Министерство образования и науки Российской Федерации
Российский фонд фундаментальных исследований
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»
Институт радиотехники и электроники РАН
Институт проблем точной механики и управления РАН
ФГУ «Государственный НИИ информационных технологий и коммуникаций»
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва»

Саратовский научный центр РАН
ОАО «КБ Электроприбор»
Филиал ФГУП «НПЦАП им. академика Н. А. Пилюгина» ПО «Корпус»
ОАО ЭОКБ «Сигнал» им. А. И. Глухарёва
ФГУП НПП «АЛМАЗ»

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

(АТМ-2013)

СБОРНИК ТРУДОВ
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
Сентябрь 2013 года

Том 1

Саратов 2013

УДК 681.51 + 004.9
ББК 32.965
П78

П78 Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф.: в 2 т. / под ред. А.А. Львова и М.С. Светлова. Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2013. – Т.1. – 330 с.
ISBN 978-5-4426-0021-6

В сборнике публикуются избранные труды участников III Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013)», состоявшейся в сентябре 2013 г. в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А.

Представленные материалы отражают современные подходы к созданию и использованию методов современной теории управления, распределенных информационно-управляющих систем, цифровой обработки сигналов в информационно-управляющих системах, автоматизации решения сложных вычислительных задач, автоматизации управления в административных, финансовых и коммерческих сферах.

Сборник ориентирован на специалистов, занимающихся разработкой и применением методов теории управления, интеллектуальных систем, компьютерных технологий для анализа и синтеза систем управления, технических, технологических и социально-экономических систем.

Тезисы и доклады рецензированы и редактированы Программным комитетом конференции.

УДК 681.51 + 004.9
ББК 32.965

ISBN 978-5-4426-0021-6

СЕКЦИЯ 1

ТЕОРИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Александров А. Г.
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, alex7@ipu.ru

Синтез регуляторов по прямым показателям (точности, времени регулирования, перерегулированию, запасам устойчивости по фазе и модулю) является одной из центральных задач теории автоматического управления. Первым методом синтеза по этим показателям был метод логарифмических амплитудно-частотных характеристик (метод ЛАЧХ) [1, 2]. На протяжении нескольких десятилетий он являлся основным инструментом инженеров-разработчиков систем автоматического регулирования одномерных объектов (объектов с одним управляющим воздействием и одной измеряемой переменной).

Потребность в методах синтеза регуляторов многомерных объектов привела к необходимости привлечения таких разделов математики, как вариационное исчисление, методы оптимизации, теория функции комплексного переменного, в рамках которых были разработаны аналитическое конструирование регуляторов [3], (LQ – оптимизация [4]) и H_∞ - оптимальное управление [5]. Цели управления в этих методах описываются квадратичными функционалами (интегралами квадратичных форм переменных объекта и регулятора, а также внешнего возмущения при H_∞ – оптимальном управлении). Известно, что для регулятора асимптотически устойчивой системы с любыми прямыми показателями можно найти весовые матрицы квадратичного функционала, при которых этот регулятор является оптимальным. Это означает, что LQ – оптимальность не имеет явной связи с прямыми показателями.

Учитывая это, начал развиваться аналитический синтез регуляторов, направленный на синтез регуляторов по прямым показателям на основе LQ – и H_∞ – оптимизации [6].

Настоящая работа посвящена аналитическому синтезу регуляторов на основе модального управления. Задача состоит в том, чтобы найти структуру и параметры модального полинома, при которых регулятор обеспечивает заданные значения точности, запасов устойчивости и требуемого времени регулирования:

$$\begin{gathered} d_n y^n(t) + d_{n-1} y^{n-1}(t) + \ldots + d_1 \dot{y}(t) + d_0 y(t) = \\ = k_m u^m(t) + \ldots + k_1 \dot{u}(t) + k_0 u(t) + c_0 f(t), \quad m < n; \end{gathered} \tag{1}$$

$$g_n u^{(n_c)}(t) + \ldots + g_1 \dot{u}(t) + g_0 u(t) = r_m y^{(m_c)}(t) + \ldots + r_1 \dot{y}(t) + r_0 y(t), \quad n_c \ge m_c, \tag{2}$$

где *y(t)* – измеряемый сигнал с выхода объекта (1), являющийся регулируемой переменной; *u(t)* – управляющий сигнал, формируемый регулятором (2); *f(t)* – внешнее возмущение, которое может быть представлено полигармонической функцией

$$f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} f_i \sin(\omega_i^f t + \varphi_i^f), \tag{3}$$

где частоты ω_i^f и фазы φ_i^f – неизвестны, а неизвестные амплитуды f_i удовлетворяют условию

$$\sum_{i=0}^{\infty} | f_i | \le f^* \quad , \tag{4}$$

в котором f^* – известное число.

