могут быть скалярные ПИД-регуляторы. Если элементы матрицы объекта содержат интеграторы, то регулятор может интегратора не содержать, соответствующий элемент регулятора может быть в этом случае ПИ-регулятором.

Если кратко, метод оптимизации состоит в следующем:

1. Создаётся модель системы, включающей объект и регулятор, а также генератор тестовых входных сигналов (заданий).

2. Задаётся некоторая целевая функция, зависящая от реализации переходного процесса в системе. Поскольку в объекте имеется много выходов, в ней также имеется много ошибок, т.е. вектор ошибок $E(s) = [e_i(s)]$. Каждый элемент этого вектора должен вносить вклад в целевую функцию.

3. Генерируются или задаются начальные значения всех коэффициентов регулятора.

4. Осуществляется моделирование системы с этими начальными условиями.

5. По результатам моделирования вычисляется значение целевой функции.

6. В соответствии с каким-либо поисковым алгоритмом осуществляется изменение коэффициентов регулятора.

7. Проверяются условия окончания моделирования. Если они не наступили, осуществляется переход к пункту 4. Если наступили условия окончания, значения коэффициентов

регулятора, при которых целевая функция имела требуемый экстремум (как правило, минимум), являются результатом вычислений, который выдаётся на выход.

Для случая скалярного объекта требуется, чтобы ошибка была как можно меньше. Оценка ошибки даётся как интеграл от модуля ошибки на всём интервале моделирования, т.е. следующим соотношением:

$$F(\theta) = \int_0^\theta |e(t)| dt. \quad (16)$$

Здесь θ – время моделирования переходного процесса (и время интегрирования сигнала ошибки).

Если объект является многоканальным, то необходимо суммировать все интегралы от ошибок на всех выходах. Выходные величины чаще всего измеряются в различных физических величинах, так как они могут быть разной природы. Поэтому для суммирования необходимо использовать весовые функции g_i , которые приводят эти ошибки к единой шкале измерения:

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^n g_i \int_0^\theta |e(t)| dt. \quad (17)$$

Сигналом тестового задания могут служить, например, единичные ступенчатые воздействия, сдвинутые друг относительно друга на равные интервалы. Такой сдвиг необходим для того, чтобы сигналы задания были линейно независимыми, т.е. никакое из заданий нельзя было получить из линейной комбинации остальных сигналов задания.

$$v_1(t) = \sigma(t - (i - 1)\tau). \quad (18)$$

Здесь τ – величина сдвига, $\sigma(t)$ – функция единичного ступенчатого скачка:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 0, \\ 1, & \text{если } t \geq 0. \end{cases} \quad (19)$$

8. СТАБИЛИЗАЦИЯ В ОТЛИЧИЕ ОТ УПРАВЛЕНИЯ

Как правило, в учебниках и монографиях по теории автоматического управления редко применяется термин «стабилизация» в качестве особого и специфического термина.

Управление – это процесс, результатом которого является повторение выходными сигналами объекта предписаний, изменяющихся во времени. Стабилизация – это процесс, сводящий все выходные сигналы объекта к нулю. Стабилизация на некотором заданном уровне принципиально от этой задачи не отличается, поскольку она сводится к предыдущему определению простым переопределением выходных величин как отклонение от предписанного значения.

Если задача управления решена, тогда задача стабилизации решается очень просто: достаточно сформировать нулевое задание.

Обратное не всегда справедливо. Если задача стабилизации решена, это не означает, что автоматически решена задача управления

объектом, хотя могут быть приведены примеры, когда это имеет место.

Ещё более частным случаем является задача сохранений достигнутой стабильности. Для понимания этого рассмотрим простейший пример.

Пример 14. Перевернутый маятник может за счет воздействий на его точку крепления поддерживаться в вертикальном состоянии. Если маятник начинает падать влево, перемещение точки его крепления в основании также влево способно предотвратить этот процесс и даже обратить его, т.е. маятник будет подниматься к своему изначальному положению. Задача стабилизации маятника с единственным подвижным креплением решается относительно просто. Но представим, что маятник состоит из двух колен. Если средством воздействия является только перемещение нижней точки крепления маятника, то вход у такого объекта один, а степеней свободы две, этот объект не в полной мере управляемый. Однако некоторое время его равновесие может быть поддержано, если оно изначально имело место. Если же такой маятник начнет падать так, что в этом процессе будет задействовано вращение второго колена, никакое перемещение основания маятника уже не сможет вернуть равновесие. Подобных колен может быть больше, и в случае начального равновесия очень осторожные корректирующие движения основания могут некоторое время поддерживать равновесие системы, даже имеющей три и более степеней свободы, но такой объект в целом остаётся неуправляемым, для него стабилизация как случайный удачный результат вполне возможна, но управление невозможно.

