

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ДВУСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В SCADA-СИСТЕМЕ TRACE MODE 6

В.М. Мазуров (НПП "Прогресс"), Р.Г. Горобченко (Тульский ГУ)

Рассматривается алгоритм адаптивной настройки двух ПИ или ПИД-регуляторов, управляющих линейным двусвязным объектом. В системе идентификации используются активный метод определения параметров объектов, основанный на подаче двух гармонических сигналов.

На сегодняшний день существует достаточно много алгоритмов автонастройки ПИД-регуляторов для односвязных систем управления. На практике чаще всего используются подходы, основанные на стабилизации импульсной характеристики замкнутой системы [1] и автоколебательные системы с реле [2,3]. Использование подобных алгоритмов автонастройки в двусвязных системах не дает желаемых результатов. В таких системах даже при устойчивой автономной работе регуляторов в основных каналах управления вся система может стать неустойчивой за счет действия перекрестных связей в объекте. ПИД-регуляторы с блоками автонастройки не могут работать в режиме непрерывной подстройки параметров регуляторов для постоянно дрейфующих объектов, т.е. они не являются адаптивными регуляторами в широком понимании слова "адаптивные".

Построение адаптивных регуляторов для многосвязных объектов с переменными во времени параметрами представляет собой довольно сложную задачу. Адаптивные системы управления многосвязными объектами базируются на основе развития методов построения одноконтурных адаптивных систем, среди которых выделим: идентификационные адаптивные системы управления с многосвязным регулятором [4]; адаптивные многосвязные системы управления с большим коэффициентом усиления регуляторов [5]; адаптивные системы несвязного управления [6].

В основе идентификационной адаптивной системы управления с многосвязным регулятором лежит дискретная модель многомерного объекта Р-канонической структуры. Оценка вектора параметров объекта выполняется с помощью метода наименьших квадратов. Для непосредственного синтеза оптимального многомерного цифрового регулятора применяют различные критерии оптимизации. Этот подход может быть применен только для квазистационарных объектов управления.

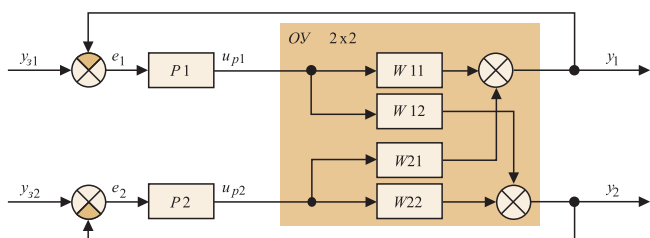


Рис. 1. Структурная схема двусвязной системы управления, где $P1$, $P2$ – автоматические ПИ или ПИД-регуляторы; $W11(p)$, $W22(p)$ – передаточные функции прямых каналов управления; $W12(p)$, $W21(p)$ – передаточные функции перекрестных каналов управления; y_{z1} , y_{z2} – сигналы задания для первого и второго регуляторов, u_{p1} , u_{p2} – сигналы управления с первого и второго регуляторов; y_1 , y_2 – выходные сигналы объекта

Адаптивная многосвязная система управления с большим коэффициентом усиления регуляторов использует принцип управления по отклонению, заложенный в любой системе с обратной связью. В случае многосвязных систем неограниченное увеличение коэффициента усиления приводит не только к способности нейтрализовать изменения внешних воздействий и характеристик ОУ, но и к автономности связанных каналов управления. Однако неограниченное увеличение коэффициента усиления разомкнутой системы приводит к тому, что замкнутая система оказывается неустойчивой. Устойчивость системы достигается путем ввода дополнительных связей между регуляторами, которые должны также обеспечить и желаемые свойства системы. Такой подход трудно применить для объектов с запаздыванием.

Адаптивная система несвязного управления основана на том, что многосвязная система регулирования рассматривается как система какой-либо одной i -ой регулируемой величины, обобщенный объект которой включает действительный объект и все замкнутые контуры с регуляторами других регулируемых величин. Оптимальной в этом случае является такая настройка многосвязной системы регулирования, при которой каждая эквивалентная односвязная система оптимальна. Поиск такой настройки осуществляется последовательно по эквивалентным одномерным системам. Этот подход применим для относительно медленно дрейфующих объектов управления.

