А.И. РЕПИН (ЗАО "Промэлектроника"),
Н.И. СМИРНОВ, В.Р. САБАНИН (МЭИ)

Идентификация и адаптация САР с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации

Рассматривается способ реализации адаптивной САР на основе активной идентификации в замкнутой системе. Предлагаются структурные схемы и алгоритмы процедур идентификации и адаптации. Идентификация и расчет оптимальных настроечных параметров в процедуре адаптации осуществляется по реальным выборкам переходных процессов, полученных в виде реакции САР на ступенчатое воздействие по каналу задания. Для выполнения перечисленных процедур, кроме реальной САР, использовалась ее имитационная модель и авторская версия эволюционного алгоритма оптимизации "Optim-MGA". Идентификация и адаптация иллюстрируются на примере одноконтурной системы регулирования с ПИД регулятором, реализующим реальное дифференцирование.

A way to implement an adaptive regulatory control system based on active identification in a closed loop is discussed. Structural diagrams and algorithms of identification and adaptation procedures are offered. The identification and the calculation of optimal adaptation procedure settings are implemented based on setpoint step test data. To do this, along with the real control system, both its simulation model and the author's version of the evolution optimization algorithm named Optim-MGA were used. Identification and adaptation are exemplified in a single loop control system with a PID controller implementing the derivation.

Трудно прогнозируемое изменение динамических характеристик промышленных объектов в процессе их функционирования снижает эффективность использования традиционных методов автоматического регулирования и делает первоначально настроенный автоматический регулятор в лучшем случае не оптимальным, а в худшем случае не работоспособным. Настройки становятся либо ослабленными, что влечет за собой потерю качества регулирования, либо слишком острыми, следствием чего может стать потеря устойчивости. Как показывает практика, замена физических регуляторов на программно-реализуемые в микропроцессорных контроллерах без изменения принципов и алгоритмов регулирования оказалась малоэффективной. В связи с этим вполне закономерен интерес к разработке и внедрению алгоритмов адаптации. Алгоритмы автоматизированной настройки, позволяющие приблизить систему регулирования к адаптивной, стали составной частью математического обеспечения большинства микропроцессорных контроллеров [1, 2, 3]. На ранней стадии наибольшую известность приобрели экспертные алгоритмы, оперирующие с реакцией работающей системы автоматического регулирования на ступенчатое воздействие. На современном этапе большое внимание уделяется разработке адаптивных и самонастраивающихся систем с более совершенными регуляторами и алгоритмами их оптимальной настройки [4, 5, 6].

Адаптивными принято считать системы, в которых автоматически выбирается необходимый алгоритм управления, и определяются его оптимальные настройки посредством анализа поведения объекта регулирования. В таких системах все операции настройки регулятора выполняются автоматически. Если часть этих операций выполняется оперативным персоналом, систему называют приспосабливающейся. В этом случае возмущение, необходимое для идентификации, вносит наладчик, и он же устанавливает рассчитанные программным путем настройки. Такая процедура адаптации функционирует в режиме советчика. Если перечисленные операции запрограммировать, то система приобретет статус адаптивной.

Классический адаптивный регулятор должен обеспечивать качественное функционирование САР при соблюдении заданного запаса устойчивости при изменениях динамики объекта без контроля и вмешательства со стороны оперативного персонала. Несмотря на большое количество исследований и разработок в области методов и алгоритмов адаптивного управления, в том числе и в области самонастраивающихся САР, до сих пор отсутствуют убедительные примеры внедрения, которые выжили бы в конкуренции с традиционными схемами регулирования.

Большинство существующих способов адаптивного управления предполагают наличие адекватного математического описания объекта регулирования и построенной на его основе имитационной модели системы. Следует отметить трудности, ограничивающие применение подобного подхода. Во-первых, получение достоверной адекватной модели оказывается возможным лишь для сравнительно простых, как правило, одноконтурных САР, для которых эффективными являются обычные ПИ и ПИД регуляторы. В свою очередь, если удается создать адекватную модель, она оказывается жестко привязанной к множеству характеристик технологического процесса, что создает проблемы ее адаптации в изменяющихся условиях производства. Во-вторых, сложные математические модели в совокупности с современными алгоритмами оптимизации требуют значительных вычислительных ресурсов.