Коэффициенты $d_i, k_j, c_0 \quad (i = \overline{1, n-1}, j = \overline{1, m})$ объекта известны.

Задача состоит в том, чтобы найти коэффициенты регулятора (2) такие, чтобы система (1) – (2) удовлетворяла следующим требованиям по:

а) точности:

$$| y(t) | \le y^*, \quad t \ge t_{\text{рег}} ; \tag{5}$$

б) быстродействию (времени регулирования):

$$t_{\text{рег}} \le t^*_{\text{рег}} , \tag{6}$$

где y^* и $t_{\text{рег}}$ — заданные числа;

в) запасам устойчивости по фазе и модулю:

$$\varphi_з \ge 30, \quad L \ge 2 . \tag{7}$$

Системы, для которых выполняется условие (7), будем называть грубыми.

Далее полагаем, что корни s_i, $i = \overline{1, m}$ полинома $k(s)$ удовлетворяют условию:

$$| \operatorname{Re} s_i | \ge 3(t^*_{\text{рег}})^{-1}, \quad i = \overline{1, m} . \tag{8}$$

Кроме того, для простоты полагаем $m = n-1$.

Преобразуя уравнения (1) – (2) по Лапласу при нулевых начальных условиях, запишем их в виде:

$$d(s)y = k(s)u + c_0 f ; \tag{9}$$

$$g(s)u = r(s)y . \tag{10}$$

Объект (9) называется устойчивым по управлению, если все корни полинома $k(s)$ имеет отрицательные вещественные части.

Рассмотрим тождество Безу:

$$d(s)g(s) - k(s)r(s) = \psi(s) , \tag{11}$$

где $\psi(s)$ – модальный полином степени $2n-1$, все корни которого имеют отрицательные вещественные части.

Этот полином имеет следующую структуру:

$$\psi(s) = k(s)\prod_{i=1}^{n}(s + s_{\delta,i}), \quad s_{\delta,i} > 0, \quad i = \overline{1, n} . \tag{12}$$

Если полиномы $g(s)$ и $r(s)$ регулятора (10) являются решением тождества Безу (11), то справедливо следующее.

<u>Утверждение 1.</u> Требование (5) к точности системы выполняется, если:

$$\prod_{i=1}^{n} s_{\delta,i} \ge \frac{| c_0 | f^*}{y^*} . \tag{13}$$

<u>Утверждение 2.</u> Система обладает требуемым быстродействием, когда:

$$s_{\delta,i} \ge 3(t^*_{\text{рег}})^{-1}, \quad i = \overline{1,n}. \tag{14}$$

Утверждение 3. Грубость системы обеспечивается, если:

$$s_{\delta,i} = |s_{d,i}|(1+\rho_i), \quad i = \overline{1,n}, \tag{15}$$

где $s_{d,i}$ $(i = \overline{1,n})$ – корни полинома $d(s)$; ρ_i $(i = \overline{1,n})$ – произвольные неотрицательные числа.

Для объектов, не устойчивых по управлению, полином $k(s)$ содержит корни с неотрицательными вещественными частями. Такие корни могут существенно ограничить предельную точность регулирования $y_{\text{пр.}}$, которая для объектов, устойчивых по управлению, не ограничена. Известны соотношения, позволяющие найти величину $y_{\text{пр.}}$ для гармонического внешнего возмущения $f(t) = \sin \omega t$ с неизвестной частотой ω, действующего на объект (1). Это означает, что величина y^* в требовании (5) должна удовлетворять условию $y^* > y_{\text{пр.}}$. Представим полином $k(s)$ как $k(s) = k^+(s)k^-(s)$, где $k^+(s)$ – полином степени m^+, корни которого имеют неотрицательные вещественные части; $k^-(s)$ – полином степени m^- с остальными корнями ($m^+ + m^- = n-1$).

Модальный полином в тождестве Безу (11) имеет вид:

$$\psi(s) = k^-(s)\delta_k(s)\prod_{i=1}^{n}(s + s_{\delta,i}), \quad s_{\delta,i} > 0, \quad i = \overline{1,n}, \tag{16}$$

где $\delta_k(s) = k^+(-s)$.

