

## Л и т е р а т у р а

1. Овсянников В.В., Боровский В.И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. -М.:Машиностроение, 1971.- 539 с.
2. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. -М.:Наука, 1971.- 743 с.
3. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. -М.:Наука, 1973. - 583 с.
4. Фанк И.Е. Устойчивость проходного клапана. -Теоретические основы инженерных расчетов. Сер. "Д", 1964, № 2, с.50-56.
5. Есин В.И., Кузнецова В.Ф. Устойчивость гидравлического клапана. -Известия вузов. Сер. Машиностроение, 1968, № 8, с.84-87.

УДК 621.45.04:62-553.4

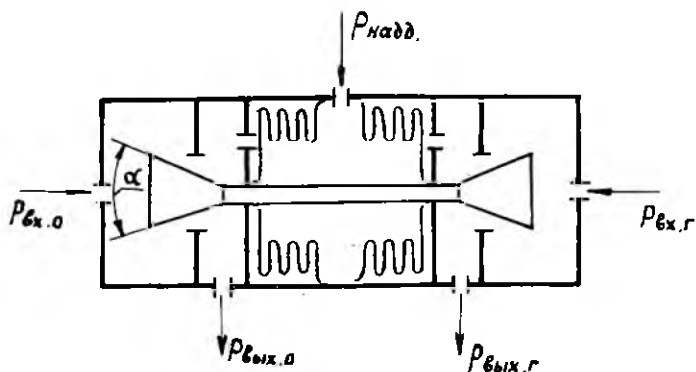
А.Е.Жуковский, А.Ф.Малеев

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РЕГУЛЯТОРОМ СООТНОШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА

При функционировании двигательной установки (ДУ) с реактивными двигателями управления движением летательного аппарата, работающими на двухкомпонентном жидком топливе, на выходе из топливных баков окислителя и горючего может возникать разность давлений компонентов. Причиной этому служат погрешности в настройке регуляторов давления при независимых системах наддува баков, а также технологические погрешности при изготовлении металлических вытеснительных диафрагм, в результате чего эти диафрагмы имеют различные жесткостные характеристики. Разность давлений на выходе из топливных баков вызывает отклонение соотношения компонентов топлива от настроечного значения, что ведет к снижению экономичности двигателей и к неодновременной выработке компонентов топлива из баков.

Для устранения этого недостатка в топливную систему ДУ устанавливают специальный регулятор соотношения компонентов топлива (РСКТ) с регулирующими органами в обеих топливоподающих магистра-

лях (рис. I). Регулятор должен удовлетворять следующим основным требованиям [1]. При максимально возможной разности давлений на



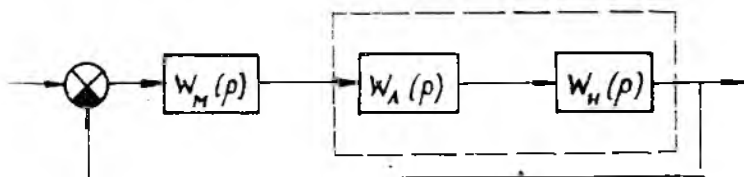
Р и с. I. Регулятор соотношения компонентов топлива

выходе из баков РСКТ должен обеспечивать минимально допустимую разноподпорность топливных магистралей ( $\Delta p_{\text{м}}$ ) во всем диапазоне изменения расходов, который определяется числом одновременно работающих двигателей. При равенстве давлений на выходе из баков потери давления в проточных частях РСКТ ( $\Delta p_{\text{пот}}$ ) должны быть минимальными.

Эффективность РСКТ определяется его конструктивными параметрами, основные из которых – угол конусности клапанов  $\alpha$  и величина хода подвижной части регулятора  $h$ . Анализ результатов расчетного и экспериментального исследований статических характеристик РСКТ показал, что для повышения его эффективности следует увеличивать угол  $\alpha$  одновременно с уменьшением хода  $h$ . В то же время было обнаружено, что при определенных сочетаниях  $\alpha$  и  $h$  в топливоподающей системе с РСКТ возникают незатухающие колебания давления. Причем, склонность к их возникновению возрастает с уменьшением расхода рабочего тела и с увеличением разноподпорности топливных баков.

Наличие области неустойчивости в плоскости основных конструктивных параметров РСКТ резко ограничивает возможность выбора их значений, обеспечивающих выполнение предъявляемых к РСКТ требований.

Рассмотрим механизм возникновения неустойчивости в топливоподающей системе с РСКТ. На рис.2 показана структурная схема



Р и с. 2. Структурная схема линии топливоподачи с регулятором соотношения компонентов топлива

замкнутой системы, состоящей из линии топливоподачи и регулятора, который представлен в виде последовательного соединения двух звеньев: линейного с передаточной функцией  $W_A(p)$  – подвижная часть РСКТ, движение которой описывается уравнением колебательного звена, и нелинейного с динамическим коэффициентом передачи  $W_H(p)$  – это дроссель, имеющий статическую характеристику

$$Q_{др} = K \sqrt{\Delta P_{вых}} \quad (1)$$

где  $Q_{др}$  – расход рабочего тела через дроссель;  $\Delta P_{вых}$  – перепад давления на дросселе;  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Наличие нелинейного звена делает возможным возникновение в системе автоколебаний, которые в случае их устойчивости проявляются в виде незатухающих колебаний с постоянной амплитудой и определенной частотой. Именно такой вид имеют колебания давления, наблюдаемые в рассматриваемой системе топливопитания с РСКТ.