В большинстве своем известные по публикациям активные способы построения адаптивных устройств для распознавания произошедших изменений свойств объекта и последующей идентификации используют либо периодический ввод в разомкнутый контур специально генерируемых возмущений, либо вывод замкнутого контура в режим устойчивых автоколебаний. Использование для адаптации пассивной статистической близости наблюдаемой переменной и ее моделируемого значения приводит, как правило, к недопустимым ошибкам в определении параметров в принятой структуре модели [7, 8].

Из активных способов наиболее приемлемым следует считать изменение задания регулятору в замкнутом контуре регулирования. Такое воздействие не вызывает отторжения у операторов, поскольку является достаточно приближенным к режиму нормальной эксплуатации. При таком подходе адаптация является как бы заключительной частью синтеза САР, выполняемой на стадии ввода ее в действие. Авторы в своей работе развивают именно это направление с использованием опыта,

www.scontrol.ru

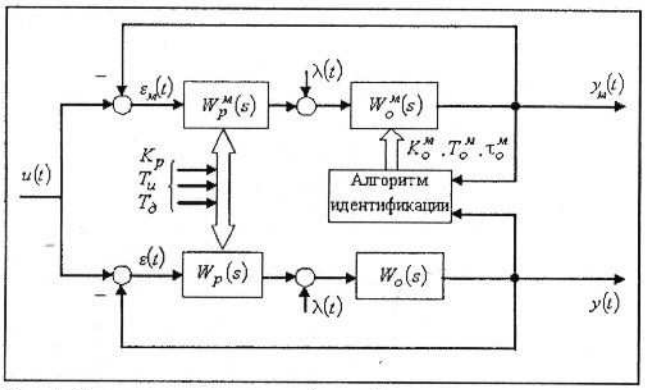

Рис. 1. Структурная схема идентификации

накопленного в работах по имитационному моделированию и применению численных методов оптимизации для решения задач идентификации и оперативной настройки регуляторов [9, 10, 11]. Предлагаемый алгоритм основан на идентификации и адаптации имитационной модели САР к ее оригиналу с последующим определением оптимальных настроечных параметров регулятора.

Поставленная задача существенно упрощается, если известна и практически неизменна структура математической модели объекта регулирования, а изменение параметров принятой структуры носит квазистационарный характер. Решение такой задачи находится в классе самонастраивающихся систем, в которых структура регулятора задана или заранее выбрана, и требуется лишь обоснованно выбрать алгоритмы параметрической идентификации объекта и регулятора, которые обеспечивали бы оптимальное качество и заданный запас устойчивости. В основу алгоритма идентификации заложен механизм параметрической оптимизации принятой структуры математической модели объекта по характеристикам поведения замкнутой системы под действием стандартных возмущений. На вход системы подается специально организованное внешнее идентифицирующее воздействие в виде изменения задания регулятору.

Структурная схема идентификации объекта регулирования в процессе адаптации САР представлена на рис. 1. В соответствии с принципом системного подхода к синтезу САР, операция идентификации осуществляется не над отдельно взятым объектом, а над системой регулирования в целом. Предполагается, что алгоритм регулятора $W_p(s)$ и динамическая структура объекта $W_o(s)$ априори известны, и решение задачи лежит в плоскости параметрической идентификации и оптимизации.

Поскольку процедура идентификации связана с вмешательством в нормальный процесс регулирования, что неизбежно сопровождается определенным ухудшением точности, то выполнять ее приходится периодически и первый раз при пуске системы.

Ниже, в соответствии с рис. 1 приводится последовательность основных операций идентификации.

Устанавливаются предварительные настроечные параметры на регуляторе $W_p(s)$ и его модели $W_p^м(s)$, заведомо гарантирующие достаточный запас устойчивости САР, после чего регулятор включается в работу.

