



## АДАПТАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОЧЕЧНЫХ И ИНТЕРВАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

В.Я. Ротач (Московский энергетический институт (технический университет))

Рассматривается оперативная адаптация систем автоматического управления с использованием точечных алгоритмов, оценка фиксированных параметров которых производится на стадии ввода системы в эксплуатацию с помощью интервальных алгоритмов.

Ключевые слова: точечные и интервальные алгоритмы адаптации, параметры модели, системы автоматического управления, подстройка регуляторов, помехи, период колебания.

В [1, 2] рассмотрены интервальные алгоритмы адаптации, в которых в отличие от точечных алгоритмов используются настраиваемые модели объектов с четырьмя свободными параметрами вида:

$$W_{mod}(s) = \frac{k_{mod} \exp(-\tau_{mod} s)}{(\tau_{mod} \beta s + 1)^{n_{mod}}}. \quad (1)$$

Определение численных значений четырех параметров модели  $k_{mod}$ ,  $\tau_{mod}$ ,  $\beta$ ,  $n_{mod}$  производится из условия совпадения комплексных частотных характеристик (КЧХ) объекта и модели в двух точках – на концах интервала  $[\omega_{min}, \omega_{max}]$ . Границы интервала выбираются так, чтобы он принадлежал существенному для настраиваемой системы автоматического управления (САУ) диапазону частот  $\omega$ .

Интервальную адаптацию в большинстве случаев целесообразно выполнять только при пуске САУ, а также сравнительно редко в процессе ее эксплуатации. Для оперативной подстройки регуляторов в процессе их эксплуатации обычно могут быть использованы более простые точечные алгоритмы, в которых приближение КЧХ объекта и модели осуществляется лишь на одной частоте при фиксированных значениях параметров  $\beta$  и  $n_{mod}$ , найденных с помощью интервальных алгоритмов.

Процедуру взаимодействия интервального и точечного алгоритма покажем на примере настройки системы с ПИ регулятором по свободному движению ее замкнутого контура, вызванному ненулевыми начальными условиями [3]. Изложение порядка выполнения экспериментов и расчетов будет иллюстрироваться примером с тем же объектом, что и в [1, 2]:

$$W_{\mu}(s) = \frac{\exp(-1,8s)}{(6s+1)(18s+1)}. \quad (2)$$

При выполнении расчетов будут даны ссылки на соответствующие программы в среде MathCad из [3], где они представлены в доступном для неподготовленного пользователя виде. Эти программы в "живом" (то есть работающем на ПК читателей) виде продублированы на сайте <http://acswww.mpei.ac.ru> под теми же номерами рисунков. Ссылки на них будут обозначаться как "Internet – рис. \_".

### Интервальный алгоритм адаптации

Разработка интервального алгоритма требует экспериментальной оценки двух векторов КЧХ замкнутого контура САУ. В принципе это может быть сделано как вводом контура в режим автоколебаний, так и подачей гармонических воздействий от ГСК. Метод автоколебаний обладает тем преимуществом, что при его применении частота автоколебаний выбирается системой самостоятельно из диапазона, который является для системы существенным. Кроме того, при применении этого метода нет опасения, что система будет работать неустойчиво при проведении экспериментов. К сожалению, он весьма чувствителен к действию случайных помех и возмущений, которые безнадёжно искажают форму автоколебаний и могут даже привести к их срыву. Поэтому в [1] оценка векторов КЧХ производится сначала методом автоколебаний, а затем уточняется с помощью ГСК.

Оценка начальной частоты может быть выполнена и без обращения к методу автоколебаний. Это может быть сделано выводом работающей САУ с ПИ регулятором в колебательный режим увеличением коэффициента передачи регулятора при значении постоянной интегрирования, заведомо большим ее оптимального значения. При этом нет необходимости доводить систему до появления незатухающих колебаний, достаточно, чтобы их степень затухания оказалась близкой к 0,5. Практически эту процедуру удобно выполнить следующим образом. После установки равновесного режима работы САУ переводится кратковременно на дистанционное управление, с помощью которого регулирующий орган быстро перемещается на некоторую величину, после чего регулятор вновь включается в работу. По указателю положения регулирующего органа регистрируется процесс его возвращения в исходное положение, из которого определяется частота возникших колебаний. С помощью ГСК оцениваются вектора КЧХ замкнутого контура САУ для этой частоты, а также для частоты, в два-три раза отличающейся от нее.

