



УТОЧНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.Я. Ротач (МЭИ)

Показано, что излагаемая в учебных пособиях для вузов концепция синтеза систем автоматического управления фактически является концепцией синтеза следящих сервомеханизмов, и может в ряде практически важных случаев привести к неверным результатам. Дается изложение скорректированной должным образом концепции синтеза систем автоматического управления технологическими объектами со ссылками на программы в Interent, которыми можно воспользоваться при выполнении реальных расчетов¹.

Ключевые слова: система автоматического управления, сервомеханизм, синтез, модель, адаптация, алгоритм, идентификация.

В настоящее время все более настойчивой становится критика существующей теории автоматического управления (ТАУ) с точки зрения возможности применения ее методов на практике, причем эта критика исходит не только от инженеров-производственников, но и от известных ученых-теоретиков [1]. Как правило, она направлена на слишком сильную математизацию теории. Изучение проблемы свидетельствует, однако, что главная причина все же состоит не в излишней математизации теории (это, в конце концов, не так и страшно, поскольку при правильной теории излишняя математизация может всего лишь усложнить ее понимание), а в несоответствии основных положений ТАУ действительности [2, 3, 4].

Современная ТАУ с ее математическим аппаратом преобразования Лапласа и гармонического анализа фактически начала формироваться во время второй мировой войны первоначально как теория сервомеханизмов (в русском переводе: "следящих систем") — автоматических устройств, предназначенных для управления рулями самолетов и кораблей, антенн радиолокаторов и т. п. [5, 6]. Сервомеханизм представляет собой замкнутую систему с обратной связью, состоящую из объекта и регулятора, так что его структура не отличается от структур уже существовавших в то время систем автоматического регулирования паровых машин, а также некоторых других технологических объектов. Этого оказалось достаточно для провозглашения возможности объединения теории сервомеханизмов и автоматического регулирования в единую науку — ТАУ. Было заявлено, что предметом ее практических интересов станет разработка систем автоматического управления (САУ) объектами любой физической природы. Но знакомство с действительным изложением ТАУ, по крайней мере, в книгах, имеющих гриф учебника для вузов (именно эти публикации, как играющие решающую роль в формировании взглядов инженеров на ТАУ, будут рассматриваться в дальнейшем), свидетельствует, что в сущнос-

ти этого не произошло. Здесь доминируют методы теории следящих систем, которые не всегда приемлемы для синтеза САУ ТП. В какой то мере это можно объяснить так называемым "человеческим фактором". В создании следящих систем был и остается серьезно заинтересованным военно-промышленный комплекс, который, естественно, привлек к работам выдающихся ученых. Они же, как правило, явились и авторами монографий и учебников для вузов по ТАУ, сформировавших основы этой теории.

Получение модели объекта

Процедура синтеза САУ в учебниках по ТАУ формулируется следующим образом. *Задается математическая модель объекта и требуемый критерий качества функционирования САУ, по которым с помощью соответствующих методов определяется необходимый алгоритм функционирования регулятора.*

Из этого определения следует, что оценка модели объекта выходит за рамки задач, решаемых методами ТАУ. Но на практике модель объекта приходится находить при проектировании САУ, причем ситуация с оценкой моделей объектов, например, моделей технологических объектов оказывается намного более сложной, чем это имеет место при разработке сервомеханизмов.

Действительно, все элементы сервомеханизмов, в том числе и их объекты управления, изготавливаются, как правило, на одном предприятии (либо на одном предприятии выполняется их сборка) и имеется возможность достаточно надежной экспериментальной оценки математических моделей на имитационных физических моделях или даже на пилотных экземплярах. Кроме того, технические особенности объектов сервомеханизмов, по-видимому, позволяют получать относительно надежные модели также аналитическим путем.

Напротив, проекты технологических объектов и их САУ разрабатываются различными организация-

¹ По материалам доклада, представленном на Всероссийской конференции с международным участием "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения" УКИ-08. Ноябрь. 2008.

ми, и их реальная стыковка происходит лишь на монтажной площадке. Надежные физические модели объектов, а тем более пилотные САУ практически всегда отсутствуют. В этих условиях приходится идти на экспериментальное уточнение моделей уже действующих реальных объектов перед началом проектирования САУ. Раздельное получение модели объекта (*идентификации*) и только после этого выполнение по ней синтеза алгоритма управления исходит из предположения применимости так называемой гипотезы разделения, к которой следует относиться с осторожностью. Это касается, прежде всего, возможности формулировки надежного критерия приближения модели к объекту. Обычно он в теории идентификации [7] формулируется следующим образом.

Модель объекта управления удовлетворительно отражает его свойства, если при подаче на входы объекта и модели одного и того же воздействия, их реакции будут различаться на достаточно малую величину.

