

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

© 2006 В.В. Червонюк

ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск Ярославской области

В статье рассмотрен вопрос о 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.

### 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. В силу того, что алгоритм работы 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 из-за отсутствия 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 поновому взглянуть на проблему обеспечения устойчивости системы управления.

Можно возразить, что ПИД после тщательной настройки коэффициентов будет обеспечивать устойчивость процесса управления во всех условиях эксплуатации (в том числе непроверенных, редких в реализации), и это достаточно для решения практических задач. Однако в частном случае с механически резонирующим звеном в обратной цепи возможна неустраняемая неустойчивость. С другой стороны и реализации «А-Ф» регулятора имеют проблемы, заключающиеся в незнании инструментальной задержки в цепи «воздействие - отклик».

### Принцип активного подавления

В САУ используются два принципа управления, называемых  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно:

а) поддержание необходимого пара-

метра, значение которого задается оператором, возможно с коррекцией по внешним условиям (частный случай - выдерживание циклограмм), т.е. программное управление;

б) 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 дает для практики. В статье автор попытался выработать 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:

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

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

$A_p$  - значение регулируемого параметра,

соответствующего компенсирующему воздействию.

Проделав с (1) ряд преобразований, получим

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

и учитывая, что процесс регулирования устойчив, если  $A_{B_i} > A_{B_{i+1}}$  (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.  $1 + \frac{2A_B}{A_P} \cos \varphi \leq 0$  или

$$\cos \varphi \leq -\frac{1}{2} \frac{A_P}{A_B}. \quad (2)$$

Соотношение (2) определяет условие абсолютной устойчивости процесса управления.

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

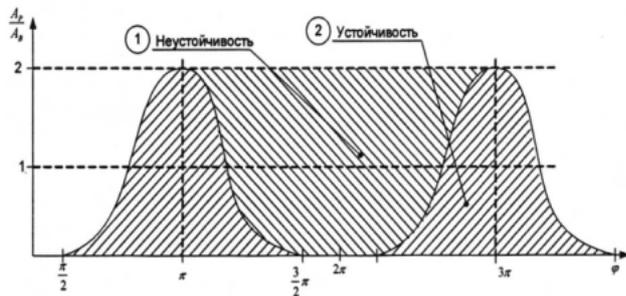


Рис.1. Зона устойчивости процесса регулирования

В зоне устойчивости сдвиг фазы и соотношение между уровнем возмущения и воздействием 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 учитывать, что, по существу, основная проблема попадания в область устойчивости сводится к определению точных

значений  $A_P$ ,  $\omega$  и  $\varphi$ .

Следует иметь ввиду, что параметр  $A$  является контролируемым параметром (давление, температура, обороты и т.п.). По отклонению параметра  $A$  от программы формируется воздействие  $\Pi$  (например, в ГТД: изменение угла направляющих аппаратов, изменение расхода топлива и т.п.). При этом как обычно необходим переход от контролируемого параметра  $A$  к параметру воздействия  $\Pi$ . Это возможно простым путем при наличии соответствующих функциональных зависимостей  $\Pi = f(A)$ :

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

где  $\Delta A = A_{Втрѐб} - A_{рфакт}$

или в другом виде  $\Delta \Pi = K_A \Delta A$ ,

(3)

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

По существу по формуле (3) вычисление производится так же, 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:



Рис.2. Основные причины задержек в ГТД

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

$$\Delta G = G_{исх} - G_{тр},$$

$$\Delta \Pi = K_A \int_0^{\tau_{пр}} \Delta G dt,$$

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

т.е. при скачкообразной установке в САУ требуемого равновесного значения расхода топлива требуемое значение контролируемого параметра реализуется только через определенное время  $\tau_{пр}$ , определяемое фазочастотными характеристиками объекта управления);

2) задержки из-за динамических процессов в газоздушном 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,

$$\Delta \tau_{\Sigma} = \Delta \tau_{алгоритм} + \Delta \tau_{дозирования} + \Delta \tau_{энерг.превр.} + \Delta \tau_{обр.связи} \quad (4)$$

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. Основная физическая причина неустойчивости канала управления вертолетных силовых установок связана с наличием сдвига по времени (фазе) крутящего 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 приводит к неустойчивости, которая, в свою очередь, приводит к механической раскачке трансмиссии. При этом неустойчивость имеет, как правило, мягкий характер (при минимальном внешнем воз-

действии наблюдаются постоянная раскачка).

Следует отметить, что здесь могут возникнуть две ситуации:

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

2)  $MAX f_{cob} \leq f_{возд}$  (неустойчиво) - САУ способствует раскачке трансмиссии.

Таким образом, проблемы создания абсолютно устойчивого регулятора заключаются 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.

Следует, однако, иметь в виду, что при отсутствии условий раскачки неадекватное введение коррекции по фазовому углу может также привести к раскачке объекта управления. 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 для обеспечения уменьшения 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.

