

УДК 621.454.2

О. В. ПИЛИПЕНКО¹, А. А. ПРОКОПЧУК², С. И. ДОЛГОПОЛОВ¹, Н. В. ХОРЯК¹,
А. Д. НИКОЛАЕВ¹, В. Ю. ПИСАРЕНКО², В. Н. КОВАЛЕНКО²

¹Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, г. Днепр, Украина

²ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», г. Днепр, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАРШЕВОМ ЖРД С ДОЖИГАНИЕМ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

Рассмотрены возможные причины потери устойчивости низкочастотных (до 50 Гц) динамических процессов в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) с дожиганием генераторного газа. Показано, что для теоретического определения устойчивости ЖРД и выяснения природы его низкочастотных колебаний необходимо исследовать многосвязную динамическую систему «питающие магистрали – ЖРД». Изложен подход к решению этой задачи в линейной постановке, основанный на расчете спектра матрицы, представляющей собой оператор линейной динамической системы «питающие магистрали – ЖРД» и декомпозиции этой системы. Выполнено математическое моделирование низкочастотной динамики жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ), включающей перспективный маршевый ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа. Установлено, что исследуемая ЖРДУ устойчива. Показано, что учет кавитационных явлений в насосах ЖРД привел к существенному уменьшению собственных частот и декрементов колебаний жидкости в линиях питания окислителем и горючим. Определено, что низкочастотные динамические процессы в регуляторе расхода характеризуются относительно большими декрементами колебаний. Установлено, что исследуемая динамическая система чувствительна к значению времени пребывания газа в газогенераторе.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, турбонасосный агрегат, кавитация, регулятор расхода, устойчивость, собственные частоты и декременты колебаний, спектр матрицы.

Введение

При разработке жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) большие трудности может создавать неустойчивость рабочих процессов. Она проявляется в существенном возрастании амплитуд колебаний режимных параметров двигателя, сопровождающихся вибрациями элементов его конструкции, и может приводить к нарушению нормального функционирования отдельных систем ЖРД, поломке деталей агрегатов, обрыву трубопроводов и другим аварийным ситуациям. Опыт экспериментальной отработки ЖРД показывает, что потеря устойчивости двигателя может быть обусловлена различными причинами [1]. Так, низкочастотные колебания (с частотами до 50 Гц) могут быть обусловлены кавитационными явлениями в насосах ЖРД, неустойчивостью контура «двигатель – регулятор» или «турбонасосный агрегат – газогенератор», а на активном участке полета ракеты – неустойчивостью контура «ЖРД – корпус ракеты» [1 – 5]. Для устранения колебаний различной природы применяются

свои методы, поэтому диагностирование причин и определение параметров колебаний в ЖРД является основой для разработки эффективных средств их устранения.

Экспериментальная отработка мощных ЖРД требует значительных затрат, при этом определение причин неустойчивости ЖРД может оказаться весьма сложной задачей. Так, колебания давления на входе в насос ЖРД, которые наблюдаются при потере устойчивости в контуре «двигатель – регулятор», нередко трудно отличить от кавитационных [1]. Кроме того, если колебания, возникшие при потере устойчивости ЖРД при его стендовых испытаниях, имеют малые амплитуды и не приводят к нарушению нормального функционирования двигателя, то факт их существования можно установить только в результате специальных экспериментальных исследований. При работе ЖРД в составе ракеты амплитуды этих колебаний могут существенно увеличиться и превысить допустимый уровень [2]. Таким образом, при ограниченном объеме экспериментальных

исследований могут быть упущены режимы неустойчивой работы ЖРД, что впоследствии может привести к аварийным ситуациям. Исходя из изложенного, исследование устойчивости ЖРД методами математического моделирования является актуальной задачей, требующей своего решения при проектировании новых двигателей.

Целью данной работы является численное исследование устойчивости перспективного маршевого ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа и диагностирование причин возможных низкочастотных колебаний в двигателе.