Убедившись в прогнозируемом характере процесса регулирования, на вход регулятора подается внешнее ступенчатое идентифицирующее воздействие $u(t)$, необходимое для формирования выборки регулируемого параметра $y(t)$:

$$u(t)=\begin{cases} u(t)+\Delta u(t), & \tau_н \le t < \tau_н + \tau_{пп}; \\ u(t), & \tau_н + \tau_{пп} \le t \le \tau_н + 2\cdot\tau_{пп}, \end{cases} \quad (1)$$

где $u(t)$ – исходное задание регулятору; $\Delta u(t)$ – величина ступенчатого изменения задания регулятору; t, $\tau_н$, $\tau_{пп}$ – соответственно, текущее время, время начала процесса идентификации и ориентировочная продолжительность переходного процесса.

Реакция на это воздействие представляет собой своеобразную кривую разгона замкнутой системы при подаче, а затем снятии ступенчатого воздействия по заданию на входе в регулятор. По такой временной характеристике при известном алгоритме регулятора и его настроечных параметрах представляется возможным получить коэффициенты передаточной функции для принятой аппроксимирующей структуры модели объекта.

Следует заметить, что характер входного воздействия может быть иным. Например, последовательность ступенчатых импульсов заданной длительности. Количество таких импульсов в последовательности выбирается на этапе предварительного эксперимента на действующем объекте.

Производится запись в базу данных величины возмущения $u(i\cdot\Delta t)$, выборки регулируемого параметра $y(i\cdot\Delta t)$ и фиксированных интервалов времени $i\cdot\Delta t$, где Δt – интервал записи выборки в базу данных, $i \in \overline{1, \frac{2\cdot\tau_{пп}}{\Delta t}}$.

Реализуется процедура параметрической идентификации для принятой структуры модели объекта $W_o^м(s)$ в соответствии с полученной выборкой характеристики реальной САР и ранее установленными начальными настройками на модели регулятора $W_p^м(s)$ при входном воздействии (1). С позиций системного подхода модель объекта будет считаться удовлетворительной, если при подаче на вход САР с действительным объектом и САР с моделью объекта одного и того же воздействия, разность их выходных величин окажется достаточно малой. С учетом отмеченного, критерий идентификации $I_{ид}$ формируется в виде интеграла квадратов разности выходов реальной САР $y(t)$ и ее модели $y_м(t)$:

$$I_{ид} = \int_0^{2\cdot\tau_{пп}} \{y_м(t) - y(t)\}^2 dt \to \min . \quad (2)$$

После того, как параметры для принятой структуры математической модели объекта будут определены, осуществляется процедура параметрической оптимизации выбранного регулятора в среде имитационного моделирования путем взаимодействия модели САР и эволюционного алгоритма оптимизации. Структурная схема этой процедуры представлена на рис. 2.

В качестве критерия в алгоритме параметрической оптимизации регулятора выбран интеграл по модулю отклонения регулируемой величины в переходном процессе при ступенчатом возмущении по каналу регулирующего органа $\lambda(t)$.

$$I_{м,\lambda} = \int_0^{\tau_{пп}} \lambda(t)\cdot|y_м(t)|\cdot dt \to \min , \quad (3)$$

где $y_м(t)$ – регулируемый параметр на выходе модели САР; $\tau_{пп}$ – интервал времени переходного процесса.

www.asucontrol.ru

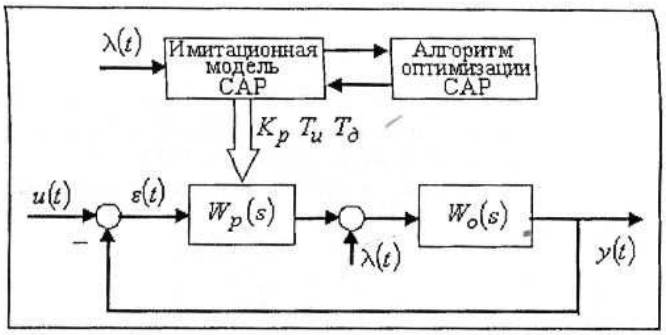

Рис. 2. Структурная схема параметрической оптимизации регулятора

Для окончательного формирования целевой функции интеграл (3) дополняется ограничением в виде функции штрафа на допустимую величину показателя колебательности $M \leq M_{доп}$:

$$F = \begin{cases} I_{м,\lambda} \cdot \left\{1 + \left|M_{доп} - A_{зс}(\omega_p)\right|\right\}, \text{ если } A_{зс}(\omega_p) > M_{доп}; \\ I_{м,\lambda}, \text{ если } A_{зс}(\omega_p) \leq M_{доп}, \end{cases} \quad (4)$$

где $A_{зс}$ (ω_p) – максимальное значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для замкнутого контура регулируемой величины $y(t)$ на резонансной частоте ω_p; $M_{доп}$ – заданное значение показателя колебательности, определяющее допустимый запас устойчивости.

