



Об адаптивных системах управления с текущей идентификацией объекта

В.Я. Ротач (МЭИ)

Показывается практическая невозможность применения в условиях непрерывных производственных процессов адаптивных систем управления с текущей идентификацией объекта. Отмечается системная противоречивость решения задач пассивной идентификации объекта и оптимизации настройки регулятора. Опровергается распространенное мнение о возможности получения пригодной для последующего использования модели объекта пассивными методами по данным его нормального функционирования в составе удовлетворительно работающих систем управления. Формулируются основные направления построения адаптивных систем с использованием расширенного ассортимента активных воздействий.

Внедрение компьютеров в системы автоматического управления (САУ) открыло широкие возможности для применения в них новых нетрадиционных структур и алгоритмов. Все они объединились в рамках современной теории автоматического управления (ТАУ), получившей название Advanced Control. Основные направления этой теории сформировались около двадцати лет назад; в частности, можно указать на обзор, выполненный рабочей группой видных ученых [1].

К сожалению, увлечение этой теорией не обошлось без ошибок. В частности, это касается предложения по созданию адаптивных систем с текущей идентификацией модели объекта, информация о которой накапливается и обрабатывается в процессе его функционирования (см., например [1, 2, 3]). Предлагаемая структура такой системы обычно имеет вид, показанный на рис. 1. Предполагается, что в процессе работы системы блок идентификации *Ид*, контролируя входную величину (управляющее воздействие) μ и выходную величину (управляемую величину) y объекта управления *Об*, оценивает модель объекта, по которой в блоке оптимизации *Опт* находится и устанавливается в регуляторе *Рег* его оптимальная настройка.

Получение моделей объектов управления в настоящее время выполняется методами специального раздела ТАУ — теории идентификации, которая, естественно, используется при построении адаптивных систем. В рамках этой теории схема идентификации объекта принимается в виде, представленном на рис. 2, а сам метод оценки обычно основывается на следующих соображениях [2, 3] (возможны некоторые, не имеющие принципиального значения, изменения при конкретном его применении).

Реализация случайной выходной величины объекта, вызванная входным воздействием $x(t)$, с наложенной на нее реализацией случайного возмущения $v(t)$, эквивалентного всем действующим на объект возмущениям $\lambda_1(t), \lambda_2(t) \dots$ как доступным, так и недоступным для контроля, определяется известной формулой:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\xi)x(t-\xi)d\xi + v(t), \quad (1)$$

где $w(t)$ — импульсная переходная характеристика (ИПХ) объекта. Для устранения влияния на результат идентифи-

кации возмущений осуществляется переход к взаимной корреляционной функции между входом/ выходом:

$$r_{yx}(\tau) = M\{x(t)y(t+\tau)\} = M\left\{x(t) \int_{-\infty}^{\infty} w(\xi)x(t+\tau-\xi)d\xi + x(t)v(t+\tau)\right\},$$

где M — символ математического ожидания. После смены последовательности интегрирования и расчета математического ожидания эта формула приобретает следующий вид:

$$r_{yx}(\tau) = \int w(\xi)r_{xx}(\tau-\xi)d\xi + r_{vx}(\tau),$$

где $r_{xx}(\tau)$ — корреляционная функция $x(t)$, $r_{yx}(\tau)$ — взаимная корреляционная функция $x(t)$ и $y(t)$, $r_{vx}(\tau)$ — взаимная корреляционная функция $x(t)$ и $v(t)$.

Для возможности получения из этого выражения ИПХ принимается основное допущение (предпосылка), состоящее в том, что входное воздействие x предполагается независимым от возмущения v . В этом случае взаимная корреляционная функция между ними равна нулю $r_{vx}(\tau) = 0$, и последнее соотношение переходит в обычный интеграл наложения

$$r_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\xi)r_{xx}(\tau-\xi)d\xi. \quad (2)$$

Он может рассматриваться как интегральное уравнение, из которого по оценкам корреляционных функций $r_{yx}(\tau), r_{xx}(\tau)$ определяется искомая ИПХ объекта $w(t)$.

Поскольку применение Фурье-преобразования к интегралу наложения приводит к операции умножения изображений, применение этого преобразования к (2) дает следующий результат:

$$G_{yx}(j\omega) = W(j\omega)G_{xx}(\omega), \quad (3)$$

где $W(j\omega)$ — комплексная частотная характеристика (КЧХ) системы, $G_{yx}(j\omega)$ — взаимная спектральная

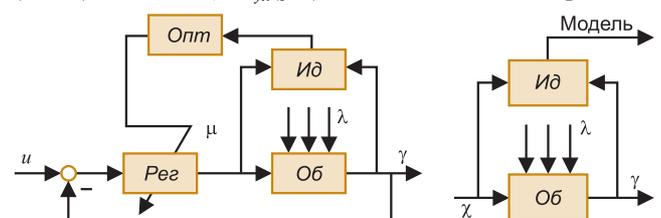


Рис. 1

Рис. 2

плотность мощности между входом/выходом, $G_{xx}(\omega)$ – спектральная плотность мощности входа.

