

УДК 62-50

В.В. ЧЕРВОНЮК*ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия*

О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ АБСОЛЮТНО УСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ (НОВЫЙ ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ)

В статье рассмотрена проблема реализации абсолютно устойчивых систем управления. Показано, что неустойчивость управления в современных системах автоматики связана с безальтернативным использованием в них алгоритма ПИД - регулятора. Для устранения этого недостатка предложен новый принцип адаптивного противофазного воздействия («А-ф» регулятор) на объект управления, реализующий на каждом шаге коррекции минимизацию отклонения регулируемого параметра последовательным изменением задержки корректирующего действия, а затем уровня корректирующего действия.

регулирование, критерии устойчивости, ПИД-регулятор, амплитуда, фазовый угол,, преобразование Фурье

Введение

В настоящее время нет систем автоматического управления (САУ), в которых полностью исключена неустойчивость управления. Это определяется тем, что основа построения современной САУ – ПИД-регулятор [1]. В силу того, что алгоритм ПИД – регуляторов построен на компенсации величины рассогласования между фактическими значениями регулируемого параметра (отклонения, производной, интеграла) и требуемыми их значениями, как будет показано ниже, принципиально невозможно обеспечить абсолютную устойчивость канала управления из-за не учета фазовых сдвигов в каналах управления, объекта управления и в обратной связи. В результате в практике периодически возникает необходимость решения проблемы устойчивости САУ. Автор, задавшись вопросом: «Возможно ли создание абсолютно устойчивой САУ?», предлагает по-новому взглянуть на проблему обеспечения устойчивости САУ.

1. Принцип активного подавления

В САУ используются два принципа управления

(называемых α и β) соответственно:

- поддержание необходимого параметра, значение которого задается оператором, возможно с коррекцией по внешним условиям (частный случай – выдерживание циклограмм), т.е. программное управление;
- поддержание параметра в условиях изменений вызываемых внешними условиями или действиями оператора (изменение косвенных параметров).

Первый способ используется, когда практически ясна функция управления и используются стандартные режимы (перейти от режима А к режиму В путем изменения установки).

Второй используется для поддержания значения параметра в условиях необходимости прямого изменения параметра, определяющего работоспособность (основную функцию) объекта управления (например, тягу винта вертолета или самолета).

Анализ публикации показывает, что оценка устойчивости систем управления сильно формализована (различные критерии) и, как правило, мало что дает для практики. В статье автор попытался выра-

ботать свой критерий устойчивости.

Представим для простоты, что регулируемый параметр изменяется по синусоидальному закону. Поставим задачу, как должно изменяться корректирующее взаимодействие, чтобы через некоторое время было обеспечено нахождение контролируемого параметра в требуемых пределах (обеспечена требуемая точность).

Запишем процесс коррекции в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Delta A &= A_B \cos \omega t - A_p \cos(\omega t + \varphi) = \\ &= \Delta A_B \cos(\omega t + \varphi_\Sigma),\end{aligned}\quad (1)$$

где A_B – процесс изменения регулируемого параметра, связанный с изменением внешних воздействий на объект управления;

A_p – значение регулируемого параметра соответствующего компенсирующему воздействию, приведенного к входу в регулятор, т.е. $A_p = A_p' * H(f)$, где A_p' – величина компенсирующего воздействия на выходе системы управления; $H(f)$ – передаточная функция канала управления.

Проделав с (1) ряд преобразований получим:

$$\begin{aligned}\Delta A &= \sqrt{(A_B + A_p \cos \varphi)^2 + (A_p \sin \varphi)^2} = \\ &= \sqrt{A_B^2 + A_p^2 + 2A_B A_p \cos \varphi}; \\ \varphi_\Sigma &= \arctg \left(\frac{A_p \sin \varphi}{A_B + A_p \cos \varphi} \right)\end{aligned}$$

и учитывая, что процесс регулирования устойчив, если $A_{Bi} > A_{Bi} + 1$ (или в другом виде $\Delta A < A_B$),

получаем: $A_B^2 + A_p^2 + 2A_B A_p \cos \varphi \leq A_B^2$, т.е.

$$\begin{aligned}1 + \frac{2A_B}{A_p} \cos \varphi &\leq 0 \quad \text{или} \\ \cos \varphi &\leq -\frac{1}{2} \frac{A_p}{A_B}.\end{aligned}\quad (2)$$

Соотношение (2) определяет условие абсолютной устойчивости процесса управления.