На рис. 1 показан результат моделирования такого эксперимента в виде графика перемещения регули-

ющего органа при начальном его изменении на единицу и настройке ПИ регулятора  $T_i=1000$ ;  $k_p=10$ . Моделирование выполнено с помощью программы "Internet – пус. 5.8" (естественно, при измененной в соответствии с (2) передаточной функцией). Период колебаний оказался равным  $T = 23.2$ . Он может служить ориентиром при выборе первого периода колебания, подаваемого на САУ от ГСК для получения модели объекта с четырьмя параметрами. Заметим только, что прежде чем выполнять эксперимент по оценке вектора КЧХ объекта с помощью ГСК, полезно уменьшить значение установленного в регуляторе коэффициента передачи так, чтобы колебания свободного движения замкнутого контура системы были невелики. Это нужно сделать потому, что указанный эксперимент будет происходить при частоте, близкой к резонансной частоте контура, и поэтому можно ожидать появления на выходе системы колебаний со слишком большой амплитудой. Кроме того, может оказаться длительным и процесс установления колебаний на выходе САУ.

На рис. 2,а показаны графики процессов на входе/выходе САУ при подаче на вход САУ со стороны задатчика регулятора синусоидального воздействия от ГСК с периодом  $T = 23$ , а на рис. 2,б – при вдвое большем периоде колебаний  $T = 46$  (входное колебание обозначено цифрой 1, выходное – цифрой 2). В обоих случаях в регуляторе была установлена настройка  $T_i = 1000$ ;  $k_p = 2$ . В результате получены два вектора КЧХ объекта  $W_{\mu}(j0,137) = 0,29\exp(-j2,14)$  и  $W_{\mu}(j0,273) = 0,1\exp(-j2,91)$ . В расчетах используется программа "Internet пус. 10.19". Она помимо моделирования колебаний позволяет выполнить оценку необходимого числа периодов колебаний и устранить из рассмотрения начальный переходный процесс установления колебаний. Для фильтрации возможных помех из колебаний выделяется первая гармоника разложения в ряд Фурье:

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^{nT} y(t) \sin \frac{2\pi}{T} dt; \quad b_1 = \frac{2}{T} \int_0^{nT} y(t) \cos \frac{2\pi}{T} dt, \quad (3)$$

после чего вектор КЧХ замкнутого контура системы и объекта определяется по формулам:

$$\Phi(j\omega) = \frac{a_1 + jb_1}{A_x}; \quad (4)$$

$$W_{\mu}(j\omega) = \frac{1}{R(j\omega)} \frac{\Phi(j\omega)}{1 - \Phi(j\omega)}, \quad (5)$$

где:  $A_x$  – амплитуда входного сигнала,  $R(j\omega)$  – КЧХ регулятора. Поскольку в примере помехи отсутству-

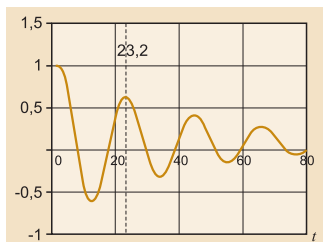


Рис. 1

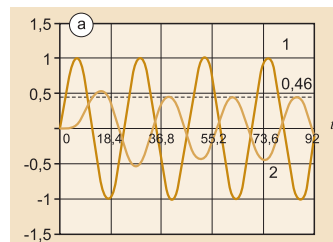


Рис. 2

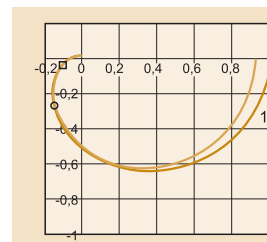
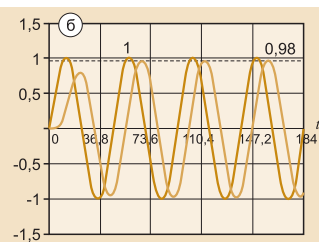


Рис. 3

*Наука - это в лучшем случае здравый смысл - строго точный в наблюдении и милосердный к ошибкам в логике.*

Томас Генри Гексли

ют, обрабатывается только один последний период колебания.

