

УСИЛЕНИЕ МАЛОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ЕГО ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СИСТЕМУ ПИТАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ С РАЗВИТЫМИ КАВИТАЦИОННЫМИ АВТОКОЛЕБАНИЯМИ

С использованием введенного понятия комплексного коэффициента передачи малого гармонического сигнала проведен анализ динамических характеристик системы питания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), находящейся в режиме кавитационных автоколебаний. На частотах, близких к основной собственной частоте колебаний системы питания ЖРД, при развитии кавитационных автоколебаний обнаружен эффект уменьшения значения модуля коэффициента передачи сигнала системы питания по каналу давления по сравнению с его значениями на режимах без кавитационных автоколебаний. Обнаруженный эффект может быть использован для стабилизации динамической системы “корпус ракеты – питающая магистраль – ЖРД” по отношению к продольным колебаниям ракеты.

З використанням введенного поняття комплексного коефіцієнта передачі малого гармонічного сигналу проведено аналіз динамічних характеристик системи живлення рідинного ракетного двигуна (РРД), яка знаходиться в режимі кавітаційних автоколивань. На частотах, близьких до основної власної частоти коливань системи живлення РРД, при розвитку кавітаційних автоколивань виявлено ефект зменшення значення модуля коефіцієнта передачі сигналу системи живлення РРД по каналу тиску в порівнянні з його значеннями на режимах без кавітаційних автоколивань. Виявлений ефект може бути використаний для стабілізації динамічної системи “корпус ракети – живильна магістраль – РРД” по відношенню до поздовжніх коливань ракети.

Response characteristics of a liquid propulsion feed system under conditions of cavitation self-oscillations are analyzed using a conception of a complex transmission coefficient of a low harmonic signal. The effect of decreased values of a module of the feed system signal transmission coefficient through the pressure channel at frequencies coinciding with its basic natural frequency of oscillations of the liquid propulsion feed system comparing with values under cavitation-free self-oscillations is revealed. This effect can be used to stabilize a dynamic system of a rocket body, a supply line and a liquid propulsion with reference to longitudinal rocket oscillations.

Кавитационные явления в проточной части шнековых преднасосов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в определенных условиях приводят к возникновению в системе “питающий трубопровод – ЖРД” кавитационных автоколебаний (в англоязычной научной литературе – cavitation surge) [1 – 4].

Исследование кавитационных колебаний в системе питания ЖРД обычно проводится в рамках проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостной ракеты-носителя (РН). Способы обеспечения продольной устойчивости жидкостной ракеты основаны на уменьшении значений коэффициента усиления системы питания ЖРД в диапазоне изменения собственных частот низших тонов колебаний корпуса РН. При этом исследование продольной устойчивости РН с использованием частотных критериев устойчивости проводится в предположении, что система питания ЖРД устойчива [1]. В то же время вопрос о прохождении малых возмущений через неустойчивую систему питания ЖРД на частоте внешнего гармонического возмущения, в том числе на частотах продольных колебаний РН (следовательно, о механизме развития колебаний в динамической системе “корпус ракеты – питающая магистраль – ЖРД” при кавитационных автоколебаниях в системе питания ЖРД) остается недостаточно изученным.

Вместе с тем, экспериментальное определение динамических свойств системы питания насосов ЖРДУ в значительной степени упрощается при проведении испытаний в режиме кавитационных автоколебаний, так как в этом случае на основании полученной информации о границах устойчивости и частотах автоколебаний становится возможным проведение идентификации динамической модели шнекоцентробежного насоса [2, 3]. В этой связи реше-

© А.Д. Николаев, А.С. Белецкий, 2010

ние вышеуказанной задачи необходимо для проведения корректного анализа результатов таких динамических испытаний шнекоцентрированных насосов с работающим пульсатором, посредством которого гармоническое возмущение заданной амплитуды и частоты вводится в исследуемую гидросистему.

Целью настоящей статьи является исследование особенностей прохождения малых гармонических возмущений через систему питания ЖРД, находящуюся в режиме кавитационных автоколебаний.

Проведем такое исследование в соответствии с подходом, предложенным авторами работы [5], используя обобщающий понятие частотной характеристики комплексный коэффициент передачи малого гармонического сигнала системы питания ЖРД

$$\frac{\delta P_{in}}{\delta y} = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T (P_{in}(A, t) - P_{nom}) e^{-i\omega t} dt}{A}, \quad (1)$$

где $P_{in}(A, t)$ – зависимость давления на входе в ЖРД от времени (как выходного сигнала) при малом внешнем гармоническом воздействии на магистраль

$$\delta y = A_0 \cos \omega t \quad (2)$$

(например, это может быть смещение узла подвески трубопровода, отклонение давления на выходе бака и т.п.); P_{nom} – номинальное значение величины P_{in} ; A_0 , ω – амплитуда и угловая частота гармонического воздействия.