На правах автора назовем этот принцип управления « $A - \varphi$ » - 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  $\varphi = const$ , что эквивалентно введению переменной по частоте временной задержки

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

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

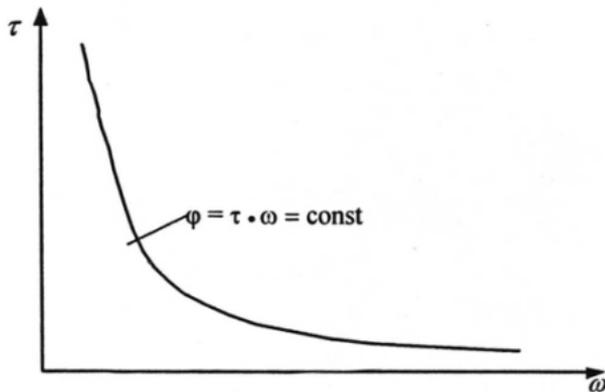


Рис.3. Изменение величины временной задержки в зависимости от частоты сигнала при одинаковом фазовом сдвиге

Для существующих систем управления, построенных на ПИД - регуляторе, возможность адаптивного управления за счет отдельного 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:

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

где  $A_{\Sigma} = \sqrt{\left[ \left( \frac{A_3}{\omega} - A_2 \omega \right)^2 + A_1^2 \right]}$ ,

$$\varphi = \arctg \frac{A_1}{\frac{A_3}{\omega} - A_2 \omega}. \quad (5)$$

Графически соотношения (5) представлены в классическом виде на рис. 4. и могут быть преобразованы в единую формулу

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

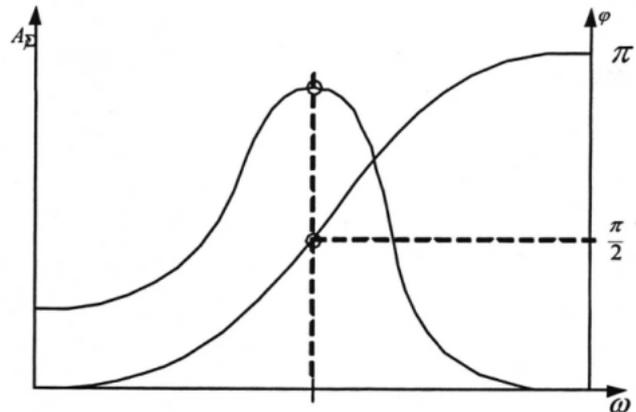


Рис.4. Типовая зависимость уровня суммарного воздействия и его фазового сдвига для ПИД - регулятора

Таким образом для ПИД - регуляторов характерно одновременное изменение фазового угла и уровня воздействия (исключается возможность разделения этих параметров). Поэтому увеличение значения величины воздействия адаптивного (самонастраивающегося) регулятора приводит к изменению фазы. Следует отметить, что фазовая задержка 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  $A_1, A_2, A_3$  (невозможно формализовать функцию цели), особенно в широком диапазоне частот внешнего воздействия. Заметим, что ПИД - регулятор является частным случаем «А - ф»-регулятора. Однако невозможность с его помощью отдельно изменять А и ф делает невозможным обеспечение устойчивости процесса регулирования во всем многообразии внешних условий (т.е. реализовать абсолютно устойчивый регулятор). По существу результат 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 (самоадаптивного) алгоритма управления на основе «А-Ф» - регулятора.

Если считать, что внешние воздействия не изменяются в течение одного цикла, то процесс регулирования будет устойчив в случае

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

где  $k = \frac{A_p}{A_B} = \frac{A_{p_{i+1}}}{\Delta A_i}$ ;  $\Delta A_i = A_{Bi} - A_{pi}$ ;  $n$  - число циклов коррекции (число периодов колебаний параметра).

При этом, как следует из (7),

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

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:

$$A_{Bi} \xrightarrow{\text{преобразование Фурье}} \rightarrow F_{A_B}(f) \frac{\varphi_{A_B}(f) + \Delta f; K_{A_B} A_B(f)}{\text{обратное преобразование Фурье}} A_{A_B}^{-1}(f) \rightarrow \rightarrow \text{воздействию } e \rightarrow A_{Bi+1}(f) \rightarrow \dots$$

где  $A_{Bi}$  - сигнал обратной связи (сигнал датчика контролируемого параметра);

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

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 использования преобразования Фурье необходимо иметь длину реализации, 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.

### Выводы

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

$$\cos \varphi \leq -\frac{1}{2} \frac{A_p}{A_B} - \text{устойчиво,}$$

где  $\varphi$  - сдвиг фазы между параметром воздействием регулятора на объект управления и откликом объекта;

$A_B$  - амплитуда воздействия;

$A_p$  - амплитуда 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 некомпенсации 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 избавиться системы регулирования от неустойчивости.

## ABOUT POSSIBILITY OF THE DEVELOPMENT ABSOLUTELY STABLE SYSTEMS OF CONTROL (NEW PRINCIPLE OF CONTROL)

© 2006 V.V. Chervonyuk

In the article on the base of the theoretical analysis it is shown that in the control management systems, which are built on PID - regulator the possibility of instability of the process of the regulation is not absolutely excluded. The possibility of realization of absolutely stable system of control by execution of the amplitude-phase correction («A-F»-regulator) has been installed the algorithm of realization of «A-F»- regulator in condition of the broadband influence is presented.