Определение всех параметров модели объекта (1) требует решения системы уравнений для модулей и аргументов КЧХ модели объекта:

$$A_1 = \frac{k_{\text{мод}}}{(\beta^2 \tau_{\text{мод}}^2 \omega_1^2 + 1)^{0,5n}},$$

$$\varphi_1 = -\arctg(\beta \tau_{\text{мод}} \omega_1) - \tau_{\text{мод}} \omega_1,$$

$$A_2 = \frac{k_{\text{мод}}}{(\beta^2 \tau_{\text{мод}}^2 \omega_2^2 + 1)^{0,5n}},$$

$$\varphi_2 = -\arctg(\beta \tau_{\text{мод}} \omega_2) - \tau_{\text{мод}} \omega_2.$$

После некоторых преобразований [3] из этой системы может быть получено уравнение для определения безразмерного параметра  $x$ :

$$\frac{2 \ln \frac{A_1}{A_2}}{\ln \frac{b^2 x^2 + 1}{x^2 + 1}} = \frac{\varphi_2 - b\varphi_1}{b \arctg x - \arctg(bx)}, \quad (6)$$

где  $b = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ ;

далее расчет параметров модели осуществляется по формулам:

$$n = \frac{\varphi_2 - b\varphi_1}{b \arctg(x) - \arctg(bx)};$$

$$\tau_{\text{мод}} = -\frac{1}{\omega_1} [\varphi_1 + n \arctg(x)];$$

$$\beta = -\frac{x}{\tau_{\text{мод}} \omega_1}; \quad (7)$$

$$k_{\text{мод}} = A_1 (x+1)^{0,5n} \quad k_{\text{мод}} = A_1 (x+1)^{0,5n}.$$

Получаемое значение  $n$  необязательно окажется целым числом.

Решение уравнения (7) для модели объекта (1) может быть выполнено программой "Internet пус. 10.25"; результат расчетов оказался следующим:

$$n_{\text{мод}} = 1,8; \quad \beta = 5,19; \quad \tau_{\text{мод}} = 2,27; \quad k_{\text{мод}} = 0,93.$$

Годографы КЧХ объекта (2) и его модели (1) приведены на рис. 3 (кривые 1 и 2 соответственно); "кружком" и "коробочкой" отмечены точки интерпо-

лянии. Как видим, характеристики хорошо совпадают в области существенных частот (в пределах третьего квадранта комплексной плоскости)

После определения модели объекта оптимум настройки регулятора может быть найден любым подходящим методом. В частности, настройка ПИ регулятора по критерию минимума среднеквадратичной ошибки или минимума выбросов при низкочастотных воздействиях и ограничении на корневой показатель колебательности  $m \geq 0,366$  (что соответствует ограничению на степень затухания доминирующей компоненты колебаний  $\Psi \geq 0,9$ ) может быть найден по программе "Internet – пус. 5.6". Результат расчета:  $k_p^{opt} = 2,34$ ;  $T_i^{opt} = 14,2$ , частота доминирующих колебаний  $\omega_{dom} = 0,129$ . Для сравнения укажем на результат подобного расчета, выполненный по действительной КЧХ объекта (2):  $k_p^{opt} = 2,45$ ;  $T_i^{opt} = 13,5$ , частота доминирующих колебаний  $\omega_{dom} = 0,133$ . Графики процессов регулирования при ступенчатом воздействии со стороны регулирующего органа для этих параметров настройки приведены на рис. 4 (обозначены цифрой 1) – они практически наложились друг на друга.

**Точечный алгоритм адаптации по переходной характеристике замкнутого контура**

Допустим теперь, что САУ функционирует и требуется проверить соответствие ее настройки оптимуму с помощью точечного алгоритма адаптации. Эксперимент по определению свободного движения САУ при существующей настройке регулятора и ненулевых начальных условиях был описан выше. Результатом эксперимента являются период колебаний  $T$  и степень затухания процесса:

$$\Psi = 1 - A_1/A_0, \tag{8}$$

где  $A_0$  начальное отклонение,  $A_1$  – первая, направленная в ту же сторону, амплитуда колебания. Этих данных при известных фиксированных значениях параметров  $\beta$ ,  $n_{mod}$ , а также известных параметрах настройки регулятора достаточно, чтобы найти два остальных параметра модели (1)  $\tau_{mod}$ ,  $k_{mod}$  путем решения уравнения:

$$W_{mod}(s) R(s) k_p = -1, \tag{9}$$

где  $s = -m\omega + j\omega$ ,  $R(s) = 1 + \frac{1}{T_i s}$ ,  $m = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{1-\Psi}\right)$ .  $\tag{10}$

Это комплексное уравнение может быть заменено двумя вещественными: уравнением аргументов и уравнением модулей:

$$\begin{aligned} \arg\left(\frac{1}{(\beta \tau_{mod} s + 1)^{n_{mod}}}\right) + \arg(R(s)) - \omega \tau_{mod} &= -\pi; \\ \left|\left(\frac{1}{\beta \tau_{mod} s + 1}\right)^{n_{mod}}\right| |R(s)| \exp(m\omega) k_p k_{mod} &= 1. \end{aligned} \tag{11}$$