Пример 15. Пусть одна из выходных величин объекта y_2 является интегралом от другой выходной величины y_1 этого же объекта. Мы ранее уже установили, что в этом случае нельзя эти величины считать двумя разными выходными величинами, это просто объект, в котором производная (или интеграл) от основного выходного сигнала также доступен. Все же если мы ошибочно будем трактовать эти две величины как разные выходные величины объекта, тогда какими бы замечательными возможностями по управлению таким объектом мы бы ни обладали, мы бы никогда не смогли сделать так, чтобы, например, величина y_1 была равна ненулевой константе, а величина y_2 оставалась равной нулю. Действительно, интеграл от константы есть линейно нарастающая или убывающая функция, а никак не константа, и, в частности, не ноль. Зато мы могли бы получить такой результат, при котором выходная величина y_1 была бы равна нулю, а выходная величина y_2 была бы постоянна. Мало того, если бы мы обеспечили выполнение первого требования, выполнение второго требования было бы обеспечено автоматически,

поскольку интеграл от нуля есть постоянное значение, не изменяющееся во времени. В частном случае это могло бы быть и нулём также. То есть даже в том случае, когда входных сигналов достаточно, мы не могли бы произвольно изменять обе такие «выходные» величины (берём в кавычки вследствие некорректности такой терминологии). Но даже если бы мы имели меньшее количество входов, чем требуется, мы, вероятно, могли бы обеспечить такой результат, при котором обе указанные величины были бы равными нулю, так как равенство нулю входа интегратора является обязательным условием достижения стабильного нулевого значения на выходе этого интегратора. Как видим, ошибочная терминология и подмена понятия «управление» понятием «стабилизация» позволяют утверждать о решении задачи, которая на самом деле нерешаемая. Получение частного случая, когда, например, с помощью единственного входного сигнала удаётся свести к нулю выход интегратора, совокупно с объявлением входа этого интегратора «дополнительным выходом объекта» позволяет безграмотным авторам утверждать, что они сумели стабилизировать два выхода объекта путем воздействия только на один вход объекта. А подмена понятия «стабилизация» понятием «управление» позволяет, казалось бы, обоснованно (но как мы показали, вовсе необоснованно) утверждать, что можно управлять двумя выходами объекта, имеющего только один вход.

В результате авторы формируют тезисы (которые, возможно, будут позднее названы защищаемыми положениями) о том, что им удалось управлять объектом, у которого количество выходов больше, чем количество входов.

В погоне за красивыми обобщениями авторы формируют тезис о том, что они в общем виде решили задачу управления объектом, описываемым неквадратной матричной передаточной функцией.

Здесь терминология «неквадратная матрица» или «неквадратная матричная передаточная функция» совершенно неоправданно расширена до понятий, которые объединяют как задачу тривиальную и поэтому неактуальную, так и задачу неразрешимую, и поэтому также неактуальную. Тем самым декларация о том, что разработана методика управления объектами с неквадратными матричными передаточными функциями есть декларация ни о чем фактически ценном, декларация фейковая. Естественно, если на основе таких публикаций будет написана диссертационная работа с подобными «защищаемыми положениями», её следует отклонить от защиты, рекомендуя автору повысить свою квалификацию и впредь пользоваться только корректными терминами в пределах той науки, где автор стремится достичь научной степени. Научные взгляды такого соискателя

достаточно наглядно демонстрирует видео [5]. Также в этом видео имеется диалог на тему того, если « n одноканальных объектов удалось свести к n -канальному объекту», то фактически исходная задача таким действием усложнена. Мы уже отмечали, что в том случае, когда задача управления n -канальным объектом сводится к задаче управления n одноканальными объектами, это является существенным упрощением задачи. Если же автор считает своим достижением возможность обратного сведения, а именно: достижение, согласно которому « n одноканальных объектов удалось свести к n -канальному объекту», тогда возникает вопрос – зачем? Каким образом может возникнуть цель (актуальность, целесообразность) усложнения простой задачи? Это напоминает методику подсчёта количества сороконожек в банке – сначала пересчитать все ножки, потом результат разделить на сорок.