Рассмотрим алгоритм адаптивной настройки двух ПИ или ПИД-регуляторов, управляющих двусвязным объектом управления Р – канонической формы (рис. 1). Структура объекта может быть неизвестной, в прямых и перекрестных каналах могут присутствовать запаздывания, могут действовать шумы и случайные возмущения.

Путем эквивалентных преобразований данную схему можно преобразовать к двум идентичным схемам, представленным на рис. 2. Каждая из них представляет собой контур регулирования относительно одного регулятора. Регулятор работает на некоторый эквивалентный объект управления, в структуре которого содержится как исходный объект со всеми прямыми и перекрестными связями, так и смежный регулятор. При этом сигнал управления в параллельном канале рассматривается как внешнее возмущение. Тогда амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ) двусвязной системы управления будет являться совокупность двух АФХ для каждого полученного контура. Запасы устойчивости по фазе и амплитуде в данном случае будут иметь вид:

$$\varphi_{zy} = \begin{bmatrix} \varphi_{\varphi 1 zy} \\ \varphi_{\varphi 2 zy} \end{bmatrix}, A_{zy} = \begin{bmatrix} A_{\varphi 1 zy} \\ A_{\varphi 2 zy} \end{bmatrix}.$$

Разработано множество критериев оптимизации для односвязных объектов на основе АФХ разомкнутой системы управления. В частности, В.Я. Ротач доказал, что для различных типов односвязных объектов оптимальные настройки ПИ-регулятора достигаются на частоте колебаний, при которой фазовый сдвиг в разомкнутой системе составляет $\varphi = -2,62$ рад, а длина вектора $A = 0,8$. Этот критерий позволяет получать настройки, которые обеспечивают регулирование с минимальной среднеквадратичной ошибкой, т.е. гарантируют высокую точность регулирования в условиях шумов при сохранении хорошей динамики обработки сигналов задания и возмущения.

В связи с этим принцип построения предлагаемой адаптивной системы управления основан на том, что непрерывная подстройка параметров регуляторов $P1$ и $P2$ осуществляется таким образом, чтобы два вектора амплитудно-фазовых характеристик разомкнутых контуров оставались в окрестности заданной точки ($A = 0,8$ и $\varphi = -2,62$ рад) при любых вариациях параметров объекта управления. Удерживая вектора в заданной точке, осуществляется оптимальная настройка системы с точки зрения запаса устойчивости по фазе и амплитуде (рис. 3).

Эквивалентный объект управления содержит смежный регулятор. Изменение настроек регулятора в одном контуре приводит к изменению характеристик эквивалентного объекта в другом контуре. Поэтому подстройка регуляторов должна производиться параллельно. Для реализации системы самонастройки в данном случае наиболее оптимально использование итеративных методов подстройки.

В предлагаемой адаптивной системе (рис. 4) непрерывная идентификация производится на основе частотного метода с пробными гармоническими сигналами, подаваемыми на входы объекта. Гармонические сигналы позволяют осуществлять одновременно процедуру идентификации для обоих контуров управления. Главными достоинствами такого подхода являются высокая помехоустойчивость и возможность непрерывной работы на малых амплитудах пробных сигналов, не выводящих выходные сигналы объекта за допустимые пределы и не нарушающих нормального хода ТП. Недостатком является невозможность слежения за быстро меняющимися параметрами объекта управления.

В системе осуществляется непрерывный процесс подстройки регуляторов $P1$ и $P2$. Оценка положения векторов АФХ осуществляется путем подачи на входы объекта пробных синусоидальных сигналов от управляемых по частоте и амплитуде генераторов. Новизной подхода является введение четырех синхронных детекторов, что позволяет определять параметры АФХ разомкнутых контуров при работе системы в замкнутом режиме. Такой подход был применен авторами ранее для построения адаптивной системы управления одномерным объектом [9].