Сомнительность такой формулировки состоит в том, что остается неясным, как следует измерять эту ошибку и какое ее значение можно считать достаточно малым. С точки зрения системного подхода к решению проблемы идентификации критерий приближения модели объекта должен зависеть и от алгоритма функционирования регулятора, для определения которого собственно и ищется модель объекта. Таким образом, сама постановка задачи идентификации содержит противоречие [3], которое может быть названо *"парадоксом оценки модели объекта"*. Соответственно формулировка критерия приближения модели должна быть изменена.

Модель объекта управления удовлетворительно отражает его свойства, если при подаче одного и того же воздействия на входы САУ с действительным объектом и САУ с его моделью реакции этих систем будут отличаться на достаточно малую величину. Естественно, что этим критерием можно воспользоваться, только когда имеется в распоряжении реально функционирующая САУ.

Если удается сделать ошибку оценки модели объекта пренебрежимо малой, указанная трудность исчезает. Но в САУ ТП особенно там, где производимую продукцию нельзя складировать, и приходится оценку модели производить в непрерывном взаимодействии с потребителем (например, в энергетике), от предположения о возможности получения модели с исчезающе малой ошибкой идентификации приходится отказываться.

Рассматривая проблему получения модели объекта, нельзя не остановиться на весьма привлекательной для практики возможности ее оценки по данным нормального функционирования системы [8] без нарушения режима ее работы. Принципиальная возможность этого базируется на известном статистическом методе, в соответствии с которым комплексная частотная характеристика (КЧХ) модели объекта может быть получена делением взаимной спектральной плотности мощности входного воздействия и выходной величины на спек-

тральную плотность мощности входного воздействия. При этом предполагается независимость входного воздействия от внешних возмущений и помех.

Для синтеза САУ первостепенное значение имеет КЧХ объекта по управляющему каналу, поскольку этот канал входит в замкнутый контур системы, определяющий ее устойчивость. Для получения КЧХ этого канала пассивно контролируется получаемое от регулятора его входное регулирующее воздействие $\mu(t)$ и выходная управляемая величина объекта $y(t)$. Их изменение происходит из-за действия на объект возмущений (в линейных системах все они могут быть заменены одним, приведенным к выходу объекта возмущением $v(t)$) и возможного изменения задания регулятору $u(t)$. Изображения $y(t)$ и $\mu(t)$ в зависимости от изменения $v(t)$ и $u(t)$ определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} Y(s) &= \Phi_{yv}(s)N(s) + \Phi_{yu}(s)U(s); \\ M(s) &= \Phi_{mv}(s)N(s) + \Phi_{mu}(s)U(s). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\Phi(s)$ передаточные функции системы, индексы которых определяют соответствующие выходы/входы, $N(s)$, $U(s)$ – изображения $v(t)$, $u(t)$. При известных спектральных плотностях мощности возмущения $G_{vv}(\omega)$ и задающего воздействия $G_{uu}(\omega)$ с помощью этих формул можно определить взаимную спектральную мощность регулирующего воздействия и регулируемой величины $G_{yu}(j\omega)$ и спектральную плотность мощности регулирующего воздействия $G_{\mu\mu}(\omega)$, после чего выполнить указанную операцию деления. В результате получим:

$$\frac{G_{yu}(j\omega)}{G_{\mu\mu}(\omega)} = \frac{R(j\omega)W(j\omega)G_{uu}(\omega) - G_{vv}(\omega)}{R(j\omega)[G_{uu}(\omega) + G_{vv}(\omega)]}. \quad (2)$$

Из-за наличия регулятора, нарушающего требование независимости входного воздействия от возмущений, результат не оказался ожидаемой КЧХ объекта $W(j\omega)$. Идентификация происходит с ошибкой, причем ее величина остается неизвестной, поскольку обычно неизвестна спектральная плотность мощности задающего воздействия $G_{vv}(\omega)$. Если же отсутствует изменение задающего воздействия $G_{uu}(\omega) = 0$ (что характерно для многих применяемых на практике САУ ТП), то результат оказывается вообще абсурдным – получается обратная КЧХ регулятора. Желаемый результат получается, только когда отсутствуют возмущения, то есть когда $G_{vv}(\omega) = 0$ и меняется задающее воздействие $G(\omega) \neq 0$, что может иметь место в сервомеханизмах.

Приведенные выше соображения соответствуют случаю, когда синтез САУ производится для оптимизации уже работающей системы при ее модернизации. Если же идентификация производится в системе, где нет регуляторов, а управление производится человеком-оператором, то результата вообще не будет никакого, поскольку действия человека-оператора пока не научились описать математически.

Интересно отметить, что без активного эксперимента не обойтись и при идентификации каналов объ-

екта, входными воздействиями которых являются недоступные для активного их изменения возмущения (например, изменение температуры окружающего воздуха). Результатом пассивного наблюдения в этом случае окажется не модель соответствующего канала объекта, а модель соответствующего канала САУ. Для выделения из нее требуемой модели объекта понадобится знание модели объекта по управляющему каналу.

