

Г. Н. МАЛЬЦЕВ, Г. И. АФОНИН

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОГО КОНТУРА СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассмотрена методика совместной оптимизации параметров адаптивного контура следящей системы автоматического управления при наличии требований к качеству регулирования. На примере адаптивного контура с типовой передаточной характеристикой проведен анализ частотных характеристик замкнутого контура и графоаналитическим методом получена зависимость, позволяющая выбрать оптимальный коэффициент усиления при выполнении типовых требований к запасу устойчивости.

Ключевые слова: следящая система автоматического управления, адаптивный контур, частотная характеристика, быстродействие, запас устойчивости.

В системах управления движением и технологическими процессами широкое распространение имеют системы автоматического управления, предназначенные для контроля и регулирования различных параметров, в том числе в целях компенсации внешних возмущающих воздействий [1—3]. Управляющие (корректирующие) воздействия в таких следящих системах формируются в адаптивном контуре управления, который должен обладать достаточным быстродействием, а также удовлетворять определенным требованиям относительно происходящих в нем переходных процессов, которые объединены понятием качества регулирования [4, 5].

В настоящей статье представлена методика выбора параметров динамических характеристик адаптивного контура следящих систем автоматического управления, позволяющая обеспечить достаточное быстродействие при выполнении требований к допустимой величине перерегулирования. Последняя является одной из характеристик переходного процесса в адаптивном контуре, определяющей качество регулирования, поскольку увеличение скорости сходимости переходного процесса на начальном этапе сопряжено с увеличением величины перерегулирования на последующих его этапах.

Для достижения высоких показателей надежности следящих систем автоматического управления необходимо, чтобы при заданных условиях их функционирования было обеспечено достаточное для коррекции внешних возмущающих воздействий быстродействие при выполнении требований к качеству регулирования. Обеспечение такого режима работы связано с необходимостью обоснованного выбора параметров динамических характеристик адаптивного контура, который в ряде случаев имеет компромиссный характер.

В отличие от работ, в которых синтезируются оптимальные по быстродействию алгоритмы адаптивного управления [6, 7], существенно усложняющие структуру и техническую реализацию адаптивного контура, в данной статье рассматривается система автоматического управления с адаптивным контуром заданной структуры, определяемой описывающим его динамические характеристики дифференциальным уравнением и соответствующей передаточной функцией. В качестве типовой передаточной функции адаптивного контура рассмотрим передаточную функцию

$$K_0(p) = \frac{k}{p(1+T_0p)(1+T_1p)}, \quad (1)$$

где k — коэффициент усиления, T_0 и T_1 — постоянные времени адаптивного контура.

Передаточная функция вида (1) соответствует динамическим свойствам адаптивного контура, состоящего из трех последовательно соединенных устройств: детектора внешних возмущений, интегратора и исполнительного элемента, с помощью которого осуществляется компенсация действующих возмущений. Такой структурой может быть представлен широкий класс следящих систем автоматического управления. Интегратор характеризуется передаточной функцией $1/p$, а детектор внешних возмущений и исполнительный элемент характеризуются передаточными функциями апериодических звеньев первого порядка $1/(1+T_0p)$ и $1/(1+T_1p)$ с постоянными времени T_0 и T_1 соответственно. Коэффициент усиления k — есть произведение коэффициентов передачи всех звеньев, образующих адаптивный контур.