9. АГРЕССИВНАЯ НЕКОМПЕТЕНТНОСТЬ

На видео [5] вскрываются потрясающие глубины профессиональной некомпетентности одного из авторов статей [1], [3], [4]. Это видео снято с согласия собеседника, в чем можно удостовериться, что он видел, что его записывают, но попросил не снимать лицо, поскольку он в этом случае стесняется, однако против регистрации диалога он не возражал.

Агрессивность некомпетентных соискателей состоит в том, что они пытаются добиться подписания различных бумаг не путем убеждения в своей правоте, а путем привлечения административного ресурса научного руководителя и его коллег и другие не вполне этичные методы.

Данный соискатель представил кандидатскую работу, написанную на основе опубликованных уже им (в соавторстве) статей, что в целом очень хорошо. Проблемы возникают с собственно результатами, с научной новизной, практической ценностью этих результатов, также с формулировками названия диссертации и защищаемых положений.

Но с формальной стороны с этой диссертацией всё вроде бы благополучно: статей достаточно и их уровень формально соответствует требованиям. Уровень статей в наше время формально определяется не содержанием статей и не новизной или полезностью опубликованных в ней результатов, а только тем местом, где эти статьи опубликованы. Если они опубликованы в журнале, входящем в базы данных *Scopus* или *Web of Science*, считается, что эти статьи хорошие, если журнал, в котором они опубликованы, не входит в эти базы, но входит в рекомендуемый перечень ВАК, тогда тоже эти статьи считаются хорошими, во всяком случае, достаточно хорошими, чтобы на их основе

писать и защищать диссертацию (не только кандидатскую, но и докторскую). А вот если журнал в указанные базы не входит, тогда считается, что научной ценности статья практически не имеет. Это мнение руководителей науки и высшего образования. Соответственно, данный претендент на научную степень опубликовал достаточное количество статей в журналах достаточно высокого рейтинга¹⁵. Формально причин препятствовать ему в защите диссертации нет.

Данный соискатель также защитил выпускную квалификационную работу, а автор данной статьи входил в государственную аттестационную комиссию. Было задано фактически четыре вопроса, но заданы они были многократно, потому что докладчик не делал даже малейшей попытки отвечать действительно на поставленные вопросы, а вместо ответов сообщал несущественные сведения и соображения, никак не дающие ответа на заданные вопросы. Пришлось повторить первый и важнейший вопрос около десяти раз, упрощая формулировку, разъясняя, что именно хотелось услышать от него, и попросту дословно его повторяя, была надежда все-таки услышать ответ. Докладчик делал вид, что он дал ответ на заданный вопрос, но с этим нельзя согласиться. Поэтому вопрос повторялся в других тождественных формулировках. В диалоге таким образом получилось достаточно много фраз.

Как позже выяснилось, соискатель осуществил аудиозапись своей защиты, между прочим, не предупредив комиссию и не спросив у неё разрешения на это, в этом также можно усмотреть некоторую агрессию с его стороны, поскольку он потом осуществил расшифровку стенограммы (то есть запись на бумаге) и эту расшифровку его научный руководитель использовал для обвинительных высказываний на заседании кафедры в адрес членов комиссии. Это является нарушением, как минимум, дисциплинарным. Запись любых мероприятий должна проводиться с согласия присутствующих, по меньшей мере их следует предупреждать. Соискатель перепутал различные мероприятия: когда осуществляется **защита диссертации**, видеозапись по действующим положениям обязательна. Естественно, все участники защиты об этом знают, да и трудно не заметить видеокамеру, которая явным образом установлена на штативе и направлена на докладчика, а иногда направляется на тех,