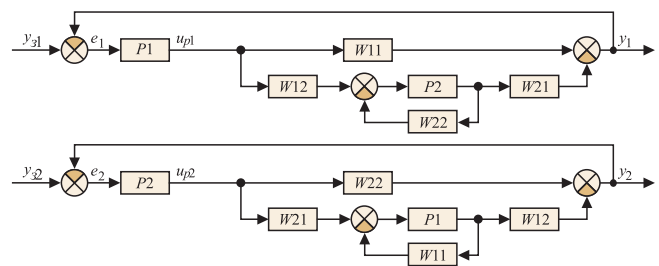


Рис. 2. Структурная схема двусвязной системы, представленная в виде двух односвязных контуров регулирования

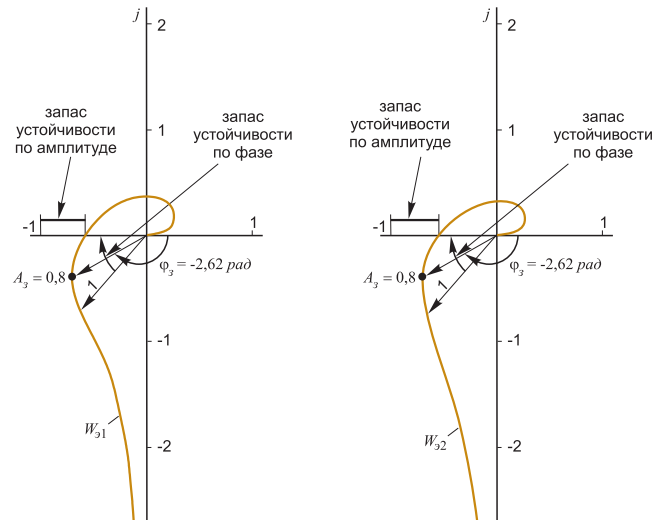


Рис. 3. АФХ разомкнутой двусвязной системы управления по каналу вход/выход

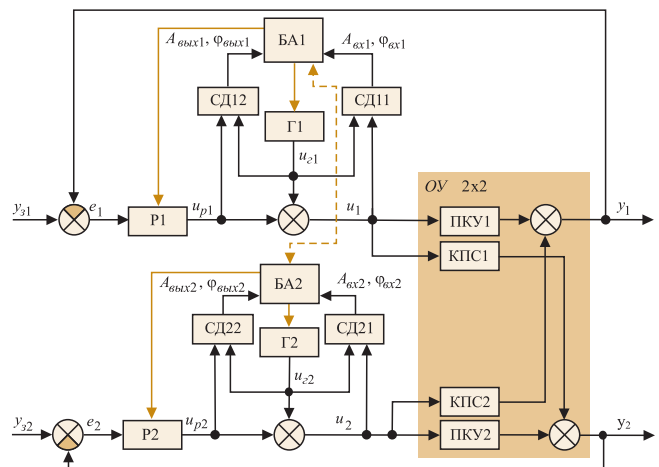


Рис. 4. Структурная схема адаптивной системы управления для линейных двусвязных объектов, где СД11, СД12, СД21, СД22 – синхронные детекторы (на основе фильтров Фурье); Г1, Г2 – управляемые генераторы пробных синусоидальных колебаний; БА1, БА2 – блоки адаптации, ПКУ1, ПКУ2 – прямые каналы управления; КПС1, КПС2 – каналы перекрестной связи

Адаптивная система управления работает следующим образом.

1. Предполагается, что перед запуском системы в работу установлены некоторые параметры настройки