При выборе параметров адаптивного контура с передаточной функцией вида (1) необходимость одновременного выполнения требований по быстродействию и качеству регулирования приводит к тому, что обеспечение достаточного быстродействия адаптивного контура по сути является задачей совместной оптимизации параметров k , T_0 и T_1 . Для следящих систем, работающих в условиях шумов, подобная оптимизационная задача, как правило, представляет собой задачу минимизации суммарной ошибки регулирования, содержащей шумовую и динамическую составляющие, при заданных входных воздействиях [2, 5]. Это связано с тем, что при увеличении быстродействия (уменьшении T_0 и T_1) уменьшается динамическая составляющая ошибки регулирования, однако увеличивается ее шумовая составляющая. Требования к параметру k также являются противоречивыми: с одной стороны, для увеличения скорости сходимости процесса адаптации значение коэффициента k следует увеличивать, с другой стороны, с увеличением k уменьшается запас устойчивости, при этом существует предельно возможное значение коэффициента усиления, соответствующее условию устойчивости системы. Поэтому требуемое качество регулирования задается в виде некоторой (желательной) частотной характеристики следящей системы или в виде ограничений, накладываемых на ее переходную характеристику [4, 8]. При этом, с точки зрения надежности функционирования следящих систем автоматического управления, требование обеспечения запаса устойчивости может быть доминирующим.

Передаточной функции $K_0(p)$ разомкнутого контура вида (1) соответствуют передаточная функция замкнутого контура

$$K(p) = \frac{k}{p^3 T_0 T_1 + p^2 (T_0 + T_1) + p + k} \quad (2)$$

и дифференциальное уравнение третьей степени, описывающее динамические характеристики адаптивного контура:

$$T_0 T_1 \frac{d^3 x}{dt^3} + (T_0 + T_1) \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + kx = k\varepsilon, \quad (3)$$

где $x(t)$ — действующее внешнее возмущение, $\varepsilon(t)$ — сигнал ошибки, поступающий на исполнительный элемент.

Поскольку аналитическое решение дифференциальных уравнений выше второй степени для построения переходных характеристик является достаточно громоздким, используем метод определения вида переходной характеристики адаптивного контура по вещественной частотной характеристике $A(\omega) = \operatorname{Re} K(i\omega)$, где $K(i\omega)$ — частотная характеристика, соответствующая передаточной функции $K(p)$ замкнутого канала. В случае когда требуется одновременно обеспечить высокое быстродействие и запас устойчивости, для выбора коэффициента усиления k необходимо определить его максимальное значение, при котором

сохраняются соответствующие наличию необходимого запаса устойчивости свойства вещественной частотной характеристики $A(\omega)$.

Типовым требованием к качеству регулирования является неперевышение переходной характеристикой величины перерегулирования, составляющей 18 %. Для этого достаточно иметь невозрастающую непрерывную вещественную частотную характеристику $A(\omega)$ замкнутого контура управления [5]. Поэтому в качестве критерия наличия необходимого запаса устойчивости адаптивного контура было принято условие монотонного убывания его вещественной частотной характеристики $A(\omega)$ с увеличением частоты ω .

Как было показано выше, передаточной функции $K(p)$ замкнутого канала адаптивного контура вида (2) соответствуют частотная характеристика

$$K(i\omega) = \frac{k}{k - \omega^2(T_0 + T_1) + i\omega(1 - \omega^2 T_0 T_1)} \quad (4)$$

и вещественная частотная характеристика

$$A(\omega) = \frac{k[k - \omega^2(T_0 + T_1)]}{[k - \omega^2(T_0 + T_1)]^2 + [\omega(1 - \omega^2 T_0 T_1)]^2} \quad (5)$$

В частном случае при $T_1 \rightarrow 0$ адаптивный контур описывается частотной характеристикой

$$K(i\omega) = \frac{k}{k - \omega^2 T_0 + i\omega} \quad (6)$$

и вещественной частотной характеристикой

$$A(\omega) = \frac{k(k - \omega^2 T_0)}{(k - \omega^2 T_0)^2 + \omega^2}, \quad (7)$$

при этом дифференциальное уравнение (3) сводится к дифференциальному уравнению второй степени

$$T_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + kx = k\varepsilon \quad (8)$$

Отметим, что при $\omega \geq 0$ непрерывность характеристики $A(\omega)$ вида (5) и (7) обеспечивается при любых $k > 0$, $T_0 \geq 0$ и $T_1 \geq 0$. При анализе следящих систем с другими передаточными характеристиками адаптивного контура условие непрерывности соответствующих вещественных частотных характеристик в области положительных частот должно специально проверяться.