кто задают вопросы или выступают из зала, но секретарь диссертационного совета всё равно каждый раз сообщает, что ведётся запись. Это нормально, поскольку стенограмма защиты далее делается соискателем и высылается в ВАК. Поскольку туда же высылается и видеозапись, подделка стенограммы маловероятна. Когда запись по протоколу не обязательна, и когда её делает по своей инициативе докладчик, не предупреждая об этом других участников, в этом действии имеется нарушение нравственности, и не только. Но этот вопрос нас не беспокоит, сделал запись без предупреждения, это его проблема. Далее по этой записи докладчик создал некую стенограмму, причем, кое-где он допустил явные ошибки в расшифровке текста, также снабдил её пометками типа «громко», «перебивает», создав для этих ремарок соответствующие условные обозначения. Опять-таки это его проблемы (кое-где он и сам, согласно этой стенограмме, перебивает тех, кто задаёт ему вопросы). Но вот далее на основе этой стенограммы было сделано обвинение, что ваш покорный слуга задал соискателю «под сто вопросов», а другой член комиссии – «примерно около пятидесяти вопросов». В данном случае соискатель и его научный руководитель спутали два понятия: реплика и вопрос. Например, если слушатель спросил: «Покажите пример объекта», а докладчик переспросил: «Показать пример объекта?» и получил ответ «Да, конечно, покажите», то докладчик в этом случае утверждает, что он получил два вопроса. В другом месте докладчик перебивает лицо, задающее ему вопрос, поэтому задаваемый вопрос записан в виде двух реплик, и на этом основании докладчик эти две реплики также подсчитывает, как два разных вопроса.

Все реплики всех лиц соискателем в стенограмме пронумерованы по-отдельности. Поэтому общее количество таких реплик получилось порядка восьмидесяти пяти, включая реплики «Да» или «Вы не ответили на мой вопрос». Вот на этом основании соискатель и его руководитель и утверждают, что соискателю было задано «под сто вопросов». Но суть состоит в следующем. Было задано два главных вопроса и два дополнительных. На самые важные два вопроса ответа не было получено несмотря на то, что они были повторены многократно, и было высказано настоятельное желание все-таки получить ответы на эти вопросы.

Если вы спрашиваете: «Приведите пример, который обосновывает название и защищаемые положения вашей работы?», согласитесь, ответ на этот вопрос очень важен. А если на этот вопрос ответ не получен, следовательно, такого примера нет, и следовательно, сомнения в обоснованности заголовка и защищаемых положений переходят в уверенность.

¹⁵ В данном случае все публикации соискателя в базе Scopus выполнены совместно с отцом соискателя и по теме исследований отца соискателя, не связаны с темой диссертационного исследования соискателя, см. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194524036>

Если вы спрашиваете: «Какая из двух задач проще?» и получаете в ответ «Дело не в том, что проще или сложнее» и так далее, согласитесь, что вопрос был поставлен чётко, а ответ не дан. Если спрашивается, какая из двух задач проще, ответ может быть только одним из четырёх: «Первая задача проще», или «Вторая задача проще», или «Эти задачи по сложности примерно соизмеримы», или «Я не знаю, затрудняюсь ответить».

Ну, давайте прочитаем фрагменты стенограммы.

10. ФРАГМЕНТЫ СТЕНОГРАММЫ ЗАЩИТЫ ВКР

ВАЖ¹⁶: Скажите пожалуйста, первое: а где объект, у которого количество выходов больше, чем количество входов? Пример покажите, как вы эту задачу решили?¹⁷

ВЮФ¹⁸: Мы привели одноканальный объект к виду многоканального...

...
ВАЖ: Главный вопрос вот в чём: Покажите мне системы с количеством выходов, не зависящих друг от друга, большим, чем количество входов. Есть такая?¹⁹

ВЮФ: Вы задаёте некорректный вопрос.

ВАЖ: Это, может быть, у вас некорректный ответ. Ещё раз: Есть ли у вас, в рассмотренных вами примерах или теоретически, частный случай системы, в которой количество независимых друг от друга выходов превышает количество входов в этой системе? Есть ли такой пример?

...
ВЮФ: Можно рассмотреть перевёрнутый маятник на тележке как объект с одним входом и двумя выходами.

ВАЖ: И что? Покажите модель.

ВЮФ: Вот его модель, линеаризованная модель вокруг нулевого положения.

ВАЖ: Это – одна одноканальная система.