Впрочем, пассивная идентификация не может привести к успеху также из-за несоответствия диапазона частот входного воздействия требуемому диапазону для возможности настройки регулятора. Известно, что приемлемая точность управления может быть достигнута только при низкочастотных воздействиях, не охватывающих резонансную частоту замкнутого контура системы. Но модель объекта необходима, прежде всего, в этом диапазоне для возможности оценки запаса устойчивости контура.

Как видим, оценка модели объекта должна производиться с применением активных идентифицирующих воздействий. Но даже в этом случае оценка модели имеет погрешность системного характера, так что получить надежно работающую САУ на стадии проектирования принципиально не представляется возможным, сколь бы тщательно не выполнялись все предписанные теорией действия. Тем не менее другого выхода нет, и синтез САУ приходится начинать именно таким образом, понимая при этом приближенный характер получаемого решения.

Результат проектирования должен обеспечить, по крайней мере, правильный выбор структуры системы, а также позволить ввести ее в опытную эксплуатацию после выполнения монтажа и произвести пусконаладочные работы. Во время этих работ должны уже окончательно определяться численные значения параметров настройки САУ, для чего в проекте полезно иметь соответствующие алгоритмы адаптации. Иначе говоря, синтез САУ не ограничивается стадией проектирования, он должен быть продолжен во время пусконаладочных работ.

Уместно отметить, что при проектировании сервомеханизмов рассматриваемая проблема также существует и ее учет считается само собой разумеющимся. Всем хорошо известно (в том числе и из художественной литературы о героях летчиках-испытателях), что после выполнения проекта сервомеханизма обязательно будут пилотные испытания, на которых выявляются все погрешности проекта и производится их исправление. По существу здесь имеет место упомянутая выше адаптация, без выполнения которой проект не считается завершенным.

Формулировка критериев оптимальности САУ

В публикациях по современной ТАУ утверждается, что для нормальной работы САУ требования устойчивости недостаточно. Необходимо еще потребовать, чтобы система обладала должным качеством. В свою очередь качество определяется видом процесса измене-

ния управляемой величины при типовом (обычно ступенчатом) входном воздействии. Численно качество процесса управления определяется либо прямыми показателями (максимальным отклонением, длительностью, затуханием колебаний, перерегулированием и т. п.), либо косвенными критериями. К настоящему времени наиболее употребительным следует считать косвенный обобщенный квадратичный интегральный критерий: интеграл от линейной комбинации квадрата ошибки управления $\varepsilon(t)$ и квадрата управляющего воздействия $\mu(t)$ с весом (функцией штрафа):

$$Q = \int_0^{\infty} [\varepsilon^2(t) + e^2 \mu^2(t)] dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

Меняя вес функции штрафа e , можно добиться должного затухания колебаний.

С первого взгляда такая формулировка критерия представляется вполне естественной. Очевидно, однако, что такой критерий можно применять только в случае, когда система имеет только одно входное воздействие, причем такое, что для него можно указать типовую форму. Этому условию удовлетворяют сервомеханизмы, при синтезе которых принято ориентироваться только на входное задающее воздействие. Кроме того, его ступенчатая форма может считаться типовой, если оно формируется человеком-оператором, психологические особенности которого таковы, что любой формы воздействие он образует последовательностью скачков.

Ситуация, однако, резко усложняется при переходе от идеализированных сервомеханизмов к системам управления ТП, где подлежащими учету входными воздействиями являются возмущения на объект, которых может быть много, причем среди них могут быть и недоступные для непосредственного контроля. Реакции на каждое из этих возмущений будут отличаться от других, что порождает неопределенность при использовании рассматриваемого критерия качества. Оптимизация по каждому возмущению будет давать алгоритм управления, отличный от оптимизации по другим возмущениям (а для неконтролируемых возмущений вообще остается неизвестной). При этом, очевидно, что результатом синтеза САУ должен быть один алгоритм работы регулятора.

В этой связи представляется целесообразным обратиться к основному тезису кибернетики об аналогии организации управления в живых организмах и машинах. Вспомним, например, как производится допуск человека к управлению автомобилем. Для получения водительских прав ему необходимо предъявить два документа: во-первых, справку из медучреждения о психическом здоровье и, во-вторых, справку о сдаче экзамена по практическому вождению. В [9] приводится подробное описание медицинских экспериментов, показавших, что наиболее распространенные формы психических заболеваний человека связаны с нарушением нормальной деятельности в мозгу обратных связей, образующих замкнутые на се-

бя контуры. Неправильно работающие контуры могут возбуждать собственные незатухающие колебания, что приводит к саморазрушению организма. По аналогии можно считать, что психическому здоровью человека, то есть его способности к самообладанию в любых ситуациях, в области технических САУ соответствует достаточно большой запас устойчивости их замкнутых контуров, а сдаче экзамена по практическому вождению по типовым маршрутам – удовлетворение требованию точности управления при действии выбранных типовых возмущений. При использовании такого рода критериев появляется уверенность, что реакция системы на другие воздействия хотя и не будет оптимальной, но, по крайней мере, не вызовет появления слабо затухающих колебаний.