На рис. 1 в соответствии с (2) представлена зона устойчивости процесса регулирования.

В зоне устойчивости, как видно из рис.1, сдвиг фазы и соотношение между уровнем возмущения и воздействия изменяются в широких пределах. Видно, что только изменением уровня воздействия устранить неустойчивость можно только в области 2. Если система находится в области 1, устойчивость может быть обеспечена только изменением фазового угла. Обобщая можно сформулировать следующее правило: устойчивость процесса управления всегда обеспечивается изменением величины фазового угла воздействия и не всегда изменением уровня воздействия. При этом следует иметь в виду, что по существу основная проблема попадания в область устойчивости сводится к определению точных значений A_p , ω и φ .

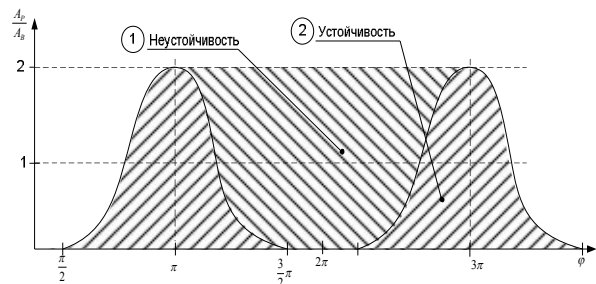


Рис. 1. Зона устойчивости процесса регулирования

Основная проблема организации противофазного управления заключается в необходимости точно определять частоту процесса, т.к. из-за малейшего рассогласования частот отклика и воздействия канал управления будет неустойчивым. Ниже будет показано как это можно практически обеспечить.

Следует иметь в виду, что параметр A является контролируемым параметром (давление, температура, обороты и т.п.). По отклонению параметра A от программы формируется воздействие Π (например, в ГТД: изменение угла направляющих аппаратов, изменение расхода топлива и т.п.) формируется воздействие Π (например, изменение расхода топлива и т.п.). При этом как обычно необходим переход от контролируемого параметра (A) к параметру

воздействия (Π). Это можно простым путем при наличии соответствующих функциональных зависимостей (характеристик объекта управления) При этом как обычно необходим переход от контролируемого параметра (A) к параметру воздействия (Π). Это можно простым путем при наличии соответствующих функциональных зависимостей $\Pi = f(A)$:

$$\Delta \Pi = \frac{d\Pi}{dA} \Delta A,$$

где $\Delta A = A_{B \text{ треб}} - A_{P \text{ факт}}$ или в другом виде

$$\Delta \Pi = K_A \cdot \Delta A, \quad (3)$$

где K_A – коэффициент чувствительности в общем случае, зависящий от A ($K_A = f(A)$).

По существу по формуле (3) вычисление производится также как в случае определения величины корректирующего воздействия по пропорциональной составляющей ПИД - регулятора.

Гораздо сложнее дело обстоит с фазовой задержкой. Фазовая задержка в канале управления и обратной связи вызывается несколькими причинами.

Основными причинами задержек в ГТД (рис. 2) являются:

1) задержки, связанные с процессом подачи топлива и превращение его в необходимые значения регулируемого параметра (задержка, связанная с преобразованием подаваемого топлива в крутящий момент ротора двигателя с дальнейшим обеспечением требуемого значения контролируемого параметра

$$\Delta G = G_{исх} - G_{mr};$$

$$\Delta \Pi = K_A \int_0^{\tau_{np}} \Delta G dt;$$

$$\Pi_{mr} = \Pi_{фак} + \Delta \Pi,$$

где G_{mr} – расход топлива в двигателе, т.е. при скачкообразной установке в САУ требуемого равновесного значения расхода топлива требуемое значение контролируемого параметра реализуется только через определенное время τ_{np} , определяе-

мое фазочастотными характеристиками объекта управления);

2) задержки из-за динамических процессов в газозоудном тракте, трансмиссии и т.п., т.е. в канале обратной связи;

3) задержки в системе измерения;

4) задержки в связи с обработкой результатов измерения.