...
ВАЖ: Это вот – данный конкретно верхний рисунок – это одноканальная система. Безусловно, все величины связаны, потому что являются производными друг друга. Это – вектор состояния. Вы берётесь управлять величиной, когда вы управляете очень хорошо, вы управляете и её производной, извините. А.С. Востриков на этом свою кандидатскую защищал, метод локализации, метод управления старшей производной. Управляете старшей производной – управляете всеми другими производными этой величины. Что нового в

сравнении с методом старшей производной вы можете нам предложить?

ВЮФ: Мы не сравниваем мы предлагаем.

ВАЖ: Но вы обязаны сравнить, вы же говорите, что вы новизну нам показываете. Где новизна, я спрашиваю? Вы взяли терминологию...

ВЮФ: Есть системы *undercounted*, то есть системы объекты, у которых входных воздействий меньше, чем выходных. Это не я придумал.

...

ВАЖ: Я задаю вопрос: «На каком основании вы свою диссертацию выдаёте за диссертацию, которая решает задачу, когда количество входов меньше количества выходов?» Объясните, на каком основании вы приписываете себе этот результат?

ВЮФ: Какой вы интересный вопрос задаёте!

ВАЖ: Это вопрос абсолютно правильный и легальный. На каком основании вы приписываете себе результат, который я не нашел в этой диссертации? А я знаю, что и не могло быть такого результата, я вам много раз говорил: «Вы берётесь решать нерешаемую задачу, приписываете себе, что она у вас не только «решается», но вы ещё и написали единый алгоритм, который и для того, и для этого случая прекрасно подходит – хоть больше входов, хоть меньше, взяли и написали алгоритм, и всё решается! Объясните.

ВЮФ: Я не могу понять суть проблемы.

...

ВАЖ: Теперь дальше – второй вопрос. Вы сказали: вам «удалось задачу синтеза нескольких одноканальных регуляторов свести к задаче синтеза одного многоканального регулятора». Я вас спрашиваю: Вы считаете, что многоканальный регулятор спроектировать проще, чем n одноканальных регуляторов? Есть задача « n – одноконтурных регуляторов». Вы свели задачу к n -канальному. Вы считаете, что эта задача проще?

ВЮФ: Дело не в том, что проще или сложнее, у нас получается...

ВАЖ: Нет, вопрос вот в чём: Вы считаете, что эта задача проще?

ВЮФ: Как это относится к какому пункту?

ВАЖ: К вашему утверждению: вам «удалось задачу синтеза n регуляторов свести к задаче синтеза одного многоканального регулятора»

...

ВАЖ: Я хочу понять, ответьте, пожалуйста, вам сформулирован вопрос предельно чётко. Вы считаете, что синтез многоканального регулятора $n \times n$ проще, чем синтез n одноканальных регуляторов? Или нет?

ВЮФ: Да, проще. Проще.

ВАЖ: Проще? Это ваше заблуждение, потому что, как правило, наоборот, если синтез $n \times n$ регуляторов удаётся свести к синтезу n одноканальных регуляторов, то говорят, что

¹⁶ ВАЖ – автор данной статьи, член комиссии.

¹⁷ Это первый вопрос и его суть: «обоснуйте название и защищаемое положение».

¹⁸ ВЮФ – докладчик, автор публикаций [1], [3], [4].

¹⁹ Это другая формулировка того же самого вопроса.

этот объект прост в управлении, и задача его управления решается очень просто.

ВЮФ: В данном случае проще у нас получилось.

ВАЖ: В данном? В каком «в данном»? Пример покажите?

ВЮФ: У нас предложена методика, вот смотрите, какая она простая.

11. КОГДА ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ПОЛЕЗНО ГОВОРИТЬ О НЕКВАДРАТНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОБЪЕКТА

В заключении мы, как обещали, поговорим об объектах, в которых количество входов больше, чем количество выходов.