Таким образом, для получения модели объекта по данным наблюдения за изменением его входа/выхода в процессе нормального функционирования следует записать достаточно длинные реализации этих величин и оценить корреляционную функцию входа и взаимную корреляционную функцию входа/выхода. После этого либо, решив интегральное уравнение (2), можно определить ИПХ объекта, либо, определив предварительно соответствующие спектральные плотности мощности, получить КЧХ объекта:

$$W(j\omega) = \frac{G_{yx}(j\omega)}{G_{xx}(\omega)}. \quad (4)$$

Однако такое простое и элегантное решение задачи идентификации не может быть применено к идентификации объектов управления, находящихся в составе САУ, показанной на рис. 1. Причина состоит в нарушении основной предпосылки о независимости входного воздействия от возмущения. Действительно, здесь изменение входного воздействия (управляющего воздействия μ), относительно которого происходит оценка модели объекта, как раз и происходит (посредством регулятора) вследствие действия возмущения v . Применение метода, разработанного для структуры, представленной на рис. 2, к структуре системы, изображенной на рис. 1, может служить наглядным примером фактического непонимания необходимости применения системного подхода к решению задачи идентификации объекта. Покажем, к чему это приводит.

В рассматриваемой структуре управляющее воздействие $\mu(t)$ является не входным воздействием, а выходной величиной системы, зависимой от входных воздействий $u(t)$, $v(t)$. После элементарных выкладок можно получить следующие соотношения:

$$\begin{aligned} G_{\mu u}(\omega) &= \Phi_{\mu u}(-j\omega)\Phi_{\mu u}(j\omega)G_{uu}(\omega) + \\ &+ \Phi_{\mu v}(-j\omega)\Phi_{\mu v}(j\omega)G_{vv}(\omega); \\ G_{yu}(j\omega) &= \Phi_{yu}(-j\omega)\Phi_{\mu u}(j\omega)G_{uu}(\omega) + \\ &+ \Phi_{yv}(-j\omega)\Phi_{\mu v}(j\omega)G_{vv}(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

В этих формулах спектральные плотности мощности являются Фурье-изображениями корреляционных функций с соответствующими индексами, а передаточные функции замкнутой системы определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} \Phi_{\mu u}(s) &= \frac{W_p(s)}{1+W_p(s)W_\mu(s)}; \quad \Phi_{yu}(s) = \frac{W_p(s)W_\mu(s)}{1+W_p(s)W_\mu(s)}; \\ \Phi_{\mu v}(s) &= -\frac{W_p(s)}{1+W_p(s)W_\mu(s)}; \quad \Phi_{yv}(s) = \frac{1}{1+W_p(s)W_\mu(s)}. \end{aligned} \quad (6)$$

После подстановки этих выражений в (5), а затем (после замены $G_{uu}(s) = G_{xx}(s)$ и $G_{yu}(s) = G_{yx}(s)$) в (4) получим

$$W(j\omega) = \frac{W_\mu(j\omega)G_{uu}(\omega) - G_{vv}(\omega)/W_p(j\omega)}{G_{uu}(\omega) + G_{vv}(\omega)}, \quad (7)$$

где $W_\mu(s)$ и $W_p(s)$ – передаточные функции объекта и регулятора.

Как видим, правая часть полученной формулы вовсе не равна ожидаемой КЧХ объекта $W_\mu(j\omega)$ – эта характеристика входит в состав довольно сложного выражения, выделить из которого ее не представляется возможным (прежде всего из-за невозможности оценить спектральную плотность недоступного для контроля эквивалентного возмущения $v(t)$). Только при отсутствии этого возмущения, когда $G_{vv}(\omega) = 0$, будет получена КЧХ объекта. Но в этом случае объект становится детерминированным, и отпадает необходимость в применении математической статистики (как, впрочем, и обратной связи в структуре САУ).

Специально следует обратить внимание на очень распространенный случай систем автоматического регулирования с постоянным заданным значением регулируемых величин, когда в формуле (7) $G_{xx}(\omega) = 0$. Результат окажется неожиданным:

$$W(j\omega) = -\frac{1}{W_p(j\omega)}. \quad (8)$$

Вместо оценки КЧХ модели объекта получается обратная с отрицательным знаком КЧХ регулятора.