Таким образом

$$\Delta \tau_{\Sigma} = \Delta \tau_{\text{алгоритм}} + \Delta \tau_{\text{дозирования}} + \Delta \tau_{\text{энерг.превр.}} + \Delta \tau_{\text{обратной.связ.}} \quad (4)$$

Два последних члена (4) зависят от внешних условий. В частности для вертолетных двигателей последний член этого выражения имеет особое значение. Это связано с тем, что для таких двигателей обычно основной канал управления поддерживает частоту вращения ротора свободной турбины. В силу низких собственных частот вертолетной трансмиссии внешнее возмущение может вызывать в определенных условиях её крутильные колебания, фиксируемые датчиком частоты вращения. Эти частоты настолько низки, что САУ и двигатель способны поддерживать эти колебания в случае неудачной программной реализации ПИД - регулятора.

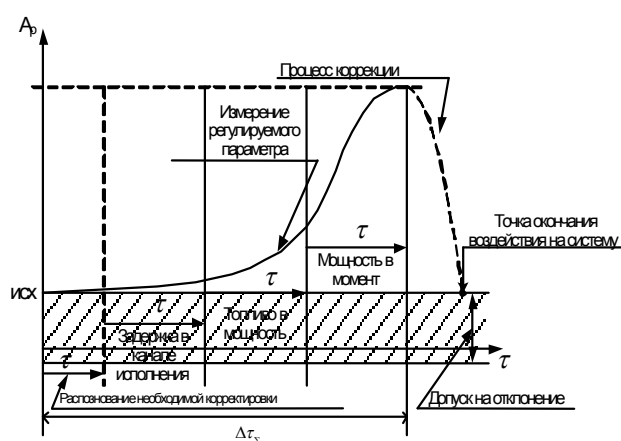


Рис. 2. Анализ причин задержек в ГТД

Основная физическая причина неустойчивости канала управления вертолетных силовых установок связана с наличием сдвига по времени(фазе) кру-

тящего момента относительно угла закрутки вала трансмиссии. Колебательные изменения угла закрутки вала воспринимаются датчиком частоты вращения вала свободной турбины, что приводит при резонансе вала трансмиссии к изменению сдвига фазы в канале обратной связи на $\pi/2$ (сдвиг между силой и вызванной ею деформацией). Отсутствие в канале управления топливом соответствующей корректировки задержки на такое значение приводит к неустойчивости, которая в свою очередь приводит к механической раскачке трансмиссии. При этом неустойчивость имеет как правило мягкий характер (при минимальном внешнем воздействии наблюдаются постоянная раскачка).

Следует отметить, что здесь могут возникнуть две ситуации:

1) $\text{MAX } f_{\text{cob}} \geq f_{\text{eoz}}$ (устойчиво) – колебания в канале управления (в системе обратной связи) без раскачки трансмиссии (режим критичен в плане обеспечения механической прочности конструкции);

2) $\text{MAX } f_{\text{cob}} \leq f_{\text{eozd}}$ (не устойчиво) – САУ способствует раскачке трансмиссии.

Таким образом, проблемы создания абсолютно устойчивого регулятора заключается в обеспечении его самосинхронизации с откликом (возмущением) по фазе и уровню. При этом, если собственные частоты двигателя ниже чем нижняя частота внешних воздействий то объект управления устойчив и САУ не может привести его в неустойчивое состояние.

Однако следует иметь ввиду, что при отсутствии условий раскачки не адекватное введение коррекции по фазовому углу может также привести к раскачке объекта управления.