Заметим, что в числителе правой части формулы (1) стоит выражение для спектральной плотности выходного сигнала [6] на частоте внешнего воздействия и выражение (1) в случае асимптотически устойчивой системы питания ЖРД совпадает с ее соответствующей частотной характеристикой. Использование коэффициента передачи (1) будет корректно, если результат, полученный после предельного перехода в (1), не зависит от состояния (устойчивости или неустойчивости) динамической системы в момент времени $\tau = 0$. Как показали расчеты, это условие выполняется в достаточно широкой области значений ω и начальных условий для рассматриваемых систем.

Покажем, что для асимптотически устойчивой линейной системы “питающий трубопровод – ЖРД” выражение (1) дает обычную частотную характеристику. Действительно, для такой системы изменение $P_{in}(A, t)$ во времени можно представить в виде

$$P_{in}(A, t) = P_{nom} + \rho A \cos(\omega t + \varphi) + P_{ce}(t), \quad (3)$$

где параметры ρ и φ есть модуль и фаза обычной частотной характеристики [6], $P_{ce}(t)$ – составляющая, обусловленная затухающими собственными колебаниями жидкости в системе питания, т.е можно считать, что

$$|P_{ce}(t)| \leq B e^{-\beta t}, \quad (4)$$

где B и β – положительные числа. Тогда, учитывая (3), (4), получим

$$\int_0^T (P_{in}(A, t) - P_{nom}) e^{-i\omega t} dt = \frac{\rho A e^{i\varphi}}{2} T + \rho A \frac{e^{-i\varphi}}{2} \left[\frac{1 - e^{-2i\omega T}}{2i\omega} \right] +$$

$$+ \int_0^T P_{ce}(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{\rho A e^{i\varphi}}{2} T + O(1)$$
(5)

Из (1) имеем

$$\frac{\delta P_{in}}{\delta y} = \rho e^{i\varphi},$$
(6)

что и требовалось показать.

Рассчитаем коэффициент передачи $\delta P_{in} / \delta P_t$ (δP_t – отклонение давления на днище топливного бака) для простейшей разветвленной системы питания четырех ЖРД, представленной на рис. 1. На рисунке изображены: бак с топливом 1; магистральный трубопровод 2; соединяющий бак с коллектором-разветвителем 3; трубопроводы-ответвления 4 – 7, питающие четыре ЖРД, шнекоцентробежные топливные насосы которых отмечены цифрами 8 – 11 (для улучшения восприятия рисунка занасосная часть системы на рисунке опущена).

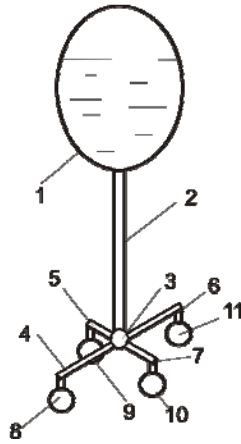


Рис.1

Упрощенная нелинейная модель этой системы может быть представлена следующими уравнениями:

$$P_t - P_p = A_0 G_0^2 + I_0 \frac{dG_0}{dt}$$
(7)

$$P_p = P_{in} + A G_i^2 + I \frac{dG_i}{dt}$$
(8)

$$P_i = \tilde{P} \left(V_{ki}, \frac{dV_{ki}}{dt}, G_i \right)$$
(9)

$$\gamma \frac{dV_{ki}}{dt} = G_{2i} - G_i$$
(10)

$$\sum_{i=1}^4 G_i = G_0 \quad (11)$$

где P_i – давление на днище топливного бака; P_p – давление в разветвлении; G_0 – весовой расход топлива через основную магистраль; G_i, G_{2i} – расходы на входе и выходе насосов i -го двигателя; V_{ki} – объем кавитационных камер в насосе i -го ЖРД; γ – удельный вес компонента топлива; A_0, A, I_0, I – коэффициенты, характеризующие гидравлические и инерционные сопротивления участков трубопроводов; $\tilde{P}\left(V_{ki}, \frac{dV_{ki}}{dt}, G_i\right)$ – нелинейная зависимость давления на входе в насос ЖРД от объема кавитационных камер в проточной части насоса и расхода топлива через насос, определяемая по нестационарной модели развитых кавитационных колебаний [3].

Для простоты предполагаем, что гидравлические сопротивления нагрузки насосов достаточно велики, так что отклонениями расходов на их выходе можно пренебречь, поэтому $G_{2i} = const$, $i=1,4$.

Если описанная система неустойчива по отношению к кавитационным колебаниям, то в ней, в зависимости от параметров и начальных условий, как показали расчеты [7], реализуются автоколебания только двух видов (при $P_i = const$):

- автоколебания, при которых расходы и давления колеблются синфазно на двух двигателях в противофазе с двумя другими;
- автоколебания, происходящие со сдвигом на четверть периода для различных двигателей.

