



## НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗ ИХ АППРОКСИМАЦИИ АНАЛИТИЧЕСКИМИ ВЫРАЖЕНИЯМИ

В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, С.В. Петров (МЭИ)

*Предлагается метод адаптации настройки ПИ и ПИД-регуляторов по переходным характеристикам работающих систем управления. Преобразование переходных характеристик в частотные производится без предварительной аппроксимации аналитическими выражениями. Последующее определение оптимума настройки регуляторов производится известными методами. Возможно использование программ расчета, имеющихся в Internet.*

*Ключевые слова: адаптация, ПИД-регулятор, настройка, модель, критерий оптимальности, система управления, инвариантность.*

Одно из важных направлений теории и практики автоматического управления связано с адаптацией регуляторов, функционирующих либо автономно, либо в составе систем автоматического управления, образуя подсистему автоматического регулирования [1]. Среди известных методов адаптации здесь не исчезает интерес к методам, основанным на экспериментальной оценке моделей объектов в виде их переходных характеристик. Этот интерес можно объяснить, прежде всего, тем, что подобный подход к адаптации по существу имитирует общепринятый в среде инженеров-наладчиков "ручной" метод настройки, когда настройка подбирается экспертно именно по переходной характеристике действующей системы.

Имеются, однако, и объективные причины использования на практике этих методов. Их достоинством является относительно малая продолжительность эксперимента по оценке переходных характеристик (если, конечно, удается избавиться от искажающего действия помех). Это их свойство особенно важно при адаптации систем управления нелинейными объектами. Для таких объектов (которых в системах управления ТП, по-видимому, большинство) хотя и могут быть построены линейные модели, но эти модели детерминированным образом меняются в процессе нормального функционирования объекта. Речь, в частности, идет об объектах, линейные модели которых меняются с изменением их нагрузки, например, энергоблоки электростанций. В САУ такими объектами применяется либо так называемая компромиссная настройка, то есть настройка, соответствующая наиболее неблагоприятному случаю, либо настройка, меняющаяся при изменении нагрузки по заранее установленной детерминированной зависимости. В обоих случаях процесс определения настройки в выбранных характерных точках предполагает сохранение нагрузки объекта на заданном уровне в течение всего времени адаптации, требуя от обслуживающего персонала мобилизации всех средств устранения случайных помех и возмущений. Естественно, что длительность экспериментов по оценке моделей объектов в

этих условиях приобретает решающее значение при выборе метода адаптации. Статистические методы оценок, требующие довольно длительных интервалов наблюдения, здесь теряют смысл, поскольку в лучшем случае они могут дать лишь некоторое, скорее всего непредставительное усреднение по диапазону возможного изменения нагрузки.

Основная трудность практического использования методов настройки по переходным характеристикам замкнутой системы состоит в сложности (в отличие от частотных характеристик) непосредственного получения из них модели объекта, которая собственно и нужна для расчета оптимума настройки регуляторов. С этой целью экспериментальную переходную характеристику замкнутой системы приходится аппроксимировать подходящим аналитическим выражением, которое позволит представить результат эксперимента в частотной области. Она из первых попыток сделать это была предпринята в [2, 3], где информация о переходной характеристике определялась значениями периода ее колебаний и степеней их затухания. Это позволило выбрать модель объекта, обладающую только двумя свободными параметрами. Была выбрана модель в виде интегрирующего звена с запаздыванием, что во многих случаях недостаточно, и приходилось усложнять структуру модели путем, например, предварительной оценки переходной характеристики отдельно взятого объекта [1]. Подобный способ аппроксимации является приближенным еще и потому, что определение параметров системы по степени затухания колебательных процессов, строго говоря, допустим только для систем второго порядка без запаздывания. Несмотря на появившиеся другие публикации по настройке регуляторов по переходным характеристикам системы, более точную и достаточно надежную аппроксимацию (без привлечения добавочных источников информации), по-видимому, не удалось найти и до настоящего времени.