Анализ выражения (5) показывает, что требуемые свойства вещественной частотной характеристики $A(\omega)$ имеют место при различных сочетаниях параметров k , T_0 и T_1 . Используем обозначения $\alpha = T_0 / T_1$, $k_3 = kT_0$ и рассмотрим выбор эквивалентного коэффициента усиления k_3 при различных значениях параметра α (в общем случае можно полагать $\alpha > 1$).

Учитывая качественный характер выбранного критерия запаса устойчивости системы, задачу выбора коэффициента усиления, обеспечивающего высокое быстродействие и требуемый запас устойчивости, можно решить графоаналитическим методом с использованием результатов численного расчета характеристик $A(\omega)$ при различных значениях параметров α , k_3 и анализа их графиков.

На рис. 1 приведены графики, характеризующие влияние коэффициента k_3 на вид вещественных частотных характеристик $A(\omega_H)$ при различных значениях α . Здесь и далее частотные характеристики приводятся в зависимости от нормированной частоты $\omega_H = \omega T_0$. Рис. 1, а соответствует характеристике $A(\omega)$ вида (7), рис. 1, б — вида (5).

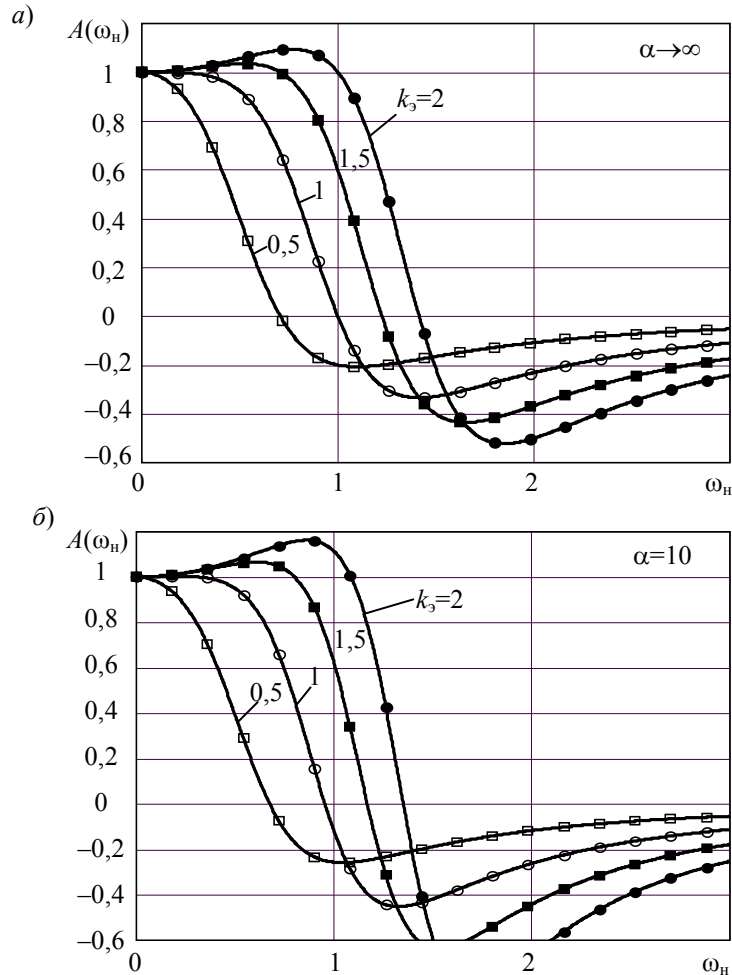


Рис. 1

Быстродействие следящей системы тем выше, чем шире полоса пропускания, определяемая по выбранному уровню частотной характеристики. Из двух постоянных времени T_0 и T_1 ключевое влияние на ширину полосы пропускания оказывает величина T_1 . При увеличении коэффициента усиления k и постоянном значении T_1 полоса пропускания расширяется, но при этом устойчивость системы снижается — происходит переход от монотонной частотной характеристики к резонансной и уровень ее пика повышается.