Сюскаатель, уже многократно упоминаемый в этой статье, по какой-то непонятной причине утверждает за собой новизну в сфере решения задачи управления объектом, в котором количество входов больше, чем количество выходов. Прочитав публикацию [2], мы обратим внимание и на дату опубликования – 2017-й год. Вообще говоря, история применения более чем одного входа для управления единственным выходом объекта начинается, как минимум, в 1970-х годах. Перейдя на работу в Институт лазерной физики СО РАН в 1993 году, я познакомился с разработками под руководством к.т.н. В.Г. Гольдурдта, который уже применял двухканальное управление частотой лазеров, с использованием быстрого и медленного контура автоматического управления. Причем, он и его коллектив отнюдь не претендовали на первенство в решении этой задачи этим способом. Он уже был широко известен, а эти разработки использовались в различных лазерных системах уже, как минимум, десять лет. Эти системы уже были сделаны и использовались, когда писались статьи [6], [7]. Поэтому ничего принципиально нового нет в том, чтобы использовать больше входов, чем имеется выходов. Цель и суть такого использования состоит в том, что на выходную величину объекта в некоторых случаях можно воздействовать разными способами, по разным каналам. Эти воздействия дают суммарный результирующий эффект. Если один из методов воздействия, например, обладает большим быстродействием, но малым диапазоном воздействия, а другой, наоборот, обладает большим диапазоном воздействия, но малым быстродействием. Соединение этих двух методов воздействия есть использование двух входов объекта для управления единственной выходной величиной. Это не единственный пример, известен также пример использования трех входов для управления частотой *He-Ne* – лазера, длина которого составляла 5 м. Пьезоэлектрические модуляторы были недостаточны для изменения оптической длины между двумя

зеркалами этого лазера, поэтому использовался также третий канал управления, который создавался путем намотки на четыре стержня, несущих всю конструкцию лазера, медной проволоки. При подаче на эту проволоку тока длина стержней увеличивалась (вероятно, вследствие нагревания стержней, или вследствие эффекта магнитострикции, или вследствие действия обоих этих эффектов). Так или иначе, имелся объект с тремя входами и одним выходом. Входами были: а) ток на обмотку стержней (сверхмедленный канал); б) напряжение на пакет пьезоэлектрических модуляторов (медленный канал); в) напряжение малый пакет пьезоэлектрических модуляторов (быстрый канал).

Теория применения двух и более каналов влияния для управления единственной выходной величиной объекта детально разработана и представлена языком, понятным даже студентам, в работах [8], [9]. Аспирант, четыре года обучающийся на кафедре Автоматики, не ознакомившийся с учебниками, изданными этой кафедрой в той предметной области, в которой он осуществлял свои исследования, это сенсационно некомпетентный «специалист высшей квалификации», во всяком случае если он рискует утверждать о своем первенстве в той области, в которой уже написаны не только что научные статьи или монографии, а даже учебники.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

«Скрученное дерево живёт своей жизнью, тогда как прямое дерево идёт на доски»

Китайская пословица

Возможно, неправильным путем идти проще: вместо того, чтобы писать действительно содержательную диссертационную работу, принимать меры для воздействия на тех, кто может увидеть недостатки в той работе, какая уж получилась. В наше время возражать против квалификационной работы кого бы то ни было означает вредить самому себе и коллегам.

Министерство спускает план, сколько должно защититься кандидатских и докторских диссертаций. Процент выпускников аспирантуры, которые успешно защитят диссертации – это особо контролируемый показатель. Иные талантливые аспиранты за время обучения находят себе весьма приличное место работы с достойной заработной платой, и они прекрасно понимают, что наличие научной степени никак не повлияет на эту зарплату, а для того, чтобы эту степень получить, надо сделать очень многое на последнем этапе: написать диссертацию, выправить все ошибки и недостатки в ней (это подчас сложнее, чем написать первый черновой вариант), опубликовать все те результаты, которые были