Кавитационные автоколебания обоих видов происходят на частоте, определяемой параметрами исследуемой системы (7) – (11). В проведенных расчетах она близка к $\omega \approx 113 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 2 представлены результаты расчетов модуля и фазы функции $\delta P_{in} / \delta P_i$ для случаев устойчивой по отношению к кавитационным колебаниям системы (кривая 1) и автоколебательной системы (кривая 2). Перевод системы (7) – (11) из устойчивого состояния к “автоколебательному” достигался путем уменьшения суммарного активного гидравлического сопротивления питающего трубопровода.

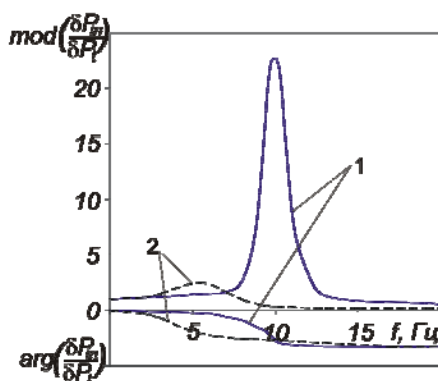


Рис.2

Расчеты показали, что в данной полосе частот не наблюдается эффект синхронизации кавитационных колебаний с малыми внешними возмущениями. Тем более интересным оказалось резкое уменьшение модуля коэффициента передачи (1) исследуемой автоколебательной системы на частоте основного тона жидкости. Как следует из рис. 2, модуль функции $\delta P_{in}/\delta P_t$ на частоте колебаний 10 Гц, близкой к собственной частоте системы, имеет резонансный максимум, приблизительно равный 22 (кривая 1). Для системы с развитыми кавитационными колебаниями величина модуля коэффициента передачи системы питания в несколько раз меньше (значение максимума кривой 2 не превышает 3,5). Отметим, что при развитых кавитационных автоколебаниях в исследуемой системе питания вследствие увеличения динамической податливости кавитационных камер в проточной части шнека уменьшается низшая частота колебаний жидкости (на рис. 2 резонансный максимум кривой 2 сместился к 7 Гц).

Отмеченный эффект понижения коэффициента усиления системы питания ЖРД оказывает стабилизирующее влияние на замкнутую динамическую систему “корпус ракеты – питающая магистраль – ЖРД” в исследуемом частотном диапазоне (вблизи собственной частоты колебаний основного тона жидкости в питающей магистрали). Устойчивость колебательного контура “корпус ракеты – питающая магистраль – ЖРД” по отношению к продольным колебаниям РН определяется динамическими коэффициентами усиления его звеньев. Корпус ракеты, являясь слабодемпфированным звеном, воспринимает составляющую тяги практически на своей собственной частоте. Спектральная составляющая тяги на собственной частоте колебаний корпуса после прохождения возмущений от корпуса через систему питания ЖРД при развитых кавитационных колебаниях будет существенно (в расчетном случае в несколько раз) ослаблена.

Полученный эффект необходимо учитывать при исследовании динамики насосных систем, поскольку в системе питания со шнекоцентробежным насосом динамические коэффициенты усиления питающих магистралей по каналу давления при развитых кавитационных автоколебаниях и при отсутствии автоколебаний могут существенно отличаться друг от друга. Кроме того, чувствительность системы питания к возмущениям, задаваемым на входе в гидравлическую систему пульсатором, в исследуемом частотном диапазоне может быть снижена до уровня, при котором корректное определение динамических характеристик системы становится невозможным.

Таким образом, сложные эффекты нелинейного взаимодействия различных видов колебаний в системе питания ЖРД (в частности, вынужденных колебаний и кавитационных колебаний) могут приводить к уменьшению коэффициента усиления системы питания ЖРД и, следовательно, коэффициента усиления разомкнутой системы “корпус ракеты – питающая магистраль – ЖРД”. Полученный эффект расширяет представление о механизме развития продольных колебаний жидкостных РН для случая неустойчивых систем питания ЖРД.

1. Натанзон М. С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты / М. С. Натанзон – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Пилипенко В. В. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей / В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, Н. И. Довготько и др. // Техническая механика. – 2001. – №2. – С. 11 – 37.
3. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, М. С. Натанзон. – М. : Машиностроение, 1977. – 352 с.

4. *Tsujimoto Y. Unified Treatment of Flow Instabilities of Turbomachnaries / Y.Tsujimoto, K. Kamijo, C. Brennen AIAA paper 99 – 2678, 1999.*
5. *Белецкий А. С. Усиление малого гармонического сигнала при прохождении через автоколебательную систему питающий трубопровод – ЖРД / А. С. Белецкий, И. С. Белецкий, А. Д. Николаев, П. В. Фоменко.– Праці другої української конф. з автоматичного керування «Автоматика-95». – Львів, 1995. – Том 5. – С. 234.*
6. *Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М. : Наука, 1972. – 768 с.*
7. *Фоменко П. В. Синхронизация кавитационных автоколебаний в симметричных системах питания энергоустановок / Фоменко П. В. // Космическая наука и техника. – 1991. – Вып.6. – С. 21 – 25.*

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 31.05.09,
в окончательном варианте 31.05.09