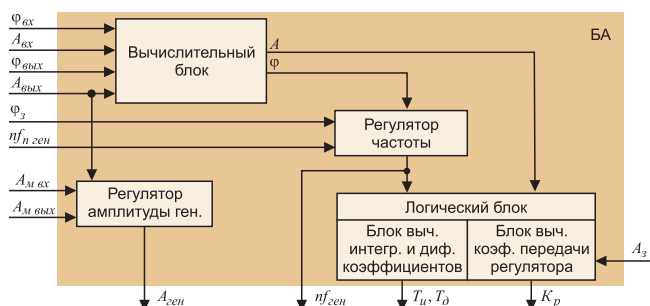


Рис. 5. Структурная схема блока адаптации, где $\varphi_{вх}$, $\varphi_{вых}$ – значения фазовых сдвигов входного и выходного сигналов; $A_{вх}$, $A_{вых}$ – установившиеся значения амплитуд входного и выходного сигналов; φ_z – значение заданного фазового сдвига; $nf_{ген}$ – нормированный период колебаний генератора; $A_{мвх}$, $A_{мвых}$ – максимальная и минимальная амплитуда колебаний на входе и выходе разомкнутой системы, $A_{ген}$ – амплитуда колебаний генератора; $nf_{ген}$ – новый нормированный период колебаний генератора; $T_{и}$, $T_{д}$ – постоянные интегрирования и дифференцирования регулятора; K_p – коэффициента усиления регулятора

регуляторов Р1 и Р2, а также амплитуды и частоты генераторов Г1 и Г2 в обоих каналах управления. Выбор параметров регуляторов производится только исходя из условия обеспечения устойчивой работы системы. Амплитуды и частоты генераторов Г1 и Г2 устанавливаются исходя из инерционности каналов управления и допусков на амплитуды колебаний выходных сигналов Y_1 , Y_2 .

2. Включаются в работу системы регулирования, идентификации и адаптации первого и второго контуров управления. После достижения установившегося режима колебаний (обычно не более четырех, пяти колебаний) синхронные детекторы определяют сдвиг фазы и амплитуду сигналов на входе/выходе контуров управления. При этом используются следующие формулы:

$$A_s(j) = \frac{1}{nN_j} \sum_{i=0}^{nN_j} \delta U \sin(\delta_j),$$

$$A_c(j) = \frac{1}{nN_j} \sum_{i=0}^{nN_j} \delta U \cos(\delta_j),$$

$$A(j) = 2 \cdot \sqrt{A_s^2(j) + A_c^2(j)},$$

$$\varphi(j) = \arctg \frac{A_c(j)}{A_s(j)},$$

где $A_s(j)$, $A_c(j)$ – синусная и косинусная составляющие вектора сигнала $U(k)$; N – число отсчетов цифрового генератора за период колебания; n – число анализируемых периодов колебания; j – номер текущего периода; δ_j – дискретное время генератора пробных колебаний, зависящее от текущей величины нормируемого периода колебаний N_j .

Если $A_s(j) < 0$, то $\varphi(j) = \varphi(j) - \pi$, если $A_s(j) > 0$ и $A_c(j) > 0$, то $\varphi(j) = \varphi(j) - 2\pi$.

Непосредственное вычисление положения вектора АЧХ происходит в блоке адаптации (БА), структурная схема которого представлена на рис. 5.

В блоке адаптации используются следующие формулы:

$$A_1(\omega_1) = A_{вх1}(\omega_1)/A_{вх1}(\omega_1); \varphi_1(\omega_1) = \varphi_{вх1}(\omega_1) - \varphi_{вх1}(\omega_1);$$

$$A_2(\omega_2) = A_{вх2}(\omega_2)/A_{вх2}(\omega_2); \varphi_2(\omega_2) = \varphi_{вх2}(\omega_2) - \varphi_{вх2}(\omega_2);$$

где $A_{вх1}(\omega_1)$, $A_{вх2}(\omega_2)$ – установившиеся значения амплитуд входного и выходного сигналов первого контура на частоте ω_1 ;

$A_1(\omega_1)$ – длина вектора АФХ первого контура;

$A_{вх2}(\omega_2)$, $A_{вх2}(\omega_2)$ – установившиеся значения амплитуд входного и выходного сигналов второго контура на частоте ω_2 ;

$A_2(\omega_2)$ – длина вектора АФХ второго контура;

$\varphi_{вх1}(\omega_1)$, $\varphi_{вх1}(\omega_1)$ – установившиеся значения фазовых сдвигов входного и выходного сигналов первого контура на частоте ω_1 ;

$\varphi_1(\omega_1)$ – фазовый сдвиг вектора АФХ первого контура на частоте ω_1 ;