Оценка величины запаса устойчивости контуров производится путем соответствующего обобщения известных критериев устойчивости. Так, при ориентировке на критерий устойчивости Найквиста численное значение запаса устойчивости определяется степенью удаления КЧХ ее разомкнутого контура от "опасной" точки: $-1, j0$. В свою очередь степень такого удаления может быть оценена величиной резонансного пика модуля КЧХ замкнутого контура системы, относительная величина которого получила название *частотного показателя колебательности* M [5]. Этот показатель вводится явно в критерий качества в виде ограничения на допустимую его величину M_{don} [3, 10], так что критерий (3) должен быть изменен

$$Q = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt \rightarrow \min, \quad M \leq M_{don}. \quad (4)$$

Напомним, что КЧХ контура есть изображение по Фурье ее импульсной переходной характеристики, и, следовательно, колебательность именно этой характеристики (то есть реакция на дельта-импульс) только и определяет запас устойчивости системы. Уточним, что под замкнутым контуром системы следует понимать такой выбор ее выходной величины, при котором она подается на вход системы через единичную обратную связь.

В сервомеханизмах как раз и имеет место тот счастливый для критерия (3) случай, когда процесс изменения управляемой величины, вызванный изменением задающего воздействия, одновременно является и процессом изменения выходной величины замкнутого контура системы. Соответственно качество процесса на выходе сервомеханизма одновременно определяет и запас его устойчивости (правда, для корректной оценки запаса устойчивости реакция на ступенчатое воздействие должна быть предварительно проинтегрирована). В общем же случае существующий критерий оптимальности (3) следует считать ошибочным, поскольку в нем оценка запаса устойчивости производится по колебательности реакции управляемой величины на то же воздействие, что и при оценке точности управления.

Сомнение вызывают и единообразные требования к графику процесса управления, предъявляемые прямыми показателями качества. Они предполагают

известный "стандартный" вид этого графика. Но в САУ ТП характеристики объекта по каналам действия возмущений могут иметь самый разнообразный вид. Так, например, изменение уровня воды в барабанах котлов электростанций после изменения паровой нагрузки происходит сначала в направлении, прямо противоположном тому, которое требует условие материального баланса

Возвратимся к сопоставлению рассматриваемой проблемы с получением прав на управление автомобилем. Расчету САУ по существующему критерию (3) соответствовало бы оформление водительского удостоверения без медицинской справки, только на основе успешной сдачи экзамена по вождению. О психическом здоровье претендента предполагалось бы судить по его поведению при сдаче этого экзамена на "типовых" маршрутах. Но подобно тому, как во время сдачи экзамена по практике вождения могут не встретиться ситуации, при которых испытуемый не смог справиться с управлением, в САУ могут возникнуть процессы с недопустимо большой колебательностью при других "нетиповых" возмущениях.

Запас устойчивости системы может вводиться также в виде ограничения на расположение корней характеристического уравнения системы с использованием предложенного в [11] аппарата расширенных по степени колебательности переходного m процесса КЧХ. Правда в этой работе степень затухания рассматривалась как один из прямых показателей качества САУ, но в выполняемых с ее использованием расчетах она фактически фигурирует как ограничение на запас устойчивости замкнутого контура. Для систем с запаздыванием в этом случае приходится привлекать еще расширенные КЧХ по степени устойчивости [12], комбинируя эти два способа оценки [3].

Заметим попутно, что включение слова "запас" в формулировку термина "запас устойчивости" породило проникновение в некоторые публикации по ТАУ утверждения, что этот термин определяет меру изменения параметров системы, необходимую для потери системной устойчивости. Следует подчеркнуть, что этот термин введен для стабильных САУ с неизменными динамическими свойствами как мера интенсивности затухания собственных колебаний системы. Для оценки влияния вариаций параметров на запас устойчивости системы имеется специальное понятие "робастности", и разработаны соответствующие методы расчета [3].

Выбор алгоритмов функционирования регуляторов

Практически все предложенные к настоящему времени в публикациях по современной ТАУ методы синтеза алгоритмов функционирования регуляторов получаются в предположении, что объект управления описывается системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Кроме того, при этом обычно ориентируются на обобщенный интегральный критерий оптимальности (3). Реально, однако, большинство технологических объектов обладают транспортными запазды-

ваниями, причем в сложных объектах мест появления запаздываний может быть несколько и взаимодействовать они могут самым разнообразным образом [13].

Математическим аппаратом описания таких систем являются уравнения с запаздывающим аргументом, но практически им оказался аппарат частотных характеристик. Естественно, что и при построении ТАУ, пригодной для операций с объектами любой физической природы, возможность наличия в них запаздываний не может быть не учтена.