Ниже предлагается сделать перестроение экспериментальной переходной характеристики замкну-

той системы в частотную сразу же после ее оценки, без промежуточной аппроксимации аналитическим выражением. Для этого может быть использован метод построения векторов комплексной частотной характеристики (КЧХ) системы по его переходной характеристике [3] имитацией известного экспериментального способа оценки вектора КЧХ, когда на вход исследуемой системы подается не синусоидальное воздействие, а воздействие в виде прямоугольных колебаний. После получения двух векторов КЧХ методом, изложенным в [1, 4], производится выбор математической модели объекта с четырьмя коэффициентами. Как показывает практика, этого достаточно для настройки ПИ и ПИД-регуляторов, если, конечно, вектора принадлежат существенному диапазону частот. Результат расчета может быть проверен и, если нужно, уточнен повторным расчетом.

Начинать саму процедуру адаптации можно так, как это делается в известном методе настройки ПИ и ПИД-регуляторов Циглера-Николса [5]. Напомним, что при использовании этого метода система регулирования вводится в действие с регулятором, имеющим П закон регулирования, при значении коэффициента передачи, обеспечивающим заведомо устойчивую ее работу. После этого постепенным увеличением этого коэффициента добиваются возникновения незатухающих колебаний (вывода системы на границу устойчивости) с фиксацией критического значения коэффициента передачи регулятора  $k_p^{opt}$  и периода незатухающих колебаний  $T^{kr}$ . Оптимум настройки находится по следующим простым формулам: ПИ-регулятор — коэффициент передачи  $K_p^{opt} = 0,45k_p^{kr}$ , постоянная времени интегрирования  $T_i^{opt} = T^{kr}/1,2$ , ПИД-регулятор — коэффициент передачи  $k_p^{opt} = 0,6k_p^{kr}$ , постоянная времени интегрирования  $T_i^{opt} = T^{kr}/2$ , постоянная времени дифференцирования  $T_d^{opt} = T^{kr}/8$ .

Очевидным недостатком метода является необходимость вывода действующей в реальных эксплуатационных условиях системы на границу устойчивости. По понятным причинам следует ожидать, что попытка сделать это в большинстве случаев вызовет резко негативную реакцию оперативного обслуживающего персонала объектов управления особенно таких, как энергоблоки тепловых электростанций (об атомных, по-видимому, вообще не может быть речи). Кроме того, метод является заведомо приближенным. Необходимость ручного уточнения настройки после его применения всегда специально оговаривается, однако нет гарантии, что полученное приближение к оптимуму действительно облегчит дальнейшее уточнение.

В отличие от метода Циглера-Николса в предлагаемом ниже методе начальная настройка П-регулятора выбирается так, что *система начинает работать не на границе устойчивости, а на границе апериодичности, при слабо выраженной колебательности переходной характеристики ее замкнутого контура, причем конкретное значение степени затухания не имеет значения, поскольку этот показатель в дальнейшем использоваться не будет.*

Подчеркнем, что оперировать следует именно с замкнутым контуром системы, то есть вход/выход системы выбираются так, что выходная величина подается на вход через единичную обратную связь. Обычно замкнутый контур рассматривается при входном воздействии в виде задания регулятору, а выходной величиной принимается регулируемая величина. Соответственно и переходная характеристика контура оценивается путем ступенчатого изменения задания регулятору и записью вызванного таким воздействием изменением регулируемой величины системы (при включенном регуляторе). Однако это не единственный способ выделения из структуры системы ее замкнутого контура. Часто при экспериментальной оценке переходной характеристики контура предпочтение следует отдать выбору входного воздействия в виде возмущения со стороны регулирующего органа, а выходной — вызванное таким воздействием перемещение регулирующего органа. Реализация подобного рода возмущения осуществляется достаточно просто. Для этого следует, после установления равновесного режима работы системы автоматического регулирования, перевести ее в режим ручного или дистанционного управления, быстро переместить регулирующий орган в некоторое новое положение и вновь включить регулятор в работу, позволив ему возвратить систему в равновесный режим. Запись этого процесса возвращения позволяет легко построить график переходной характеристики контура: для этого достаточно вычесть указанный график из его собственного начального изменения. Таким способом обычно можно существенно уменьшить отклонение регулируемой величины в процессе проведения эксперимента.