Изложенное препятствие (зависимость входного идентифицирующего воздействия от возмущений) может быть устранено, если только в качестве входного воздействия выбрать задающее воздействие $u(t)$ для всей системы (предполагая, конечно, что оно не зависит от возмущений, действующих на объект).

Структура адаптивной САУ в этом случае приобретает вид, указанный на рис. 3. Правда в этом случае будет произведена оценка КЧХ всей системы управления $\Phi_{yu}(j\omega)$, но из нее достаточно просто может быть найдена и модель объекта:

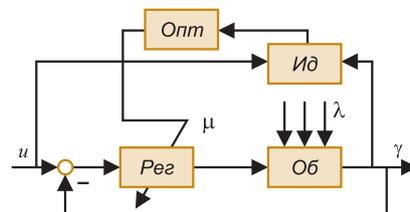


Рис. 3

Структура адаптивной САУ в этом случае приобретает вид, указанный на рис. 3. Правда в этом случае будет произведена оценка КЧХ всей системы управления $\Phi_{yu}(j\omega)$, но из нее достаточно просто может быть найдена и модель объекта:

$$W_\mu(j\omega) = \frac{1}{W_p(j\omega)} \frac{\Phi_{yu}(j\omega)}{1 - \Phi_{yu}(j\omega)}. \quad (9)$$

В качестве независимого идентифицирующего воздействия может быть также использовано возмущение, входящее в объект по одному каналу с управляющим воздействием (если, конечно, такое возмущение удастся обнаружить).

К сожалению, подобная принципиальная возможность идентификации по записям входных воздействий для всей САУ наталкивается еще на одну трудность. Она связана с практически всегда недостаточной шириной спектра входного воздействия в удовлетворительно функционирующих САУ. Дело в том, что поиск оптимальной системы по тому или иному показателю точности должен ограничиваться сохранением должного запаса устойчивости ее замкнутого контура. Но это требу-

ет знания свойств системы в диапазоне резонансной частоты контура. В то же время, для точной работы системы основной вес спектральной плотности мощности ее входных воздействий должен приходиться на низкочастотный участок КЧХ САУ, который, как правило, даже близко не подходит к резонансной частоте.

Эта особенность САУ была проиллюстрирована в [4] на примере САУ температурой перегретого пара типичного котла тепловой электростанции и типичной корреляционной функции входного воздействия. Из него следует, что для того, чтобы получить практически обычно требуемую среднеквадратическую ошибку управления, не превышающую 0,05 от среднеквадратического значения задающего воздействия, отношение значения спектральной плотности мощности задающего воздействия, при резонансной частоте контура к ее значению при нулевой частоте, должно составлять ничтожную величину $1,012 \times 10^{-6}$. Соответственно, система просто не будет возбуждена входным сигналом на частотах, требуемых для расчета оптимальных параметров регулятора. Иначе говоря, рассматриваемая задача является примером некорректно поставленной, к которой к тому же оказываются неприменимыми известные методы регуляризации.

Проведенный анализ показывает, что требования точности управления входят в противоречие с требованием идентифицируемости системы по данным нормального функционирования. Поэтому в промышленных адаптивных САУ практически всегда приходится применять специально организованные активные идентифицирующие добавочные воздействия. Заметим, кстати, что приводимое во всех пособиях по ТАУ мнение о достоинствах пассивных методов идентификации, позволяющих, как будто, получать модель объекта не нарушая нормального его функционирования (без подачи активных идентифицирующих воздействий), является сильно преувеличенным. В действительности, как было показано выше, *идентификация главного для последующего синтеза САУ канала объекта — управляющего канала (от свойств которого зависит запас устойчивости контура управления) может быть осуществлена практически только постановкой активного эксперимента* [5]. На долю пассивных методов остаются второстепенные для синтеза САУ каналы действия возмущений, причем, оценка моделей этих каналов может быть осуществлена только если предварительно найдена модель управляющего канала. Действительно, подстановка в формулу (4) взаимной спектральной плотности мощности между возмущающим воздействием и управляемой величиной и спектральной плотности мощности возмущающего воздействия даст КЧХ не искомого канала объекта $W_\lambda(j\omega)$, а КЧХ системы:

$$\Phi_{y\lambda}(j\omega) = -\frac{W_\lambda(j\omega)}{1 + W_p(j\omega)W_\mu(j\omega)},$$

и для получения КЧХ возмущающего канала объекта придется еще выполнить добавочный пересчет:

$$W_\lambda(j\omega) = \Phi_{y\lambda}(j\omega)[1 + W_p(j\omega)W_\mu(j\omega)].$$

Как видим, в правой части этого выражения фигурирует КЧХ управляющего канала $W_\mu(j\omega)$. Таким образом, и для идентификации возмущающих каналов объекта даже тогда, когда природа возмущений не позволяет активно организовывать активное их изменение (например, изменение погодных условий), все равно приходится применять активные воздействия для предварительной идентификации управляющего канала.