В связи с рассматриваемой проблемой следует упомянуть о многочисленных попытках устранения запаздывания коррекцией структуры САУ с помощью так называемого упредителя Смита [14]. Метод был предложен более полувека назад, но пока не удалось найти достоверных публикаций, подтверждающих его применение на практике. В основу упредителя положена идея, состоящая в том, что параллельно регулирующему каналу объекта подключаются две его модели, причем одна из них полностью моделирует объект, а в другой отсутствует запаздывание. Выход первой вычитается из выхода объекта, выход второй — суммируется. В результате в конуре регулирования запаздывание исчезает, поскольку в нем оказался не объект, а его модель без запаздывания. Однако к подобным манипуляциям со структурами контуров в ТАУ давно сформировалась настороженная позиция. Суть ее состоит в том, что нельзя компенсировать полюсы системы и оперировать с полученной таким образом "вырожденной" системой, поскольку последняя может оказаться не грубой. В рассматриваемом случае компенсируются все полюса, порождаемые запаздываниями. В случае технологических объектов ситуация ужесточается тем, что обычно истинные значения запаздываний неизвестны — они появляются в результате аппроксимации экспериментальных данных и зависят от принятого метода приближения, меняясь в зависимости от этого в относительно широких пределах.

В настоящее время отсутствует также формальный метод выбора алгоритма функционирования регуляторов по сформулированному выше уточненному критерию оптимальности с явным вводом ограничения на запас устойчивости системы (4). Следовательно, можно констатировать непригодность существующих методов синтеза регуляторов для САУ ТП.

Практически единственным способом определения алгоритма регуляторов пока остается формализованно-экспертный способ, при котором структура алгоритма задается экспертно, а определение численных значений его параметров выполняется специально разработанными формальными методами [3, 11]. Так можно сформировать интеллектуальный регулятор, имитирующий работу человека-оператора. Заметим, что к проблеме использования экспертных (эвристических) алгоритмов современная ТАУ стала в последнее время относиться терпимо.

Анализ работы операторов, осуществляющих в человеко-машинных системах ручное управление, пока-

Наука никогда не решает вопроса, не поставив при этом десятка новых.

Бернард Шоу

зывает, что они, как правило, стараются перемещать управляющий орган объектов со скоростью тем большей, чем больше как отклонение, так и скорость изменения управляемой величины (с учетом ее знака). Перевод такого поведения на язык ТАУ, очевидно, приводит к ПИ регулятору. Таким образом, "простейший" (так обычно сопровождается в публикациях по современной ТАУ упоминание об этом регуляторе) давно известный и широко распространенный ПИ, а также ПИД регуляторы оказались, пожалуй, единственными надежно работающими интеллектуальными регуляторами. В [3] показано, что при ориентировке на минимум среднеквадратичной ошибки и отсутствии ограничения на запас устойчивости теория оптимального предсказания Колмогорова-Винера также приводит к ПИД регулятору. Но это, конечно, не значит, что не могут быть рекомендованы и другие интеллектуальные алгоритмы.

В последнее время сравнительно много публикаций посвящается *фазы-регуляторам*, в которых предполагается экспертная оценка не только структуры, но и численных значений параметров настройки. Но поскольку оценка численных значений коэффициентов, определяющих вес компонент дифференцирования и интегрирования, находится, очевидно, вне субъективных возможностей человека-эксперта, в фазы-регулятор может быть практически заложен только статический (в линейном случае — П) закон управления. Сомнительны рекомендации использовать для синтеза не теорию вероятностей, а так называемую теорию нечетких множеств, в которой от эксперта требуется невозможное: для каждого лингвистического термина указать точное значение базовой переменной, при которой этот терм безусловно верен. Но если это и окажется возможным, то фактически получится детерминированный регулятор, преимущества которого не доказаны [3].

Для практики важна проблема увеличения точности управления по сравнению с точностью, обеспечиваемой ПИД регуляторами. Обычно для решения такой задачи предлагается перейти к нелинейным регуляторам. Однако многолетние попытки найти реально работающие нелинейные алгоритмы оказались безуспешными (несмотря на положительные результаты моделирования). Объяснить это можно тем, что, как правило, синтез САУ со всякого рода "продвинутыми" ("advanced") регуляторами производится при входном ступенчатом воздействии. Естественно, что после помещения их в хаос случайных воздействий на реальном производстве, они теряют свои тщательно подобранные для ступенчатых воздействий преимущества.

Улучшение точности управления реально достигается путем экспертного усложнения информационной структуры системы с последующим формализованным расчетом параметров настройки. Такое усложнение

может производиться введением добавочной информации о вспомогательных управляемых величинах объекта или использованием компенсации возмущений и форсировки задающего воздействия [3].