Определение параметров идентифицируемой модели и настроечных параметров регулятора в процессе адаптации базируется на численных методах с использованием авторской версии эволюционного алгоритма оптимизации "Optim-MGA". Принцип действия алгоритма изложен на авторском сайте в сети Интернет (http://ai.xss.ru) в разделе "Программные продукты". В отличие от чисто генетических алгоритмов "Optim-MGA" не использует операций кроссовера, мутации и инверсии. Наилучшее решение определяется в результате селекции популяции, осуществляемой путем удаления наихудших особей и заменой их потомками на каждом этапе эволюции. Для определения потомков в алгоритме используются операции метода деформируемого многогранника Нелдера-Мида, такие как отражение, растяжение, сжатие и редукция.

Процедуры параметрической идентификации объекта и оптимизации выбранного регулятора, положенные авторами в основу адаптивного управления, на первом этапе предполагается использовать в режиме автоматизированной настройки под наблюдением инженера-наладчика. Изложенный подход может быть распространен на системы регулирования практически любой структуры, включая многоконтурные и многомерные.

В качестве иллюстрационного примера приводятся процедуры идентификации объекта и оптимизации настроечных параметров регулятора в одноконтурной системе регулирования. Реальная САР представлена в виде имитационной модели, включающей в себя объект регулирования с аддитивной случайной помехой и ПИД регулятор с реальным дифференцированием. Передаточная функция объекта регулирования, близкого по своим динамическим характеристикам к участкам регулирования температуры, где использование ПИД регулятора дает заметный эффект, выбрана в виде:

$$W_o(s) = K_o \cdot \frac{e^{-\tau_o \cdot s}}{(T_o \cdot s + 1)^n}, \quad (5)$$

где K_o = 1 °С/%УП (УП – указатель положения регулирующего органа); τ_o = 20 с; T_o = 100 с; n = 3.

Передаточная функция ПИД регулятора, учитывающая операцию реального дифференцирования, принята в виде:

$$W_p(s) = K_p + \frac{K_p}{T_u \cdot s} + \frac{K_p \cdot T_д \cdot s}{T_ф \cdot s + 1}, \quad (6)$$

где K_p, T_u, $T_д$ – настроечные параметры ПИД регулятора (коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования), $T_ф$ – постоянная времени включаемого в дифференциатор сглаживающего фильтра. Поскольку процедура параметрической идентификации предполагает структуру динамической модели объекта априори известной и заранее принятой, то к ней должны предъявляться вполне определенные требования. В работе [12] показано, что аппроксимация динамики объекта в виде одного А-звена и звена транспортного запаздывания в САР с ПИД регулятором является не совсем корректной для объектов, имеющих емкостное запаздывание, поскольку она приводит к ослабленным настройкам ПИД регулятора, приближая его по эффективности к ПИ регулятору. С другой стороны, стремление к повышению порядка аппроксимирующей модели с целью максимального приближения ее к оригиналу неизбежно приводит к обостренным настройкам и повышенной чувствительности, что в условиях изменяющейся динамики может привести к снижению запаса устойчивости, а для адаптивной системы потребует более частого включения в работу алгоритмов идентификации и перенастройки. Как показали исследования, проведенные авторами, в большинстве случаев наиболее приемлемой оказывается аппроксимирующая модель в виде двух последовательно соединенных А-звеньев и звена транспортного запаздывания для объектов с самовыравниванием или в виде последовательно соединенных И-звена, А-звена и звена транспортного запаздывания для объектов без самовыравнивания. Такая аппроксимация позволяет, во-первых, усилить регулирующее воздействие дифференциальной составляющей регулятора, а во-вторых, в какой-то степени снизить чувствительность по сравнению с настройками полученными по модели более высокого порядка. Потеря качества регулирования в этом случае оказывается значительно меньше, чем для случая с упрощенной моделью первого порядка. С учетом отмеченного, передаточную функцию аппроксимирующей модели для принятого объекта с самовыравниванием можно записать в виде:

$$W_o^м(s) = K_o^м \cdot \frac{e^{-\tau_o^м \cdot s}}{(T_o^м \cdot s + 1)^2}, \quad (7)$$