Необходимость оценки переходной характеристики именно замкнутого контура определяется тем, что только из этой характеристики может быть получена модель регулирующего канала объекта, свойства которого определяют важнейший показатель работоспособности системы — интенсивность затухания колебаний, способных возникнуть в замкнутом контуре (этот показатель обычно принято называть запасом устойчивости).

На этом операции с действующим объектом заканчиваются — дальнейшая работа перемещается на системный компьютер или ноутбук наладчика с заранее записанными программами расчетов, представленными ниже.

1. Методом наложения сдвинутых во времени переходных характеристик системы с последующим выделением первой гармоники ряда Фурье вычисляются два вектора КЧХ замкнутого контура, а затем и регулирующего канала объекта  $W_{об}(j\omega_1)$  и  $W_{об}(j\omega_2)$ . Частота  $\omega_1$  выбирается примерно равной частоте затухающих колебаний найденной экспериментальной переходной характеристики системы, а частота  $\omega_2$  в 2...3 раза большей или меньшей.

2. Задавшись экспертно структурой передаточной функции модели объекта с четырьмя коэффициентами, например, в виде:

$$W_{mod}(s) = \frac{k \exp(-\tau s)}{(\beta \tau s + 1)^n}, \quad (1)$$

определяются их численные значения так, чтобы произошло совпадение КЧХ модели и объекта при указанных частотах.

3. Обычным порядком по этой модели находятся оптимальные параметры ПИ или ПИД-регулятора, с которыми он включается в работу.

1. *Перестроение переходной характеристики в частотную.*

Как уже указывалось, суть используемого метода построения вектора КЧХ системы по его переходной характеристике состоит в имитации известного экспериментального способа оценки вектора КЧХ, когда на вход исследуемой системы подается не синусоидальное воздействие, а воздействие в виде прямоугольных колебаний с периодом  $T$ . Из полученной реакции системы на подобное периодическое воздействие выделяется первая гармоника разложения в ряд Фурье:

$$y_1(t) = a \sin \frac{2\pi}{T} t + b \cos \frac{2\pi}{T} t = A_y \sin \left( \frac{2\pi}{T} t + \varphi_y \right),$$

где

$$a = \frac{2}{T} \int_0^T y_1(t) \sin \frac{2\pi}{T} t dt; \quad b = \frac{2}{T} \int_0^T y_1(t) \cos \frac{2\pi}{T} t dt.$$

$$A_y = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad \varphi_y = \arctg \frac{b}{a}. \quad (2)$$

Первая гармоника выходных колебаний может рассматриваться как реакция на первую гармонику входных прямоугольных колебаний, которая представляет собой синусоиду с амплитудой  $(4c/\pi)$ , где  $c$  – величина ступеньки прямоугольных колебаний. Таким образом, вектор комплексной частотной характеристики исследуемой системы при частоте  $\omega = 2\pi/T$  определяется формулой:

$$\Phi(j\omega) = \frac{\pi A_y}{4c} e^{j\varphi_y}. \quad (3)$$

Подобный эксперимент может быть симитирован (выполнен расчетным путем на компьютере), если обратить внимание на то, что прямоугольное колебание может быть представлено суммой ступенчатой функции с наложенными на нее знакопеременными удвоенными ступенчатыми функциями, сдвинутыми последовательно друг от друга на время  $\Delta t = T/2$ . Каждая из таких добавочных ступенчатых функций дает реакцию в виде удвоенных (и соответствующим образом сдвинутых во времени) переходных характеристик, так что реакция системы на прямоугольное колебание может быть представлена суммой:

$$y(t) = h(t) - 2h(t - \Delta t) + 2h(t - 2\Delta t) - 2h(t - 3\Delta t) + 2h(t - 4\Delta t) - \dots =$$

$$= h(t) + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k h(t - k\Delta t).$$