$\varphi_{вх2}(\omega_2)$, $\varphi_{вх2}(\omega_2)$ – установившиеся значения фазовых сдвигов входного и выходного сигналов второго контура на частоте ω_2 ;

$\varphi_2(\omega_2)$ – фазовый сдвиг вектора АФХ второго контура на частоте ω_2 ;

Пара синхронных детекторов в каждом внутреннем контуре настроена на частоту, с которой работает соответствующий генератор. Поэтому сигнал другой частоты, попадающий в контур через перекрестную связь, не влияет на систему идентификации. Это позволяет осуществить частотную развязку систем идентификации первого и второго контуров регулирования, учитывая при этом их взаимное влияние.

3. В блоках адаптации специальные регуляторы фазы анализируют значения установившихся фазовых сдвигов

$\varphi_1(\omega_1)$ и $\varphi_2(\omega_2)$ на соответствующих частотах. Если значения $\varphi_1(\omega_1)$ и $\varphi_2(\omega_2)$ меньше $-2,62$ рад, то частоты ω_1 и ω_2 увеличиваются на некоторую величину, и наоборот, уменьшаются, если $\varphi_1(\omega_1)$ и $\varphi_2(\omega_2)$ больше $-2,62$ рад. Степень увеличения или уменьшения частот пробных колебаний определяется регуляторами фаз в соответствующих контурах. Таким образом, регуляторы фаз в блоках адаптации осуществляют захват и слежение за критической частотой, при которой фазовый сдвиг в контуре равен $-2,62$ рад. Одновременно регуляторы амплитуды путем изменения амплитуды колебаний в генераторах Г1 и Г2 осуществляют стабилизацию амплитуд колебаний в выходных сигналах Y_1 , Y_2 на заданном уровне (например на уровне 0,5%). В блоках адаптации производится проверка частот колебаний идентификационных сигналов. Если частоты совпадают, то один из блоков адаптации и соответствующий ему генератор временно отключаются. Впоследствии блок адаптации включается в ра-

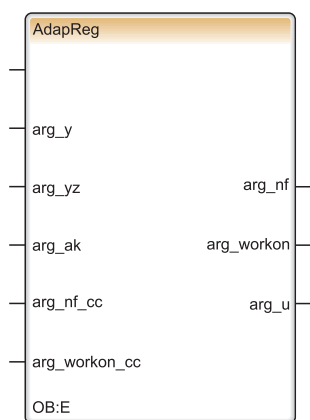


Рис. 6. Адаптивный функциональный блок

боту либо если разность частот идентификационных сигналов достигнет заданного порога, либо если в параллельном контуре произошла настройка регулятора и отключились генератор и блок адаптации.

4. При достижении вектора АФХ в каком-либо контуре положения с фазовым сдвигом $-2,62$ рад, в блоке адаптации производится пересчет настроек соответствующего регулятора. При этом значение коэффициента усиления регулятора определяется таким образом, чтобы длина вектора АФХ разомкнутой системы равнялась $0,8$. Значения постоянных интегрирования и дифференцирования вычисляются через периоды критических колебаний в соответствующих контурах. Здесь используются формулы, предложенные В.Я. Ротачем в работе [8].

Система снабжена также рядом защит и блокировок, исключающих возникновение неустойчивых режимов работы системы.

Адаптивный алгоритм реализован в виде функционального блока на языке Техно ST в системе Trase Mode 6. Данный функциональный блок (рис. 6) позволяет осуществлять управление как односвязным объектом, так и двусвязным. Для управления двусвязным объектом необходимо в систему ввести еще один такой блок и объединить его выходы `arg_workon`, `arg_nf` со входами первого блока `arg_workon_ss`, `arg_nf_ss`.

С использованием Trase Mode 6 были проведены эксперименты на цифровой модели объекта, где прямые и перекрестные каналы представляют собой апериодические звенья второго порядка (рис. 1).

Характеристики звеньев приведены ниже:

$$K11=1,2; t11_1=1,1; t11_2=0,6;$$

$$K12=0,3; t12_1=0,3; t12_2=0,1;$$

$$K21=0,5; t21_1=0,2; t21_2=0,1;$$

$$K22=0,7; t22_1=0,2; t22_2=0,5.$$

Результаты моделирования приведены в таблице.