Откуда следует, что для исключения режимов неустойчивости в каналах управления необходимо иметь адаптивные системы. При этом адаптивный алгоритм управления в свою очередь должен иметь следующие составляющие части:

1) обнаружение недопустимых изменений (отклонений) контролируемых параметров;

2) постепенное изменение величины задержки (уменьшение или увеличение, то, которое обеспечивает уменьшение обнаруженного отклонения);

3) в процессе или после завершения процесса изменение фазы (в момент достижения величиной рассогласования контролируемого параметра минимального значения) выполняется изменение уровня воздействия (относительно вычисленного по соотношению (3): либо увеличивается, либо уменьшается - обеспечивая монотонность уменьшения рассогласования);

4) цикл 1-2-3-4 повторяется.

Здесь следует заметить, что такой адаптивный алгоритм управления снимает проблему точного определения частоты.

На правах автора назовем этот принцип управления «А-ф»-регулятором.

Особый момент возникает при введении фазовой коррекции для широкополосного воздействия на объект управления. В этом случае для обеспечения устойчивости в независимости от частоты воздействия, необходимо поддерживать $\varphi = \text{const}$, что эквивалентно введению переменной по частоте временной задержки

$$\Delta\tau = \frac{\varphi}{\omega} = \text{var.}$$

При этом для максимальной частоты требуется минимальная временная задержка. Введение постоянной временной задержки приводит к разнофазовому сдвигу для разночастотных составляющих воздействия (рис. 3) и соответственно к предпосылке возникновения неустойчивости управления на определенных частотах.

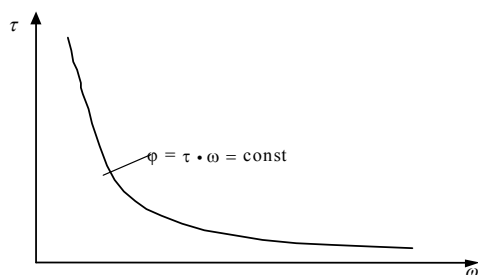


Рис. 3. Изменение величины временной задержки в зависимости от частоты сигнала при одинаковом фазовом сдвиге

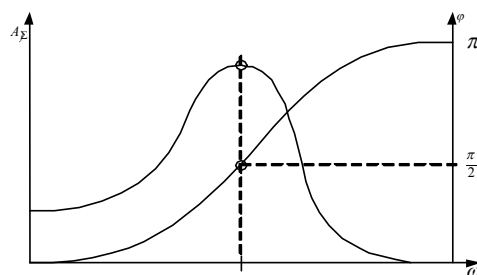


Рис. 4. Типовая зависимость уровня суммарного воздействия и его фазового сдвига для ПИД-регулятора

2. Реализация «А-φ»-регулятора

Для существующих системы управления, построенных на ПИД-регуляторе, возможность адаптивного управления за счет раздельного изменения фазы и уровня воздействия принципиально исключается, особенно для широкополосного воздействия на объект управления.

Покажем это.

Суммарное воздействие, формируемое ПИД-регулятором, может быть представлено в виде следующего соотношения:

$$\begin{aligned} I_{\Sigma}^{\text{ПИД}} &\sim A_1 \cos \omega t + A_2 \omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + \\ &+ \frac{A_3}{\omega} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= \left(\frac{A_3}{\omega} - A_2 \omega \right) \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + A_1 \cos \omega t = \\ &= A_{\Sigma} \cos(\omega t + \varphi), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_{\Sigma} &= \sqrt{\left(\frac{A_3}{\omega} - A_2 \omega \right)^2 + A_1^2}; \\ \varphi &= \arctg \frac{A_1}{\frac{A_3}{\omega} - A_2 \omega}. \end{aligned} \quad (5)$$

Графически соотношения (5) представлено в классически известном виде на рис. 4.

По существу соотношения (5) могут быть преобразованы в диную формулу:

$$A_{\Sigma} = F(\omega, \varphi). \quad (6)$$

Таким образом для ПИД-регуляторов характерно одновременное изменение фазового угла и уровня воздействия (исключается возможность разделенного этих параметров). Поэтому изменение значения величины воздействия адаптивного (самонастраивающегося) регулятора приводит к изменению фазы. Здесь следует отметить, что задержка по фазе ПИД-регулятора имеет существенно нелинейный характер по частоте.