Суммирование можно остановить при нечетном  $n$ , когда результат образует незатухающее колебание (когда

период колебаний целиком располагается в зоне, где переходная характеристика принимает установившееся значение). По формулам (2) находятся коэффициенты первой гармоники разложения в ряд Фурье процесса, образуемого двумя последними слагаемыми, после чего по формуле (3) определяется вектор КЧХ системы  $\Phi(j\omega)$ . В заключение определяется вектор КЧХ объекта  $W_{ob}(j\omega)$ :

$$W_{ob}(j\omega) = \frac{1}{R(j\omega)} \frac{\Phi(j\omega)}{1 - \Phi(j\omega)}. \quad (4)$$

где  $R(j\omega)$  – КЧХ регулятора, при котором производилась оценка переходной характеристики системы.

2. *Определение численных значений коэффициентов модели объекта.*

Для выполнения расчета оптимума настройки ПИ и ПИД-регуляторов достаточно располагать двумя векторами КЧХ объекта на частотах, близких к частоте колебаний экспериментальной переходной характеристики контура. Определение четырех параметров модели (1) может производиться методом интерполирования из условия совпадения векторов объекта и его модели на этих частотах:

$$W_{mod}(j\omega_1, k, n, \tau, \beta) = W_{\mu}(j\omega_1);$$

$$W_{mod}(j\omega_2, k, n, \tau, \beta) = W_{\mu}(j\omega_2).$$

Решение этой системы уравнений может быть произведено следующим образом [1, 4].

Вводится безразмерная частота  $\Omega = \tau \omega_1$  и безразмерная переменная  $x = \beta \Omega$  и составляется уравнение относительно этой переменной:

$$\frac{b \arctn(x) - \arctn(bx)}{\ln \left( \frac{b^2 x^2 + 1}{x^2 + 1} \right)} - \frac{\varphi_2 - b\varphi_1}{2 \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right)} = 0. \quad (5)$$

где  $b = \omega_2/\omega_1$ ,  $A_1 = |W_{\mu}(\omega_1)|$ ,  $A_2 = |W_{\mu}(\omega_2)|$ ,  $\varphi_1 = \arg[W_{\mu}(\omega_1)]$ ,  $\varphi_2 = \arg[W_{\mu}(\omega_2)]$ , причем при индексации следует соблюдать условие  $\omega_2 > \omega_1$ . Когда будет найдено его решение  $X$ , значения коэффициентов модели объекта (1) находятся по формулам:

$$n = \frac{\varphi_2 - b\varphi_1}{b \arctg(X) - \arctg(bX)};$$

$$\Omega = -\varphi_1 - n \arctg(X); \quad \tau = \frac{\Omega}{\omega_1}; \quad (6)$$

$$\beta = \frac{X}{\Omega}; \quad k = A_1(X + 1)^{0.5n}.$$

3. *Расчет оптимальных параметров настройки регулятора.*

Поскольку введение в структуру системы обратной связи имеет своей целью устранение влияния на процесс управления неконтролируемых случайных возмущений [1], критерий оптимальной настройки регулятора может быть сформулирован в следующем виде: настройка системы оптимальная, если минимизируется линейный интегральный критерий при ограничении на величину частотного показателя колебательности  $M$  замкнутого контура системы



$$Q = \int_0^{\infty} h(t) dt \rightarrow \min \text{ при } M \leq M_{\text{дон}}, \quad (7)$$

где  $h(t)$  – переходная характеристика системы относительно любого ее входного воздействия,  $M_{\text{дон}}$  – допустимое значение  $M$ . Вычисление линейного интегрального критерия легко выполняется переходом в область изображений:

$$\int_0^{\infty} h(t) dt = H(s) \text{ при } s = 0,$$

где  $H(s)$  – изображение переходной характеристики системы.