Из первого уравнения находится значение запаздывания  $\tau_{mod}$  (для чего можно модифицировать программу "Internet – пус. 10.7"), а затем по второй формуле находится  $k_{mod}$ . Тем самым модель объекта с четырьмя параметрами полностью определена, и по формулам (10) известными методами [3] могут быть найдены параметры настройки регулятора. Эта задача может быть существенно упрощена, если результаты интервального алгоритма представить в безразмерном виде:

$$K^{opt} = k_p^{opt} k_{mod}; I^{opt} = T_i^{opt} / \tau_{mod}; \Omega_{dom} = \omega_{dom} \tau_{mod}. \tag{12}$$

После уточнения свободных параметров модели  $k_{mod}$  и  $\tau_{mod}$  реальные параметры настройки регулятора и ожидаемая частота собственных колебаний определяются по предельно простым формулам:

$$k_p^{opt} = \frac{K^{opt}}{k_{mod}}; T_i^{opt} = I^{opt} \tau_{mod}; \omega_{dom} = \frac{\Omega_{dom}}{\tau_{mod}}. \tag{13}$$

При практических расчетах последнюю формулу удобнее записать в виде отношения периода колебаний при оптимуме настройки к установленной в регуляторе постоянной времени интегрирования:

$$\frac{T_{dom}}{T_i^{opt}} = \frac{2\pi}{\Omega_{dom} I^{opt}}. \tag{14}$$

Последняя формула может служить добавочным критерием пригодности принятой модели объекта, который может быть сформулирован следующим образом: настройка оптимальна, если свободный процесс возвращения выходной величины замкнутого контура имеет требуемую степень затухания доминирующей компоненты, а период колебаний удовлетворяет формуле (14).

В частности, для рассматриваемого численного примера:

$$\begin{aligned} K_p^{opt} &= 2,16; I^{opt} = 6,26; \\ \Omega_{dom} &= 0,29; \frac{T_{dom}}{T_i^{opt}} = 3,42. \end{aligned} \tag{15}$$

Проверим соответствие найденной в интервальном алгоритме настройки регулятора  $k_p^{opt} = 2,34$ ;  $T_i^{opt} = 14,2$  сформулированному критерию. Для этого следует по-

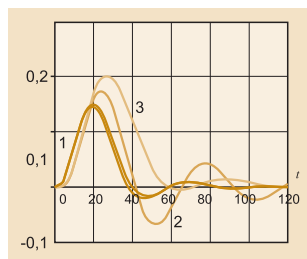


Рис. 4

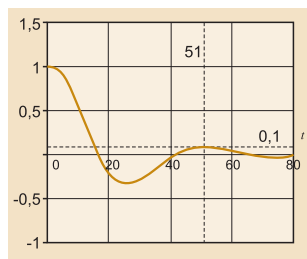


Рис. 5

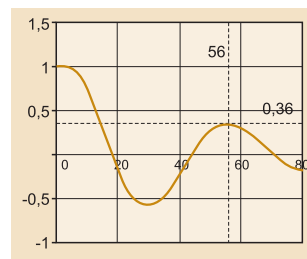


Рис. 6

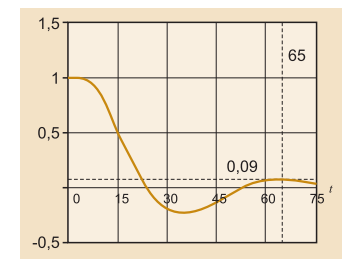


Рис. 7

строить график процесса возвращения к исходному значению выходной величины контура (регулирующего воздействия) после его начального единичного отклонения. Такой график показан на рис. 5 (использована программа построения графика на рис. 1). Степень затухания процесса и относительная величина периода колебаний оказались (с учетом приближенного характера визуальной оценки этих показателей) достаточно близкими к требуемым:  $\psi = 0,9$ ,  $T_{dom}/T_i^{opt} = 3,59$ .

Допустим теперь, что через некоторое время эксплуатации САУ произошло естественное ухудшение динамических свойств объекта (например, из-за зашлаковки поверхностей нагрева объекта), которое можно представить как появление в формуле (2) добавочного аperiodического звена с постоянной времени, равной, например,  $T_f = 3$ . Процесс регулирования при возмущении со стороны регулирующего органа на рис. 4 будет теперь изображаться кривой 2, а свободное возвращение регулирующего органа к равновесному состоянию таким, как на рис. 6. Из последнего графика следует, что степень затухания процесса уменьшилась до  $\psi = 0,64$  при периоде колебаний  $T = 56$ . Обращение к формулам (11) дает следующие значения свободных параметров модели:  $\tau_{mod} = 3,16$ ;  $k_{mod} = 1,25$ , а расчет по формулам (13-15):  $k_p^{opt} = 1,69$ ;  $T_i^{opt} = 20,04$ . График возвращения регулирующего воздействия к установившемуся значению при этой настройке приведен на рис. 7. Видно, что затухание процесса оказалось практически равным ожидаемому значению  $\psi = 0,9$ , хотя период колебаний  $T_{dom}/T_i^{opt} = 3,22$  несколько отличается от желаемого. График процесса регулирования при такой настройке на рис. 4 изображен кривой 3.