Точность управления

Перед САУ ТП обычно ставится задача путем повышения точности управления минимизировать экономические потери. Поскольку действующие на технологические объекты возмущения имеют, как правило, случайный характер, речь может идти либо о минимизации выбросов управляемой величины (превышение допустимого значения которых может привести к остановке объекта системой защиты), либо о минимизации ее среднего отклонения за достаточно длительный период времени (по истечении которого надлежит платить за использованные материалы и энергию).

Впрочем, тестовые ступенчатые воздействия могут быть использованы и при синтезе САУ ТП, но только если считать их не типовыми, а наиболее тяжелыми с точки зрения минимизации выбросов управляемой величины [3]. Это оказывается допустимым благодаря принципу накопления возмущений Булгакова для САУ с достаточно большим запасом устойчивости [15]. Остается, однако, проблема оптимизации точности работы САУ, когда интерес представляет среднее за длительное время ее отклонение, обычно — среднеквадратическое отклонение (СКО). Оптимизация по критерию минимума СКО методами теории вероятностей была предложена уже в первых работах по теории сервомеханизмов [5], однако в практике автоматизации ТП сколько-нибудь заметного применения она не получила (если не считать нескольких диссертаций). Связано это с необходимостью располагать корреляционными функциями возмущений, для оценки которых с требуемой точностью необходимы неприемлемо длительные их реализации (как показывают примеры расчетов типичных объектов порядка месяцев [3]) при условии, что все это время объект будет оставаться в обычном стационарном режиме функционирования. Попытки решать проблему применением центрирования реализаций возмущений привели к абсурду: оказалось, что получаемые в результате оптимальные системы работают с остаточной неравномерностью. Происходит это потому, что произвольный выбор интервалов центрирования без учета системного характера задачи привел к устранению низкочастотных составляющих, без которых исчезла необходимость во вводе интегральной составляющей в алгоритм функционирования регулятора. По очевидным причинам не могут быть получены на предпроектной стадии и оценки корреляционных функций, недоступных для контроля возмущений, наличие которых является одной из особенностей технологических объектов управления. Более того, представляется желательным так осуществить синтез САУ, чтобы были минимизированы как

выбросы, так и СКО, причем не только по одному из возмущений, но также по всем возмущениям, в том числе и недоступным для контроля.

Знакомство с публикациями по современной ТАУ показывает, что рассмотренная проблема просто игнорируется. Тем не менее ее необходимо решать. Возможный путь решения состоит в обращении к *теории инвариантности*, методы которой, как известно, не требуют знания характеристик возмущающих воздействий. Оптимизация здесь начинается с формулировки условий абсолютной инвариантности, при выполнении которых отклонение управляемой величины полностью устраняется. Если абсолютная инвариантность оказывается реально недостижимой, приходится уходить от идеальных характеристик системы, упрощая их на основании тех или иных эвристических соображений. Естественно, это приводит к появлению отклонений управляемой величины, что стало причиной наименования получаемых таким образом систем как систем, "инвариантных до ϵ " [16] (так на структурных схемах обычно обозначается ошибка управления).

При использовании для синтеза САУ частотных методов, требование абсолютной инвариантности сводится к требованию равенства нулю соответствующих частотных характеристик системы на всем диапазоне частот $0 \dots \infty$. Это требует бесконечно большого усиления в регуляторе, что входит в противоречие с устойчивостью системы. Известно, однако, что вне зависимости от природы реальных возмущений (случайных или детерминированных, в том числе ступенчатой формы), их наибольшая интенсивность сосредоточена в низкочастотной области. Поэтому для получения системы "инвариантной до ϵ " целесообразно воспользоваться одним из методов приближения функций [17], основанном на разложении частотных характеристик САУ в ряд Тейлора [3, 10] в точке $\omega = 0$. При этом можно ограничиться только двумя первыми членами разложения, и не требовать равенства нулю, а только минимизации их коэффициентов:

$$\Phi_{y\lambda}(s) \approx C_0 + C_1 s, \quad (5)$$

$$\text{где: } C_0 = \left| \Phi_{y\lambda}(s) \right|_{s=0}; \quad C_1 = \left| \frac{d}{ds} \Phi_{y\lambda}(s) \right|_{s=0}.$$

$\Phi_{y\lambda}(s)$ передаточная функция системы по каналу действия возмущения $\lambda(t)$ на управляемую величину $y(t)$, которая связана с передаточными функциями объекта по возмущающему и регулирующему каналам $W_{y\lambda}(s)$, $W_{yu}(s)$ и регулятора $R(s)$ соотношением:

$$\Phi_{y\lambda}(s) = \frac{W_{y\lambda}(s)}{1 + W_{yu}(s)R(s)}. \quad (6)$$

Выражение для $\Phi_{y\lambda}(s)$ системы с интегралом в алгоритме функционирования регулятора можно записать следующим образом:

$$\Phi_{y\lambda}(s) \approx s \Phi_{y\lambda}^0(s). \quad (7)$$

Следовательно, $C_0 = 0$ и оптимизация настройки регулятора сводится в этом случае к минимизации