В качестве оптимальных значений коэффициента усиления k принимаются найденные по семействам вещественных частотных характеристик $A(\omega)$ значения $k_{opt} = k_{3, opt} / T_0$, где $k_{3, opt}$ — максимальные значения нормированного коэффициента усиления $k_3 = kT_0$, при которых для фиксированного соотношения $\alpha = T_0 / T_1$ выполняется условие монотонности характеристики $A(\omega)$. Таким образом, оптимальность в данном случае понимается как максимально возможное быстродействие системы при сохранении заданного запаса устойчивости. С увеличением постоянной времени T_1 и соответственно уменьшением параметра α значение $k_{3, opt}$ уменьшается.

На рис. 2, а—г приведены графики семейства вещественных частотных характеристик $A(\omega_H)$ вида (5) при различных значениях параметров k_3 и α в области значений нормированной частоты ω_H , близких к нулю, где и определяется монотонный или резонансный характер частотных характеристик.

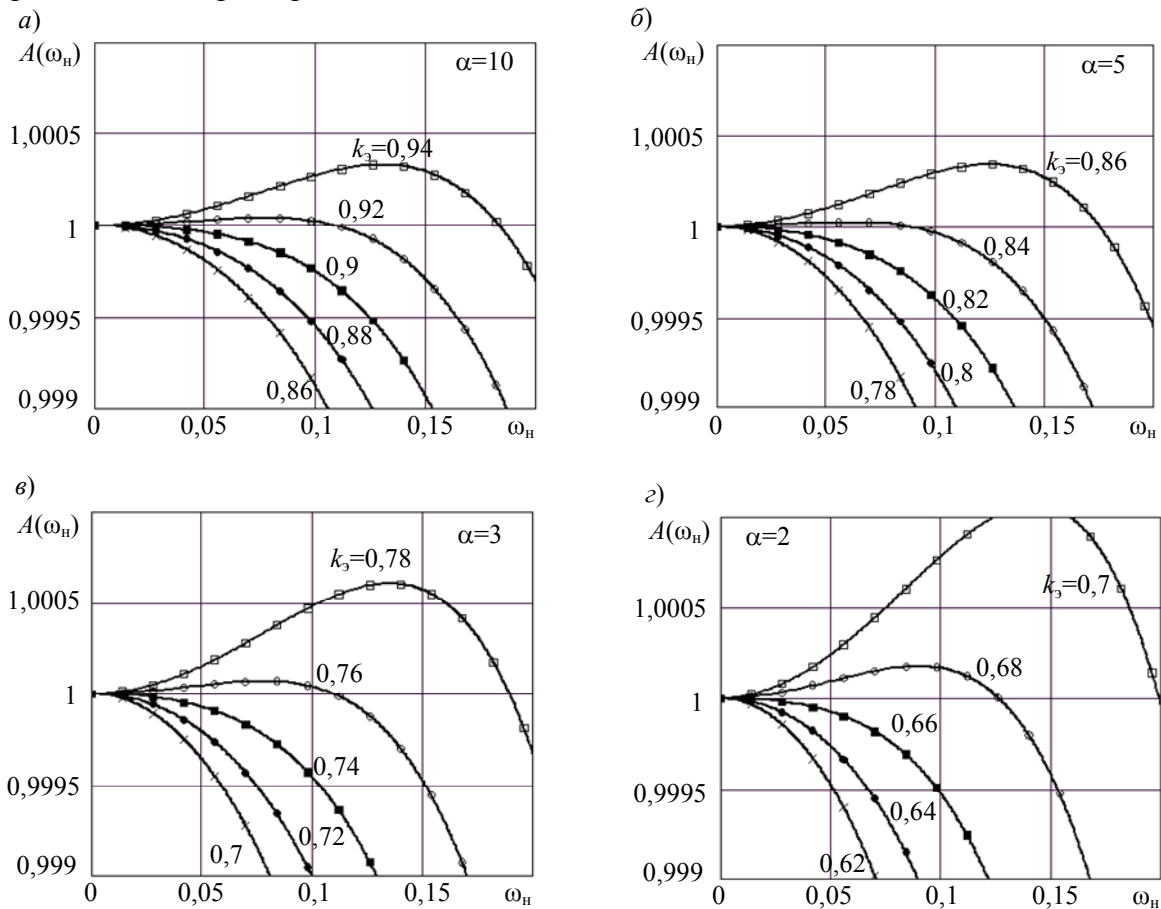


Рис. 2

Как следует из приведенных зависимостей, вид анализируемой вещественной частотной характеристики адаптивного контура весьма критичен к величине k_3 . Это подчеркивает важность выбора оптимального значения коэффициента усиления $k = k_{\text{opt}}$ для обеспечения требуемого быстродействия и запаса устойчивости. По семействам характеристик $A(\omega_H)$ вида (5) были определены значения эквивалентных коэффициентов усиления k_3 , при которых еще сохраняется их невозрастающий характер, а затем методом сплайн-интерполяции [9] получено аналитическое выражение, связывающее оптимальный коэффициент усиления адаптивного контура для передаточной характеристики вида (1) с его постоянными времени:

$$k_{\text{opt}} = \frac{1}{T_0} \left[1 - 0,67 \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{-0,85} \right]. \quad (9)$$

В диапазоне $5 \leq \alpha \leq \infty$, представляющем практический интерес, ошибка аппроксимации значений k_{opt} выражением (9) не превышает 1 %, при этом выбранному критерию качества регулирования соответствуют оптимальные значения k_{opt} , достаточно далекие от определяемых по критерию Гурвица [2, 5] предельно возможных значений коэффициента усиления $k_{\text{max}} = (1 + \alpha) / T_0$, особенно при больших α . Выбор коэффициента усиления k_{opt} , определяемого выражением (9), обеспечивает наибольшее быстродействие адаптивного контура при