Отчасти поэтому в системах управления, построенных на принципах ПИД-регулятора невозможно обеспечить устойчивость даже при изменении в реальном времени коэффициентов A_1 , A_2 , A_3 (из-за невозможности формализовать функцию цели, т.е. определить формальную процедуру установки необходимых значений фазового сдвига и амплитуды), особенно в широком диапазоне частот внешнего воздействия. Заметить, что вообще говоря ПИД-регулятор по существу является частным случае «А-φ»-регулятора (5). Однако невозможность с его помощью раздельно изменять A и φ приводит к невозможным обеспечить устойчивость процесса регулирования во всем многообразии внешних условий (т.е. реализовать абсолютно устойчивый регулятор). По существу результаты изменения уровня любой составляющей ПИД-регулятора на рис. 1 будет изображаться в виде траектории и устойчивость будет обеспечена только на участке этой траектории, находящейся в пределах области 2.

Остановимся несколько подробнее на особенностях реализации адаптивного (самонастраивающегося) алгоритма управления на основе «А-ф»-регулятора.

Если считать, что внешние воздействия не изменяются в течении одного цикла, тогда процесс регулирования будет устойчивый, в случае

$$\Delta A_n = A_0^{n\alpha} (1-k)^n < \Delta A_{зад}, \quad (7)$$

где

$$k = \frac{A_P}{A_B} = \frac{A_{Pi+1}}{\Delta A_i};$$

$$\Delta A_i = A_{Bi} - A_{Pi};$$

n – число циклов коррекции (число периодов колебаний параметра).

При этом как следует из (7), что

$$n = \frac{\log \frac{\Delta A_{зад}}{A_0}}{\log(1-k)}.$$

Тогда длительность переходного процесса будет зависеть от частоты и может быть определена из следующей формулы: $\tau = n \frac{1}{\omega}$.

В этом случае для реализации абсолютно устойчивого управления необходима реализация следующего алгоритма управления:

$$A(t) \xrightarrow{\text{преобразование Фурье}} F_{XX}(f) \xrightarrow[\text{преобразование}]{\text{обратное}} \frac{\Phi_A(f) + \Delta\Phi; K_A A(f)}{F_{XX}^{-1}(f)} \rightarrow \text{воздействие}$$

где $A(t)$ – сигнал обратной связи (сигнал датчика контролируемого параметра);

$F_{xx}(f)$, $F_{xx}^{-1}(f)$ – прямое и обратное преобразование Фурье сигнала A .

Следует заметить, что необходимость использования преобразования Фурье в алгоритмах управления «А-ф»-регулятора приводит к необходимости решения проблемы быстродействия. Для возмущений в области малых частот для корректного ис-

пользования преобразования Фурье необходимо иметь длину реализации по крайней мере равную или большую одного периода колебаний, что приводит к задержкам в канале управления как минимум равным периоду минимальной частоты. При регулировании на больших частотах возникает проблема обеспечения быстродействия системы обработки входных сигналов.

Заключение

1. Разработан новый критерий оценки устойчивости системы: «объект управления – обратная связь – регулятор – канал управления»:

$$\cos\varphi \leq -\frac{1}{2} \frac{A_P}{A_B},$$

при условии $\omega_p = \omega_g = \omega_{ар}$ – устойчиво, где ω_g , ω_p – соответственно частота воздействия и частота отклика.

2. Современные САУ, построенные на использовании ПИД – регуляторов, в определенных условиях могут приводить к неустойчивости управления, особенно для вертолетных ГТД в контуре управления частотой вращения ротора свободной турбины, из-за не адекватной компенсации задержек в канале обратной связи.

3. Использование «А-ф»-регулятора, заключающегося в последовательной адаптивной коррекции фазовых задержек и уровня воздействия в канале управления позволяет полностью избавить системы регулирования от неустойчивости.

Литература

1. Анализ и статистическая динамика системы автоматического управления. Т. 1 – 3 / Под ред. Н.Д. Егуптова. – М.: МГТУ, 2003. – 1200 с.

Поступила в редакцию 7.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Т. Шепель, ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск.