где $K_o^м$, $T_o^м$, $\tau_o^м$ – соответственно, коэффициент передачи, постоянная времени и транспортное запаздывание аппроксимирующей модели объекта.

Номинальное значение регулируемого параметра в иллюстрационном примере (в нашем случае температура принято равным 400 °С. Ослабленные начальные настройки регулятора приняты равными: K_p = 1 %УП/ °С T_u = 200 с, $T_д$ = 20 с. Для проведения процедуры

Таблица

№ строки	Объект и модель $W_o(s)$, $W_n^м(s)$				Регулятор $W_p(s)$ $T_{фр}$ = 20 с			Показатели качества и устойчивости			
	K	τ	T	n	K_p	T_u	$T_д$	$I_{M.\lambda}$	$I_{M.u}$	ω_p	$A_{ЗС}(\omega_p)$
1	1,000	20,0	100,0	3	2,63	169,5	91,10	1006	1088	0,0147	1,55
2	1,060	60,9	142,5	2	1,00	200,0	20,00	2369	1588	0,0056	1,11
3	1,060	60,9	142,5	2	2,54	179,4	72,00	1134	1189	0,0145	1,55
4	1,000	30,0	150,0	3	2,54	179,4	72,00	2565	3480	0,0069	4,06
5	1,000	30,0	150,0	3	2,94	247,0	139,8	1276	1322	0,0107	1,55
6	1,096	88,3	220,4	2	2,83	247,1	121,8	1371	1402	0,0104	1,55

Примечание:
Строка 1. Виртуальная настройка регулятора для исходной фактической динамики объекта.
Строка 2. Идентификация объекта при первоначально выбранных настройках регулятора.
Строка 3. Оптимизация настроек регулятора по результатам идентификации объекта.
Строка 4. Поведение САР при изменившейся фактической динамике объекта.
Строка 5. Виртуальная настройка регулятора для фактической изменившейся динамики объекта.
Строка 6. Идентификация изменившегося объекта и параметрическая оптимизация регулятора в процессе адаптации.

идентификации на вход системы регулирования по каналу задания подавалось ступенчатое изменение задания от 400 до 405 °С продолжительностью 2000 с, после чего возмущение снималось, и реакция на выходе объекта записывалась еще в течение 2000 с ($u(t)$ = 400 °С, $\Delta u(t)$ = 5 °С, $\tau_{пп}$ = 2000 с). Поскольку процедура параметрической оптимизации регулятора проводилась по возмущению $\lambda(t)$ (рис. 2), для анализа использовались переходные процессы в виде реакции на ступенчатое возмущение по каналу регулирующего органа $\lambda(t)$ = 10 %УП.

Результаты всех выполненных процедур идентификации и адаптации с оценками качества и устойчивости приведены в таблице. В примечании к таблице приводится краткое описание строк, каждая из которых соответствует определенной процедуре.