Рассмотренные алгоритмы адаптации могут быть встроены не только в математическом обеспечении

САУ, но записаны в ноутбуки наладочного персонала для использования их при "ручной" настройке регуляторов. В последнем случае значения фиксированных параметров модели объекта с четырьмя параметрами могут быть найдены экспериментально по оценке его переходной характеристики [3].

В заключение следует обратить внимание на то, что в появляющихся публикациях об адаптации по переходным характеристикам САУ все чаще такие методы начинают называть пассивными, обосновывая это тем, что ступенчатые воздействия могут происходить и при отсутствии активного вмешательства в работу системы. К такому заявлению следует относиться с определенной осторожностью. Наличие ступенчатого возмущения еще недостаточно для надежной оценки модели объекта – необходимо еще суметь его обнаружить, оно должно входить в систему по нужным каналам, ему должно предшествовать невозмущенное состояние системы (нулевые начальные условия) в течение достаточно большого времени памяти объекта. Надежнее все же ориентироваться на реальность, по-прежнему относя их (как это было сделано изначально [4]) к числу активных, хотя, конечно, если такой счастливый случай при нормальной работе системы произойдет, им не следует пренебрегать.

#### Список литературы

1. Ротач В.Я. Интервальные итерационные алгоритмы адаптации // Автоматизация в промышленности. 2007. № 7.
2. Ротач В.Я. Интервальные итерационные алгоритмы адаптации ПИД регуляторов // Там же. 2007. № 9.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательский Дом МЭИ. 2004, 2006, 2007.
4. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1961.

*Ротач Виталий Яковлевич – д-р техн. наук, проф. кафедры АСУ тепловых процессов Московского энергетического института (технического университета).*

*Контактный телефон (495) 362-70-29.*

*E-mail: RotachVY@mpei.ru*

#### НОВАЯ КНИГА

**Э.Л. Ицкович "Методы рациональной автоматизации производства"**

*Объем 240 стр., твердый переплет, А5, тираж - 2000 экз. Издательство "Инфра-Инженерия" (Москва). Книга выйдет в свет в середине декабря 2008 г. Стоимость 550 руб.*

Книга является обобщением консалтинговых работ автора и разработанных им методов автоматизации, выполненных в последние годы и прошедших успешную апробацию на промышленных предприятиях. В ней рассматривается широкий круг задач, нацеленный на реализацию эффективной автоматизации промышленных объектов и, в частности:

- направления развития средств и систем автоматизации;
- анализ существующего рынка программных и технических средств автоматизации и позиционирование на нем российских участников;
- положения по конкретизации и полноте технических условий (заданий) на различные средства/системы автоматизации;
- прогноз эффективности предлагаемых систем автоматизации;
- метод организации и проведения конкурсов (тендеров) для выбора средств/систем автоматизации;
- аудит эффективности эксплуатируемых систем автоматизации;
- методика достижения рационального уровня автоматизации производства;

- методика распределения выделенных финансовых ресурсов на отдельные проекты автоматизации.

Особое внимание уделяется объективности всех принимаемых решений (исключению волонтаризма) при автоматизации производства и практической реализуемости предлагаемых методов.

По содержанию, форме изложения, используемому языку книга рассчитана на сотрудников служб автоматизации предприятий; на специалистов по автоматизации в инженеринговых фирмах, проектных институтах, НИИ и ОКБ; на разработчиков и производителей средств и систем автоматизации; на персонал консалтинговых организаций и системных интеграторов в области автоматизации.

Книга может использоваться преподавателями институтов в качестве учебного пособия по курсам автоматизации, а также аспирантами и научными работниками в областях автоматизации и информатизации предприятий, поскольку дает срез современного состояния автоматизации производства и предлагает методы ее развития с учетом возможностей современных программных и технических средств и имеющихся у предприятий финансовых ресурсов.

*Заявки на приобретение направляйте на E-mail: infra-e@yandex.ru или по телефону 8(911)512-48-48.*