коэффициента C_1 , который может быть вычислен по формуле:

$$C_1 = \left\{ \frac{d}{ds} [\Phi_{y\lambda}^0(s)] \right\}_{s=0} \rightarrow \min, \quad (8)$$

или, применяя правило дифференцирования произведения двух функций:

$$C_1 = \left[s \frac{d}{ds} \Phi_{y\lambda}^0(s) + \Phi_{y\lambda}^0(s) \right]_{s=0} = [\Phi_{y\lambda}^0(s)]_{s=0} = \left[\frac{\Phi_{y\lambda}(s)}{s} \right]_{s=0} \rightarrow \min. \quad (9)$$

В соответствии с известными правилами операционного исчисления эта формула во временной области определяет конечное значение интеграла от переходной характеристики системы, то есть значение линейного интегрального критерия

$$Q = \int_0^{\infty} h_{y1}(t) dt, \quad (10)$$

где $h_{y1}(t)$ – переходная характеристика системы по каналу действия возмущения $\lambda(t)$. В частности, для системы с ПИД регулятором:

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (11)$$

где k_p , T_i , T_d – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования регулятора) формула (8) приводит к следующему критерию:

$$\frac{T_i}{k_p} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Таким образом, для минимизации критерия достаточно максимизировать коэффициент веса при интегральной составляющей закона регулирования.

Полученный критерий остается применимым для всех, в том числе и для недоступных для контроля возмущений, он минимизирует как СКО управляемой величины (не требуя знания корреляционных функций возмущений), так и ее выбросы. Заметим, что коэффициенты C_0, C_1, \dots в теории сервомеханизмов, а вслед за этим и в ТАУ известны под названием "коэффициентов ошибки" и обычно используются для вычисления установившейся ошибки управления. Как видим, они могут быть полезным и для оценки ошибки и в динамике.

Использование критерия (9) часто приводит к перерегулированию большему, чем при использовании, например, интегрального квадратичного критерия. Однако из-за этого не следует торопиться с коррекцией настройки регулятора. Так, пример анализа, выполненный в [18], показал, что подобная коррекция приводит к увеличению СКО при действии любого из возмущений. Окончательное решение поэтому лучше отложить на стадию ввода системы в эксплуатацию с помощью алгоритмов адаптации. Для этого достаточно снять реализацию процесса изменения управляемой величины при работающем регуляторе $R_1(j\omega)$ и найти оценку ее спектральной плотности мощности $G_y(\omega)$. После этого определяется оптимальная частот-

ная характеристика регулятора $R_2(j\omega)$, минимизирующая дисперсию регулируемой величины:

$$d_y = \int_0^{\infty} G_{y2}(\omega) d\omega, \quad (13)$$

$$\text{где: } G_{y2}(\omega) = \left| \frac{1 + R_1(j\omega)W_\mu(j\omega)}{1 + R_2(j\omega)W_\mu(j\omega)} \right|^2 G_{y1}(\omega). \quad (14)$$

Центрирование реализаций производится здесь естественным путем самой САУ, что устраняет отмеченную выше опасность потерять существенную часть спектра возмущений. Напомним, что выполнение адаптации необходимо и по причине сомнительной точности модели объекта, получаемой на предпроектной стадии.

Адаптация

Поскольку в публикациях по современной ТАУ предполагается, что синтез САУ со стабильными свойствами объекта может быть выполнен с приемлемой точностью, назначением алгоритмов адаптации считается управление объектами с меняющимися во времени свойствами.

Но, как было показано выше, предположение о возможности получения надежной модели объекта на предпроектной стадии может оказаться ошибочным, так что адаптацию следует, прежде всего, рассматривать как заключительный этап синтеза САУ стабильными объектами, целью которого является окончательное определение численных значений параметров настройки регулятора.

Алгоритмы адаптации целесообразно оставлять на все время последующей работы САУ для спорадической ее подстройки, необходимость в которой вызывается такими медленно меняющимися факторами, как старение конструктивных материалов, зашлаковкой поверхностей нагрева теплообменников и т. п. Относительно быстрое изменение свойств объекта делает адаптацию проблематичной, и в этом случае приходится искать другие решения. Так, при изменении свойств объекта, вызванном изменением его нагрузки, следует попытаться применить коррекцию настройки регулятора в зависимости от нагрузки. Целью адаптации в этом случае должно быть уточнение указанной зависимости.

В публикациях по ТАУ обычно считается, что адаптивные САУ выполняют оптимизацию настройки регулятора, используя подаваемые на объект оперативные управляющие воздействия. Для этого в процессе нормальной работы системы они должны отслеживать текущую модель объекта путем пассивного наблюдения за изменениями управляемой величины и управляющего воздействия регулятора на объект. Но это уже будет идентификация по данным нормального функционирования, ошибочность которой уже была показана выше.