фиксированных постоянных времени и заданном запасе устойчивости. При $T_1 \rightarrow 0$ согласно выражению (9) коэффициент $k_{\text{opt}} = 1/T_0$.

Итак, представлено графоаналитическое решение задачи оптимизации параметров адаптивного контура следящей системы автоматического управления по критерию максимального быстродействия при обеспечении требуемого запаса устойчивости. Предложенная методика может быть реализована при задании передаточной характеристики адаптивного контура произвольного вида при условии непрерывности соответствующей вещественной частотной характеристики в области положительных частот. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании различных следящих систем автоматического управления, применяемых в составе технологических установок и робототехнических систем, а также транспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими процессами. М.: Наука, 1981. 448 с.
2. Радиоавтоматика / В. А. Бесекерский, А. А. Елисеев, А. В. Небылов и др.; Под ред. В. А. Бесекерского. М.: Высш. школа, 1985. 271 с.
3. Воронцов М. А., Корябин А. В., Шмальгаузен В. И. Управляемые оптические системы. М.: Наука, 1989. 272 с.
4. Растринин Л. А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. 630 с.
5. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
6. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высш. школа, 1989. 263 с.
7. Лукьянов Д. П., Корниенко А. А., Рудницкий Б. Е. Оптические адаптивные системы. М.: Радио и связь, 1989. 240 с.
8. Астроследящие системы / Б. К. Чемоданов, В. Л. Данилов, В. Д. Нефедов и др.; Под ред. Б. К. Чемоданова. М.: Машиностроение, 1977. 304 с.
9. Завьялов Ю. С., Корнейчук Н. П. Сплайны в теории приближений. М.: Наука, 1984. 352 с.

Сведения об авторах

- Георгий Николаевич Мальцев** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космических радиотехнических систем, Санкт-Петербург; E-mail: georgy_maltsev@mail.ru
- Глеб Игоревич Афонин** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра перспектив развития АСУ и связи, Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник, начальник лаборатории; E-mail: csm@nm.ru

Рекомендована кафедрой
космических радиотехнических
систем

Поступила в редакцию
06.11.13 г.