Согласно методу гармонического баланса, разработанному Л.С.Гольдфарбом, рассмотрим разомкнутую систему, в которой линейные звенья объединены в одно эквивалентное звено (линейная часть), т.е.  $W_{л.ч}(p) = W_H(p)W_A(p)$ , а статическая характеристика нелинейного звена линеаризована в частотной области.

Линеаризация заключается в том, что при подаче на вход нелинейного звена синусоидального сигнала  $x = a \sin \omega t$  нелинейная функция  $F(x)$  на выходе нелинейного звена заменяется ее первой гармоникой разложения в ряд Фурье  $F(x) = A_0 + B_1 \sin \omega t + A_1 \cos \omega t$ . Поскольку зависимость (1) симметричная и нечетная, то  $A_0 = 0$  и, кроме того, в разложении можно пренебречь величиной  $A_1$ , т.е.  $F(x) \approx B_1 \sin \omega t$ , где  $B_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \sin \omega t d(\omega t)$ .

Таким образом, получим

$$F(a \sin \omega t) = \left[ \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \kappa \sqrt{a \sin \omega t} \sin \omega t d(\omega t) \right] \sin \omega t,$$

а после преобразований получаем

$$F(x) = \frac{x \kappa}{\pi \sqrt{a}} \varphi,$$

где 
$$\varphi = 4 \int_0^{\pi/2} \sqrt{\sin \omega t} \sin \omega t d(\omega t) \approx 3,46.$$

В результате можно записать выражение динамического коэффициента передачи нелинейного звена

$$W_H(a) = \frac{3,46 \kappa}{\pi \sqrt{a}}. \quad (2)$$

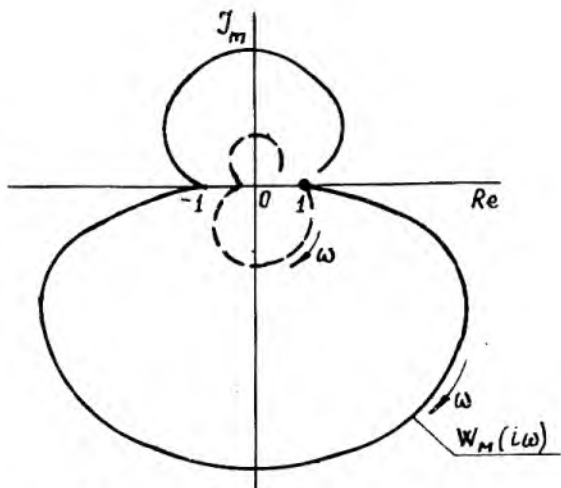
Допустимость проведенной линеаризации основывается на том, что линейная часть системы является фильтром по отношению к высокочастотным гармоническим составляющим, о чем говорит вид экспериментальной АЧХ трубопроводной линии (рис.3,а).

Условие возможности возникновения автоколебаний в рассматриваемой системе соответствует равенству  $W_{A, \omega}(i\omega)W_H(a) = -1$ , обычно разрешаемому графически, для чего на комплексной плоскости строится АЧХ линейной части и взятый с противоположным знаком обратный динамический коэффициент передачи нелинейного звена. Кривая  $W_{A, \omega}(i\omega)$  строится как произведение АЧХ топливной магистрали (см.рис.3,а) и АЧХ колебательного звена - подвижной части регулятора (см.рис.3,б). Вид АЧХ линейной части приведен на рис.3,в, здесь же нанесен и годограф  $-\frac{1}{W_H(a)}$ .

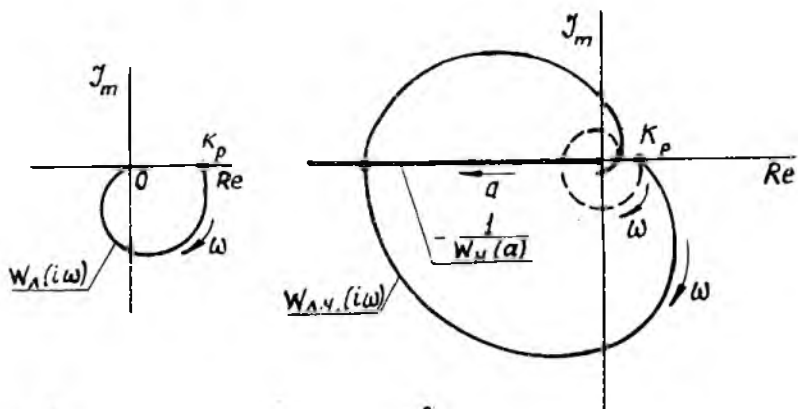
Наличие точки пересечения кривых  $W_{A, \omega}(i\omega)$  и  $-\frac{1}{W_H(a)}$  свидетельствует о возможности возникновения в системе автоколебаний, причем этой точке соответствуют устойчивые автоколебания [2] с амплитудой  $a_n$ .