В первом опыте адаптивная система производила параллельную подстройку регуляторов. Во втором опыте была произведена раздельная настройка. Каждый регулятор настраивался при отключенном регуляторе в параллельном канале. Из полученных результатов видно, что настройки в первом и во втором случае разительно отличаются. В обоих опытах был произведен эксперимент по подаче внешнего возмущения (по второму каналу управления) с уровнем 25% от общей шкалы. Результаты представлены на рис. 7 (слева при параллельной настройке, справа при раздельной настройке), откуда видно, что во втором случае имеется значительный по амплитуде и длительности (порядка 66 с) колебательный переходный процесс.

В третьем эксперименте исследовался как адаптивная система дрейф коэффициента передачи первого прямого канала управления объекта. Коэффициент

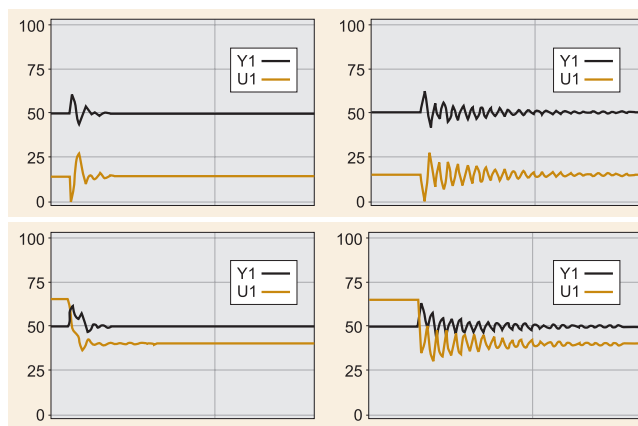


Рис. 7. Обработка возмущения по второму каналу управления (25% от общей шкалы)

Таблица

№ опыта	ρ_1	T_{i1}	T_{d1}	ρ_2	T_{i2}	T_{d2}
1	1,601	1,588	0,3176	0,7537	0,9688	0,1938
2	1,058	1,697	0,339	1,315	1,162	0,232
3	2,501	1,498	0,299	0,593	0,962	0,193

передачи уменьшался на $0,05$ через заданные промежутки времени. В таблице приведены параметры регуляторов после остановки дрейфа ($K11=0,8$). Из полученных результатов видно, что система адаптации отслеживает дрейф и изменяет настройки регуляторов как в первом, так и во втором канале управления.

Список литературы

1. Грон Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979.
2. Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Лысенко С.Е. Реализация функций автоматизированной настройки в микропроцессорных контроллерах ПРОТАР // Теплоэнергетика. 1988. №10.
3. Деменков Н.П., Панин Е.Д. Процедура автоматической настройки регулятора Ремиконт Р-130 // Приборы и системы управления. 1994. №7.
4. Романенко В.Д. Принцип асинхронной дискретизации при синтезе многомерных самонастраивающихся цифровых регуляторов для объектов с неизвестными различными запаздываниями // Адаптивные системы автоматического управления. 1988. Вып. 16.
5. Мееров М.В. Об автономности многосвязных систем, устойчивых при неограниченном увеличении установившейся точности // Автоматика и телемеханика. 1956. №5.
6. Ротач В.Я. Расчет систем несвязного и автономного управления многомерными объектами // Теплоэнергетика. 1996. №10.
7. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: Энергия, 1973.
8. Автоматизация настройки систем управления/ Под ред. В.Я. Ротача. М.: Энергоатомиздат. 1984.
9. Мазуров В.М., Кондратьев В.В. Адаптивный ПИД-регулятор с частотным разделением каналов управления и самонастройки // Приборы и системы управления. 1995. №10.

Мазуров Вячеслав Михайлович — д-р техн. наук, проф, главный эксперт по АСУ НПП "Прогресс",
Горобченко Роман Григорьевич — аспирант Тульского государственного университета.

Контактный телефон (4872) 24-95-51.
 E-mail: vmmazurov@tula.ru gorobchenko@inbox.ru