получены при работе над диссертацией (иначе их нельзя будет включать в диссертацию), написать автореферат, сделать доклад по месту выполнения работы, распечатать все в типографии, разослать авторефераты, сделать презентацию, написать доклад, подготовиться к самой презентации. Это лишь очень малый список дел, которые надо сделать, чтобы защититься. Есть ещё много организационных дел, длинный перечень которых просто убивает любую инициативу у подавляющего большинства выпускников аспирантур. И в этой ситуации любой, кто проявляет достаточную настойчивость и не сходит с дистанции, для выпускающей кафедры и для университета в целом – находка. Поэтому все склонны прощать ему некоторые недочеты как в статьях, так и в самой диссертации. Но что же мы имеем в итоге? Один из соискателей допустил грубейшую ошибку в графике, который был основным результатом в той статье, которая была самой важной статьёй этого соискателя. За два года с момента опубликования этой статьи никто не нашёл этой грубой ошибки (были перепутаны оси абсцисс и ординат, из-за чего график не соответствовал тому, что должен был представлять). Никто не написал письма в редакцию. Далее этот же график перекочевал в диссертацию, в автореферат и даже в презентацию к защите. Ни соискатель, ни его научный руководитель этой ошибки не увидели. Но если это – основной результат, как же можно проявлять к нему такую небрежность? Ответ прост: этот результат не актуален, он не нужен никому, в том числе самому соискателю и его научному руководителю. Опубликовали – и слава богу! Никто не читает, в том числе и сами авторы, лишь бы был факт публикации. Таких примеров много. Наряду с нормальным процессом защит добротных диссертаций кое-где происходит одобрение потока глупостей, поскольку никто не хочет вникать в их суть, а оценивают лишь по формальным признакам. Мало кто читает чужие статьи, поскольку количество новых научных статей зашкаливает. А оно зашкаливает, потому что требуют большого количества статей и постоянного увеличения этого большого количества, поэтому пишут не только те, кто получил действительно достойный опубликования результат, а все, кто может хоть что-то писать. Наука и высшее образование превратились в скопище графоманов. И когда кто-то пытается исправить чью-то ошибку, разобраться, исправить неправомочные тезисы, он уже и сам понимает, что не надо бы ему этого делать, поскольку он «рубит сук, на котором сидит». Ведь количество защит – это показатель для всех, каждому сотруднику каждой кафедры, каждого университета и каждого института РАН важно, чтобы в его организации и в его подразделении этот показатель был по возможности выше. Так

зачем же сдерживать глупость, если она хорошо публикуется, если по формальным признакам эта глупость, написанная в виде диссертации, вполне может быть защищена в не слишком придирчивом диссертационном совете, у которого также требуют такой показатель как «активность диссертационного совета». Если активность будет недостаточной, диссертационный совет могут ведь и прикрыть. Поэтому давайте, защищайте любые диссертации, которые на первый поверхностный взгляд вовсе не выглядят глупостью, а глубокий взгляд никому не нужен, он всем только лишь мешает.

Действительно, что-то пора менять уже в этой системе наукометрии [10], [11].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. А. Воевода, К. М. Бобобеков, В. Ю. Филюшов. Полиномиальный метод синтеза для объекта с двумя входами и одним выходом. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 3-4 (96). 17–32. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-17-32.
- [2] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. V. Taichenachev, V. M. Semibalamut. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 670-676. ISBN 978-1-5090-1082-0. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998568.
- [3] А. А. Воевода, В. Ю. Филюшов. Многоконтурная система подчиненного регулирования в многоканальном неквадратном представлении. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 76. С. 90–100. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-90-100.
- [4] А. А. Воевода, В. Ю. Филюшов. Полиномиальное матричное разложение при синтезе неквадратных САУ. Системы анализа и обработки данных. 2021. № 1 (81). С. 21–38. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-21-38.
- [5] Обсуждение научных результатов и корректности использования профессиональной терминологии соискателя Филюшова В.Ю. Видео: <https://www.facebook.com/oao.nips/videos/550099066005994>
- [6] С. Н. Багаев, Б. Д. Борисов, Ю. А. Гусев, А. С. Дычков, В. Г. Гольдорт, В. Ф. Захарьяш, В. М. Клементьев, М. В. Никитин, Б. А. Тимченко, В. П. Чеботаев, В. В. Юмин. Автометрия, № 3, 37 (1983).
- [7] В. Г. Гольдорт, В. Ф. Захарьяш. Приборы и техника эксперимента, № 6, 101 (1982).
- [8] В.А. Жмудь. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim.: учеб. пособие. Новосиб. гос. техн. ин-т. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 124 с.
- [9] В. А. Жмудь. Теория автоматического управления. Замкнутые системы: учебное пособие для академического бакалавриата. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. 234 с. Серия: Бакалавр. Академический курс).

ISBN 978-5-534-05119-3.
<http://urait.ru/catalog/408949>

- [10] Э. Аберн. За улучшение высшего образования. Diarium Externum Veteris. ISBN 9984-688-56-9. 2021. Вып. № 37. С. 21–29. https://drive.google.com/file/d/1tPQGN_wbzeLxmNT_S0f0Yuw54RX89Y1s/view

- [11] Э. Аберн. Дутые университеты. Diarium Externum Veteris. ISBN 9984-688-56-9. 2021. Вып. № 37. С. 75–92.