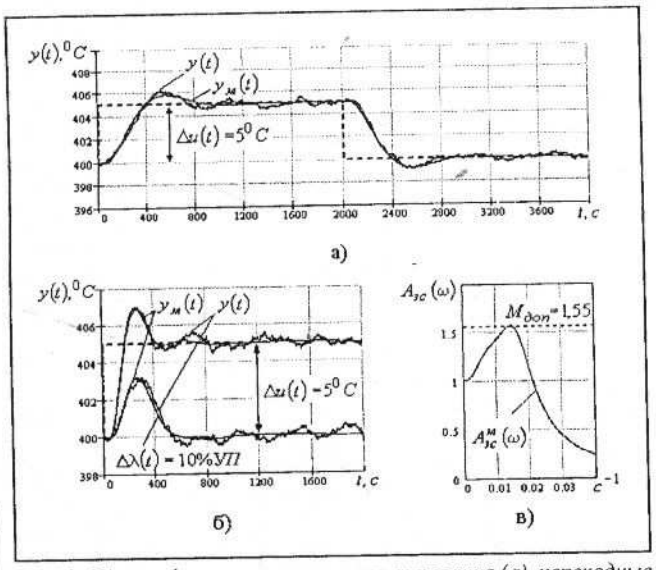

Рис. 3. Идентификация системы регулирования (а), переходные процессы в реальной САР и ее модели при оптимальных настроечных параметрах (б), АЧХ замкнутой оптимально настроенной системы, реализованной на модели САР (в)

Результаты первой строки таблицы носят виртуальный характер и представляют интерес лишь для проведения сравнительного анализа. Вторая строка отражает результаты параметрической идентификации объекта и оценки качества и устойчивости для начальных, априори принятых настроек регулятора.

Выборка переходного процесса, полученная в реальной САР, и идентифицированный переходный процесс для принятого входного воздействия вида (1) представлены на рис. 3,а. Полученные в результате идентификации численные значения параметров модели объекта для принятой структуры аппроксимирующей передаточной функции вида (7) и начальных настроек регулятора представлены во второй строке таблицы.

По идентифицированной имитационной модели объекта по предлагаемой методике в соответствии со схемой на рис. 2 проведен расчет настроек регулятора. Значения настроечных параметров приведены в третьей строке таблицы (ПИД регулятор с реальным дифференцированием: $T_{фр}$ = 20 с). Переходные процессы, полученные как на реальном объекте $y(t)$, так и на модели $y_м(t)$ при изменении задания на 5 °С и для возмущения по каналу регулирующего органа $\lambda(t)$ = 10 % УП показаны на рис. 3,б. Настроечные параметры ПИД регулятора определялись, исходя из принятого запаса устойчивости $M_{доп}$ = 1,55. Амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы $A_{зс}^м(\omega)$, подтверждающая соблюдение принятого условия, приведена на рис. 3,в. Сравнительный анализ показателей качества и устойчивости, приведенных в первой и третьей строках таблицы, говорит о хорошем совпадении переходных процессов регулирования на идентифицированной модели и реальном объекте.

Таким образом, на первом этапе адаптации проводится первоначальная после включения регулятора идентификация системы регулирования, определяются по идентифицированной модели объекта настройки регулятора, которые затем устанавливаются в реальной системе.

Результаты периодической адаптации САР, обусловленной изменением динамики объекта, представлены в четвертой, пятой и шестой строках таблицы (примечание к таблице). На рис. 4,а показаны переходные процессы при условии, что динамика реального объекта регулирования изменилась, а настроечные параметры регулятора остались прежними (постоянная времени T_o и время транспортного запаздывания τ_o фактического объекта увеличились на 50 % при неизменном коэффициенте передачи K_o. На рис. 4,б показано, как при этом изменилась АЧХ для принятого варьирования параметров объекта. Из графика АЧХ видно, что показатель колебательности, характеризующий запас устойчивости, увеличился по сравнению с исходным почти в 3 раза, что наглядно подтверждают переходные процессы на рис. 4,а.

www.asucontrol.ru

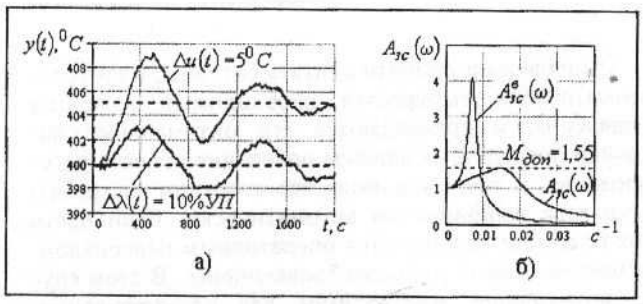

Рис. 4. Переходные процессы (а) и АЧХ замкнутой системы (б) при изменившейся динамике объекта с настройками регулятора, полученными на первом этапе адаптации