Для систем с реальным ПИД-регулятором, передаточная функция которого может быть представлена в виде:

$$R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right), \quad (8)$$

где  $k_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования,  $T_f$  – постоянная времени сглаживающего фильтра, минимизация линейного интегрального критерия соответствует максимуму коэффициента передачи регулятора при интегральной составляющей:

$$\frac{k_p}{T_i} \rightarrow \max. \quad (9)$$

Это условие сохраняется и для систем с ПИ-регуляторами, передаточная функция которых определяется выражением (8) при  $T_d = 0$ .

Обращение к линейному интегральному критерию оптимальности объясняется его свойством быть одновременно и критерием инвариантности "до  $\epsilon$ ", минимум которого определяет и максимум фильтрующих свойств системы по отношению к любому из возмущений, если входные воздействия на систему имеют низкочастотный характер [1, 3] (широко применяемая в современной теории автоматического управления гипотеза при синтезе желаемых систем управления, примером чему может служить использование низкочастотного фильтра Баттерворса [6]). Выбор такого критерия обусловлен самим определением понятия "регулирование", цель которого (в соответствии с основным тезисом кибернетики о подобии процессов управления в технических и человеко-машинных системах) состоит в устранении отрицательного влияния на процесс управления любого из неконтролируемых случайных возмущений, а также неточности реализации требуемых управляющих воздействий. В структурах современных систем автоматического управления для этой цели выделяются специальные подсистемы автоматического регулирования, обслуживаемые специальным блоком контроллера – автоматическим регулятором [1].

Но, даже если окажется, что среди возмущений найдутся доступные для контроля, но не контролируемые

системой, и анализ покажет возможность улучшения реакции системы на это возмущение, не следует торопиться изменять настройку регулятора. Неизвестно, как подобное изменение отразится на основной функции регулятора – подавлять остальные неконтролируемые возмущения. В этом случае лучше пойти на усложнение информационной структуры системы, введя, например, компенсацию возмущения. Окончательное уточнение структуры и алгоритмов управления следует отложить на стадию ввода системы в эксплуатацию.

В системах регулирования всегда доступен контроль качества регулирования при возмущениях, действующих со стороны регулирующего органа, что достаточно для сравнения возможных вариантов алгоритмов регулирования (следует обратить внимание, что в публикациях по теории автоматического управления подобное возмущение часто считается возмущением по нагрузке объекта, что в большинстве случаев неверно). Но таким способом нельзя судить о действительной точности регулирования, тем более что в современных системах управления обычно подобные возмущения нейтрализуются применением каскадных подсистем регулирования или интеллектуальных исполнительных механизмов.

#### 4. Проверка результата настройки

После выполнения всех перечисленных операций найденная настройка устанавливается в регуляторе, производится оценка переходной характеристики замкнутого контура системы и рассмотренная выше процедура повторяется. Оптимальная настройка считается найденной, если повторный расчет дает близкие результаты.

Изложенную выше адаптацию настройки следует периодически производить и в процессе эксплуатации системы в связи с возможными изменениями свойств объекта и регулятора из-за старения конструктивных материалов, зашлаковки поверхностей нагрева и т. п. Оценку переходной характеристики контура в этом случае следует производить при существующем алгоритме регулятора и его настройке.

#### Список литературы

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательский дом МЭИ. 2004, 2006, 2007, 2008.
2. Ротач В.Я. Расчет настроек промышленных автоматических регуляторов по динамической характеристике системы регулирования. Труды МЭИ, вып. 19, М-Л. Госэнергоиздат. 1957.
3. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. М.: Госэнергоиздат. 1961.
4. Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Бутырев В.П., Солодовников В.Н. Алгоритмы адаптации в системах управления энергоблоками // Теплоэнергетика. 1979. № 8.
5. Ziegler J., Nichols N. Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the A.S.M.E. 1942. November.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления. Под ред Егупова Н.Д. М.: Издательство МГТУ им Н.Э.Баумана. 2000.

**Ротач Виталий Яковлевич** – д-р техн. наук, проф., **Кузицин Виктор Федорович** – канд. техн наук, доцент, **Петров Сергей Викторович** – инженер кафедры АСУТП Московского энергетического института (технического университета). Контактный телефон (499) 726-46-80. E-mail: RotachVY@mail.ru