Вадим Жмудь - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.

E-mail: oao_nips@bk.ru

630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, д. 20

Поступила 20.07.2021.

On the Issue of Designing Multichannel Automatic Control Systems

V.A. Zhmud^{1, 2, 3, 4}

¹Novosibirsk State Technical University, Russia

²Institute of Laser Physics SB RAS, Russia

³Siberian Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Geophysical Service of the SB RAS

⁴Novosibirsk Institute of Software Systems

Abstract. Automatic control theory contains many technical terms and definitions. Arbitrary use of established terms in a different sense, groundless introduction of new terms or groundless expansion of established concepts, at first glance, is a harmless action. But in essence, such methods make it possible to form new defended provisions and to ascribe to oneself the latest achievements in the following ways: first, by calling known concepts new terms, one can assert the achievement of results that sound in a new way in the new terminology; secondly, such an unjustified renaming makes it possible to assert the achievement of such results that, in the case of correct use of the terminology, have not yet been achieved, or are even fundamentally unattainable. Thus, it is as important to fight for the purity of terminology as for the purity of science in general. This article is intended for students, postgraduates and young scientists carrying out research in the field of automatic control theory or using this theory.

Key words: Multichannel control systems, MIMO, MISO, SIMO, control, stabilization.

REFERENCES

- [1] A. A. Voyevoda, K. M. Bobobekov, V. YU. Filyushov. Polynomial synthesis method for objects with two inputs and one output. Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university. - 2019. № 3-4 (96). 17–32. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-17-32.
- [2] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. V. Taichenachev, V. M. Semibalamut. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 670-676. ISBN 978-1-5090-1082-0. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998568.
- [3] A. A. Voyevoda, V. YU. Filyushov. Multi-loop subordinate control system in multichannel representation. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2021. № 76. S. 90–100. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-90-100.
- [4] A. A. Voyevoda, V. YU. Filyushov. Polynomial matrix decomposition for the synthesis of non-square control systems. Analysis and data processing systems. 2021. № 1 (81). S. 21–38. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-21-38.
- [5] Obsuzhdeniye nauchnykh rezul'tatov i korrektnosti ispol'zovaniya professional'noy terminologii soiskatelya Filyushova V.YU. Video: <https://www.facebook.com/oao.nips/videos/550099066005994>
- [6] S. H. Bagayev, B. D. Borisov, YU. A. Gusev, A. S. Dychkov, V. G. Gol'dort, V. F. Zakhar'yash, V. M. Klement'yev, M. V. Nikitin, B. A. Timchenko, V. P. Chebotayev, V. V. Yumin. Avtometriya, № 3, 37 (1983).
- [7] V. G. Gol'dort, V. F. Zakhar'yash. Pribory i tekhnika eksperimenta, № 6, 101 (1982)
- [8] V.A. Zhmud. Modelirovaniye i chislennaya optimizatsiya zamknytykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v programme VisSim.: ucheb. posobiye; Novosib. gos. tekhn. in-t. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2012. – 124 c.
- [9] V. A. Zhmud. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Zamknytyye sistemy: uchebnoye posobiye dlya akademicheskogo bakalavriata. – 2-ye izd., pererab. i dop. – M.: Izdatel'stvo Yurayt, 2017. – 234 s. – Seriya: Bakalavr. Akademicheskij kurs). – ISBN 978-5-534-05119-3. <http://urait.ru/catalog/408949>
- [10] E. Abern. Za uluchsheniye vysshego obrazovaniya. Diarium Externum Veteris. ISBN 9984-688-56-9. 2021. Vyp. № 37. S. 21–29. https://drive.google.com/file/d/1tPQGN_wbzeLxmNT_S0f0Yuw54RX89Y1s/view
- [11] E. Abern. Dutyte universitety. Diarium Externum Veteris. ISBN 9984-688-56-9. 2021. Vyp. № 37. S. 75–92.



Vadim Zhmud – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.
E-mail: oao_nips@bk.ru

630073, Novosibirsk,
str. Prosp. K. Marksa, h. 20

The paper has been received on 20/07/2021.