Из рис.3,в следует, что устранения возможности возникновения в системе автоколебаний можно добиться коррекцией свойств элементов системы, при которой бы точка пересечения кривых  $W_{A, \omega}(i\omega)$  и  $-\frac{1}{W_H(a)}$  смещалась в сторону начала координат, т.е. в сторону уменьшения амплитуды автоколебаний.

Как видно из выражения (2), к уменьшению амплитуды  $a_n$  приводит уменьшение коэффициента пропорциональности в характеристике



a



b

b'

Р и с. 3. АФЧХ звеньев системы "линия топливоподачи - регулятор": а - трубопроводной линии: — без демпфера, - - - с демпфером; б - подвижной части регулятора; б' - определение возможности возникновения автоколебаний: -- АФЧХ линейной части системы без демпфера, - - - АФЧХ линейной части системы с демпфером

нелинейного звена (1). Уменьшение  $K$  означает уменьшение площади проходного сечения дросселя и достигается уменьшением угла конусности клапана  $\alpha$ .

Устранение колебаний давления в системе топливопитания с РСКТ возможно при уменьшении коэффициента усиления  $K_p$  колебательного звена регулятора, так как в этом случае происходит деформация АЧХ линейной части системы в сторону уменьшения амплитуды колебаний параметра  $a$ .

Следует отметить, что путь устранения колебаний, связанный с уменьшением коэффициентов усиления регулятора  $K$  и  $K_p$ , т.е. с изменением его конструктивных параметров, имеет серьезные недостатки. Так, с уменьшением угла  $\alpha$  увеличиваются потери давления  $\Delta p_{ном}$  в проточных частях РСКТ. Уменьшение  $K_p$  достигается за счет уменьшения жесткости чувствительного элемента регулятора и (или) уменьшения его эффективной площади, однако при этом увеличивается разность давлений  $\Delta p_M$  в выходных сечениях РСКТ - статическая ошибка регулирования.

В то же время из рис.3 видно, что амплитуда колебаний  $a_n$  в значительной степени определяется величиной резонансного максимума первого тона собственных колебаний рабочего тела в топливоподающей магистрали. Известно, что наиболее эффективным способом коррекции динамических свойств топливоподающих систем является введение реактивного элемента для диссипации колебательной энергии-демпфирующего устройства, при этом значительно уменьшается величина резонансного максимума и понижается его частота. На рис.3, а пунктиром показана АЧХ линии топливоподачи с установленным демпфирующим устройством, выполненным по схеме гидродинамического RC-фильтра, а на рис.3, в - соответствующая этому случаю кривая  $W_{нч}(i\omega)$ . Эксперименты показали, что такое изменение динамических свойств топливных магистралей полностью устраняет возможность возникновения в рассматриваемой системе устойчивых автоколебаний при всех сочетаниях основных конструктивных параметров РСКТ.

Следовательно, демпфирование топливных магистралей является более перспективным мероприятием, проводимым с целью повышения запаса устойчивости топливоподающей системы с РСКТ, к тому же оно обеспечивает не только требуемую эффективность регулятора соотношения компонентов топлива, но и динамическую стабильность параметров подачи компонентов топлива на входе в реактивные двигатели управления движением.

## Л и т е р а т у р а

1. Д я т е л С.В., М а л е е в А.Ф. Расчетное и экспериментальное исследование устройства для выравнивания давлений в топливных магистралях. -Рукопись представлена Куйбышевским авиационным институтом. Деп. в НИИЭИНФОРМЭНЕРГОМАШ 16.06.81г., № 95-д.р.

2. П о п о в Е.П., П а л ь т о в И.П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. -М.:Физматгиз, 1960.

УДК 621.532.1-503.4

В.Я.С в е р б и л о в

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА  
С АКТИВНЫМ ВОЛНОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ  
С РЕГУЛЯТОРАМИ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

Устройства коррекции (КУ) динамических характеристик трубопроводных цепей, используемых в настоящее время для целей гашения вынужденных колебаний в пневмогидросистемах (ПГС) летательных аппаратов и двигателей [1], получают все большее распространение при решении других задач динамики и, в частности, задач обеспечения устойчивости систем [2]. Это обусловлено с одной стороны - существенным влиянием динамических характеристик трубопроводных цепей на устойчивость ПГС, а с другой стороны - высокой эффективностью КУ.

Использование КУ имеет ряд преимуществ перед другими способами воздействия на динамическую характеристику ПГС. КУ в большинстве своем имеют небольшие габариты, отличаются конструктивной простотой и надежностью. Их установка в систему не связана с крупными изменениями в компоновке. Существенно снижается время на доработку систем. КУ позволяют эффективно разделить различные контуры регулирования и ослабить влияние одних агрегатов на динамику других, осуществить разрыв обратных связей в автоколебательных системах и обеспечить максимальный отвод энергии из автоколебательных систем. С их помощью стабилизируются граничные условия на