Впрочем, в [4, 6] было показано, что при расчетах оптимума настройки обычно применяемых ПИД-регуляторов по практически приемлемому критерию точности управления нет необходимости знать модели каналов возмущений. Этот критерий минимизирует как среднеквадратическое отклонение, так и выбросы управляемой величины при действии возмущений по любому каналу объекта.

Активные идентифицирующие воздействия на систему могут быть не только сигнальными (т. е. связанными с подачей импульсных или синусоидальных воздействий). Идентификация может осуществляться также нелинейным изменением алгоритма функционирования регулятора или изменением структуры системы введением добавочной нелинейной обратной связи, в результате чего система вводится в режим автоколебаний. Все эти методы взаимно дополняют друг друга и должны использоваться в едином пакете программ. Так как активные идентифицирующие воздействия неизбежно ухудшают качество управления во время работы алгоритма адаптации, возникает задача оптимизации самой процедуры адаптации [6, 7]. Опыт свидетельствует, что при грамотном выполнении процесса адаптации с применением методов математической статистики удается добиться относительно небольшого, как правило, приемлемого для практики ухудшения точности работы системы. Вообще же, с обоснованной необходимостью применения активных идентифицирующих воздействий приходится мириться, как пришлось, например, мириться с невозможностью получения энергии с помощью вечного двигателя.

Контур адаптации приходится включать спорадически только через относительно большие интервалы времени, достаточные для оценки модели объекта. Естественно, в течение этого интервала свойства системы должны оставаться практически неизменными. Таким образом, адаптивная система является относительно очень медленнодействующей системой, и применима только тогда, когда свойства объекта меняются относительно очень медленно. Отмеченное обстоятельство заставляет с осторожностью относиться к распространенному определению адаптивной системы, как системы, способной работать при меняющихся свойствах объекта, способной приспосабливаться к этим изменениям. Это определение может быть принято, но с оговоркой, что это изменение должно про-

исходить с крайне малой скоростью. Цель адаптации в процессе эксплуатации системы состоит в подстройке системы при относительно очень медленном изменении свойств объекта и аппаратуры управления, обусловленным таким, например, фактором, как старение материалов. В этой связи полезно отметить, что сферой применения адаптации не является приспособление параметров регулятора к часто встречающимся быстрым изменениям свойств объекта при изменении его нагрузки. Собственно, сама фраза "изменение свойств объекта при изменении его нагрузки" неверна. В принципе никакого изменения свойств объекта в этом случае не происходит. Просто объект является нелинейным и происходит изменение его линейной модели. Устранение такого рода неприятностей следует производить не средствами адаптации, а возможным изменением алгоритма функционирования регулятора в направлении приближения его к нелинейному алгоритму. Чаще всего параметры регулятора связывают с изменением нагрузки заранее найденной зависимостью. Функции адаптации могут быть в этом случае применены не к параметрам регулятора, а к уточнению вида указанной зависимости.

В заключение подчеркнем, что неверным следует считать и представление об отсутствии необходимости в адаптации в САУ с объектами, обладающими

стабильными свойствами. Наличие "системного парадокса" модели объекта [6], а также невозможность учета всех мелких факторов, не позволяют получить надежную модель объекта на этапе проектирования САУ. В результате, адаптация необходима всегда при вводе САУ в действие. Иначе говоря, адаптация должна рассматриваться как необходимая заключительная часть синтеза САУ даже для объектов со стабильными свойствами.

Список литературы

1. Kurz H. Gehobene Methoden der Regelungstechnik für verfahrenstechnische Prozesse // Automatisierungstechnik. Heft 9. 1987.
2. Алексеев А.А., Имаев Д.Х., Кузьмин Н.Н., Яковлев В.Б. Теория управления. Изд. СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 1999.
3. Методы современной теории автоматического управления. Под ред. Н.Д.Егупова. М.: Изд. МГТУ им. Баумана. 2000.
4. Ротач В.Я. Особенности расчета настройки ПИД-регулятора в промышленных системах управления // Автоматизация в промышленности. 2003. № 12.
5. Ротач В.Я. По поводу работ, связанных с идентификацией объектов в условиях их нормального функционирования // Автоматика и телемеханика. 1969. № 6.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоатомиздат. 1985.
7. Автоматизация настройки систем управления / Под ред. В.Я. Ротача. М.: Энергоатомиздат. 1984.

Ротач Виталий Яковлевич — д-р техн. наук, проф. каф. "Автоматизированные системы управления тепловыми процессами" Московского энергетического института (технического университета).

Email: RotachVY@mpei.ru