Рассмотрим случаи больших и малых вещественных корней s_i $(i = \overline{1,m^+})$ полинома $k^+(s)$.

Утверждение 4. Если корни s_i $(i = \overline{1,m^+})$ полинома $k^+(s)$ таковы, что:

$$s_i > \max[|s_{d,1}|,...,|s_{d,n}|]\cdot\theta_d;\ s_i < \max[|s_{\delta,1}|,...,|s_{\delta,n}|]\cdot\theta_\delta,\ i = \overline{1,m^+},$$

то при достаточно больших значениях положительных чисел θ_d и θ_δ условия утверждений 1–3 обеспечивают выполнение требований к системе.

Утверждение 5. Если корни полинома $k^+(s)$ удовлетворяют неравенствам:

$$s_i < \frac{1}{\underline{\theta}_d}\min\left[|s_{d,1}|,...,|s_{d,n}|\right];\ s_i < \frac{1}{\underline{\theta}_\delta}\min\left[|s_{\delta,1}|,...,|s_{\delta,n}|\right],\ i = \overline{1,m^+},$$

то при достаточно больших значениях положительных чисел $\underline{\theta}_d$ и $\underline{\theta}_\delta$ и нечетном числе m^+ установившийся выход $y_{\text{уст.}}$ системы (1)–(2) при ступенчатом внешнем возмущении определится по формуле:

$$y_{\text{уст.}} = c_0\left(\frac{2}{d_0} - \frac{1}{\delta_0}\right)f^*,$$

где $d_0 = |\prod_{i=1}^{n} s_{d,i}|$, $\delta_0 = \prod_{i=1}^{n} s_{\delta,i}$.

Если при этом выполняется условие:

$$\frac{\delta_0}{\left|2\delta_0 - d_0\right|} < 0{,}5 \,,$$

то система не удовлетворяет требованиям (7) по грубости.

1. Основы автоматического регулирования / под ред. В. В. Солодовникова. – М.: Машгиз, 1954.
2. Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления. Ч.I. Линейные системы регулирования одной величины / А. А. Воронов. – М.; Л.: Энергия, 1965.
3. Летов, А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. I–IV / А. М. Летов //АиТ. 1960. № 4. с. 436–441; № 5 с. 561–568; № 6. с. 661–665; 1961. № 4. с. 425–435
4. Kalman, R. E. Contribution to the theory of optimal control // Bullet. Soc. Mat. Mech. 1960. Vol. 5. № 1. P. 102–119.
5. State-space solution to standart H_2 and H_{∞} control problem / J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar, B. A. Francis // IEEE Trans. Autom. Contr. 1989. – Vol. 34. – № 8. – P. 831–846.
6. Александров, А. Г. Методы построения систем автоматического управления / А. Г. Александров. – М.: Физматлит, 2008. – 230 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАСТРОЙЩИКА ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

Александров А. Г., Шатов Д. В.
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, alex7@ipu.ru, dvshatov@gmail.com

Рассмотрим систему автоматического регулирования. Уравнение объекта имеет вид:

$$T^{[i]}\dot{y}(t) + y(t) = k_p^{[i]}u(t-\tau^{[i]}) + f(t-\tau), \quad t^{[i]} \le t < t^{[i+1]}; \qquad i = 1,2,3,\ldots,N \,, \tag{1}$$

где $y(t)$ – измеряемый сигнал с выхода объекта; $u(t)$ – управляющее воздействие; $f(t)$ – неизвестное ограниченное внешнее возмущение, действующее на объект; i – номер режима работы объекта; $k_p^{[i]}, T^{[i]}, \tau^{[i]}$ – параметры объекта управления: коэффициент усиления, постоянная времени и запаздывание, соответственно, изменяющиеся в моменты времени $t^{[i]}$ и сохраняющие свое значение на интервалах времени $t^{[i]} \le t < t^{[i+1]}$, которые достаточно велики.

ПИД-регулятор описывается уравнением:

$$g^{[i]}\dot{u}(t) + u(t) = k_c^{[i]}\varepsilon(t) + k_i^{[i]}\int_0^t \varepsilon(t)d\tilde{t} + k_d^{[i]}\frac{d\varepsilon(t)}{dt}; \quad \varepsilon(t) = y^*(t) - y(t), \tag{2}$$