В адаптивных САУ для идентификации объекта приходится применять активный эксперимент, подавая

на систему специально организованные воздействия (сигнальные, параметрические, структурные) [3, 10, 19].

Алгоритмы адаптации необязательно должны быть составной частью программного обеспечения регуляторов. Они могут быть использованы при автоматизированной или даже ручной настройке САУ в виде автономных программ, записанных в ноутбуках наладчиков.

Заключение

В заключение приведем в сжатом виде содержание процедуры синтеза САУ и последовательность действий при ее реализации. Попутно укажем на примеры соответствующих "живых" программ расчетов на Mathcad из учебника [3]. Они записаны в версии, доступной для неподготовленного пользователя; их можно скачать с сайта кафедры АСУТП МЭИ по адресу <http://acswww.mpei.ac.ru> (номера соответствующих рисунков учебника изданий 2004-2007 гг. приведены в скобках) и использовать для аналогичных расчетов.

1. Изучение объекта управления, экспертный выбор структуры САУ (одноконтурных, каскадных, с компенсацией возмущений и т. п.).

2. Оценка математических моделей каналов объекта постановкой активного эксперимента и их аппроксимация подходящим аналитически выражением (рис. 3.18 – 3.23).

3. Расчет оптимальных параметров настройки:

- одноконтурной системы с ПИ регулятором при ограничении на запас устойчивости, определяемым расположением корней характеристического уравнения (рис. 5.6, 5.8);

- одноконтурной системы с ПИ регулятором при ограничении на запас устойчивости, определяемым частотным показателем колебательности (рис. 5.9, 5.11);

- одноконтурной системы с ПИД регулятором (рис. 5.13 – 5.19);

- одноконтурной системы с форсировкой задания (рис. 7.2 – 7-3);

- двухконтурной системы с контролем вспомогательных управляемых величин (рис. 7.8 – 7.11),

- системы с компенсацией возмущений (рис. 7.16 – 7.18);

- многомерной системы несвязанного регулирования (рис. 7.26 -7.30);

- автономной многомерной системы (рис. 7.32).

4. Расчет настройки цифровых регуляторов (рис. 8.23, 8.25).

5. Адаптация:

- по переходной характеристике системы или по ее свободному движению к состоянию равновесия (рис. 10.6 – 10.10);

- выводом системы в режим автоколебаний (рис. 10.13- 10.17);

- по частотным характеристикам с подачей синусоидального идентифицирующего воздействия (рис. 10.19 -10.23);

- с использованием интервальных алгоритмов (рис. 10.24 – 10.30).

6. Включение алгоритмов адаптации в проект системы, их использование во время пуска наладочных работ на действующем объекте. Их целесообразно оставить в составе математического обеспечения САУ для спорадической по мере необходимости диагностики и подстройки ее параметров в процессе последующей эксплуатации.

Список литературы

1. Красовский А.А. Исторический очерк развития и состояние теории автоматического управления. М.: НПО "Монтажавтоматика". 1999.
2. Ротач В.Я. Об альтернативных положениях теории автоматического управления // Проблемы управления и информатики. 1999. № 2.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Изд. дом МЭИ 2004, 2005, 2007, 2008.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: соответствуют ли ее основные положения действительности? // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 3.
5. Джеймс Х., Никольс Н., Филипс Р. Теория следящих систем. М.: Иностранная литература. 1953.
6. Маккол Л. Основы теории сервомеханизмов. М.: Иностранная литература. 1947.
7. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир. 1975.
8. Ротач В.Я. По поводу работ, связанных с идентификацией объектов в условиях их нормального функционирования // Автоматика и телемеханика. 1969. № 6.
9. Винер Н. Кибернетика. М.: Наука. 1983.
10. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1961.
11. Дудников Е.Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1956.
12. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука. 1977.
13. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятий (индустриальная динамика). М.: Прогресс. 1971.
14. Рей У. Методы управления ТП. М.: Мир. 1983.
15. Булгаков Б.В. Колебания. М.: ГИТТЛ. 1954.
16. Петров Б.Н., Кухтенко А.И. Современные методы проектирования САУ. М.: Машиностроение. 1967.
17. Боднер В.А. О выборе оптимальных параметров регулируемых систем. М.: Оборонгиз. 1953.
18. Ротач В.Я. О выборе критериев оптимальности систем управления с учетом случайного характера воздействий. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. № 9.
19. Ротач В.Я. Интервальные итерационные алгоритмы адаптации. // Автоматизация в промышленности. 2007. № 7.

Ротач Виталий Яковлевич – д-р техн. наук, проф. Московского энергетического института (технического университета).

Контактный телефон (495) 362-70-29.

E-mail: RotachVY@mpei.ru