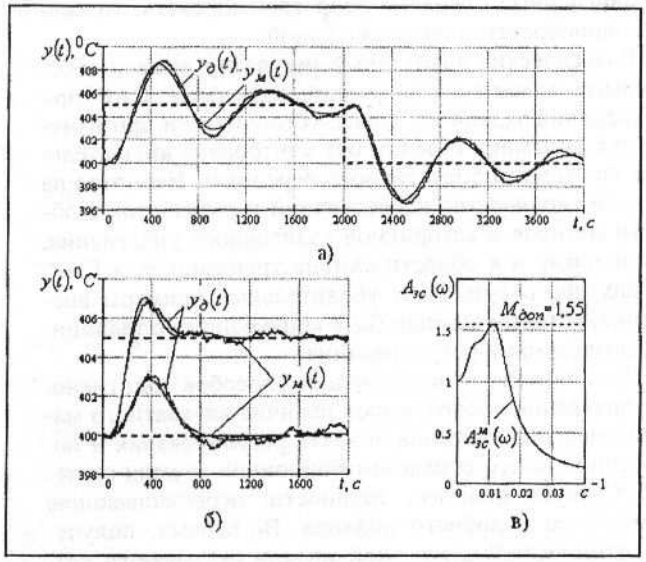

Рис. 5. Идентификация системы на промежуточном этапе (а), переходные процессы с вновь рассчитанными настройками регулятора (б) и АЧХ для принятого ограничения на запас устойчивости (в)

Результаты идентификации и оптимальной настройки регулятора на этапе промежуточной адаптации представлены на рис. 5. Численные значения параметрической идентификации объекта с изменившейся динамикой, а также найденные для нее оптимальные настроечные параметры с показателями качества и устойчивости приведены в шестой строке таблицы.

Сравнение величин настроечных параметров и показателей качества и запаса устойчивости, приведенных в пятой и шестой строках таблицы, говорит о хорошем приближении результатов идентификации и адаптации к виртуальным результатам, полученным исходя из того, что фактическая динамика реального объекта известна.

Предложенные авторами алгоритмы идентификации и последующей оптимизации настроечных параметров регулятора реализованы в виде универсальной программы "Tune P.I.D.", которая позволяет с заданной периодичностью, либо по команде инженера-наладчика изменять задание регулятору, записывать выборки переходных процессов для идентификации объекта, после чего производить расчет оптимальных настроечных параметров регулятора. Полученные настроечные параметры могут вводиться в контроллер либо автоматически, либо по согласованию с инженером-наладчиком.

Программа "Tune P.I.D." после соответствующей доработки может быть привязана практически к любому ПТК с любой SCADA-системой.

Андрей Иванович Репин – канд. техн. наук, ведущий специалист ЗАО "Промэлектроника".
Телефон (495) 974-12-95.
E-mail: repin@intma.ru
Николай Иванович Смирнов, Владимир Романович Сабанин – кандидаты техн. наук, доценты каф. АСУТП МЭИ.

Список литературы

1. *Соболев О.С.* О проблемах адаптивного регулирования промышленных процессов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 10.
2. *Ротач В.Я.* Автоматизированная настройка ПИД регуляторов – экспертные и формальные методы // Теплоэнергетика. 1995. № 10.
3. *Ротач В.Я., Кузищин В.Ф., Нгуен Хиен.* Построение автоматизированных адаптивных систем на базе агрегатных комплексов средств регулирования // Теплоэнергетика. 1981. № 10.
4. *Методы* робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001.
5. *Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А.* Адаптивные автоматически настраивающиеся ПИД регуляторы // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 6.
6. *Штейнберг Ш.Е., Залуцкий И.Е., Сережин Л.П., Варламов И.Г.* Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 10.
7. *Ротач В.Я.* О методологии построения адаптивных систем автоматического управления технологическими процессами // Теплоэнергетика. 1989. № 10.
8. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления: соответствуют ли ее основные положения действительности // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 3.
9. *Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.* Параметрическая оптимизация и диагностика с использованием генетических алгоритмов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 12.
10. *Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.* Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3, 4.
11. *Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.* Робастные многопараметрические регуляторы для объектов с транспортным запаздыванием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. № 7.
12. *Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.* О корректности настройки ПИД регулятора при аппроксимации переходной характеристики объекта регулирования апериодическим звеном с транспортным запаздыванием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 1.