Постановка задачи и концепция исследования

Анализ устойчивости перспективного маршевого ЖРД проводился на основе численного исследования линеаризованной математической модели динамической системы «питающие магистрали – ЖРД», описывающей низкочастотную динамику жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ). Разработанная модель представляла собой дифференциально-алгебраическую систему уравнений с запаздываниями:

$$\sum_{j=1}^N d_{ij} \delta \dot{x}_j(t) + b_{ij} \delta x_j(t) + c_{ij} \delta x_j(t - \tau_{ij}) = 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где x_j – физические переменные, используемые при описании динамических процессов в ЖРДУ;

δx_j – отклонение переменной x_j от ее номинального значения \bar{x}_j : $\delta x_j = x_j - \bar{x}_j$;

\dot{x}_j – производная по времени t : $\dot{x}_j = dx_j / dt$;

τ_{ij} – запаздывания, используемые при описании низкочастотной динамики газовых трактов ЖРД.

Устойчивость трактовалась как устойчивость по Ляпунову (в соответствии с теоремой о первом приближении). Для численного исследования устойчивости системы «питающие магистрали – ЖРД» с потенциально неустойчивыми подсистемами применялся метод [4, 6], основанный на декомпозиции системы и расчете корней ее характеристического уравнения. Этот метод позволяет выявлять неустойчивость процессов в ЖРДУ, обусловленную низкочастотными колебаниями различной природы, диагностировать причины их возникновения и определять параметры собственных колебаний.

Расчет корней характеристического уравнения системы (1) сводился к определению спектра матрицы. Для этого осуществлялась приближенная замена уравнений звеньев запаздывания $y(t) = x(t - \tau)$ обыкновенными дифференциальными уравнениями и численное преобразование полученной системы уравнений к форме Коши:

$$\delta \dot{x}(t) = A \delta x(t). \quad (2)$$

где x – вектор переменных системы;

A – квадратная матрица ее коэффициентов, имеющая общий несимметричный вид.

Матрица A является оператором полученной линейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, а спектр ее собственных значений $\{\lambda_i\}$ есть не что иное, как корни характеристического уравнения системы (1).

Для расчета спектра собственных значений $\{\lambda_i\}$ матрицы A применялся QR-алгоритм.

В общем случае собственные значения матрицы A являются комплексными: $\lambda_i = -\alpha_i + j\omega_i$. Они определяют решение системы (1): колебательное движение каждой ее координаты x_s определяется суммой собственных колебаний, характеризующихся частотой ω_i , коэффициентом затухания α_i , амплитудой $c_i^{(0)} \beta_{i,s}$ и начальной фазой $\varphi_i + \chi_{i,s}$:

$$x_s = \sum_i c_i^{(0)} \beta_{i,s} \exp^{-\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \varphi_i + \chi_{i,s}). \quad (3)$$

По этой причине собственные значения матрицы A , представляющей собой оператор линейной динамической системы, называют также комплексными собственными частотами затухающих (при $\alpha_i > 0$) или нарастающих (при $\alpha_i < 0$) колебаний этой системы. Положительные значения коэффициентов затухания колебаний $\alpha_i = -\text{Re} \lambda_i$ являются признаком устойчивости системы и характеризуют быстроту затухания ее собственных колебаний с частотами $f_i = \omega_i / 2\pi$. В качестве показателя затухания колебаний рассматривался также параметр $\delta_i = \alpha_i / f_i$, аналогичный по форме представления логарифмическому декременту колебаний.

Для выяснения природы колебаний выполнялась декомпозиция системы по нескольким схемам.

Отметим, что для приближенной замены уравнений с запаздываниями обыкновенными дифференциальными уравнениями использовался подход [4], основанный на аппроксимации передаточной функции звена запаздывания $W_e(p\tau) = \exp(-p\tau)$ дробно-рациональной функцией

$$W_{m,\tilde{m}}(p\tau) = \frac{v_0 + v_1 p\tau + \dots + v_m (p\tau)^m}{u_0 + u_1 p\tau + \dots + u_{\tilde{m}} (p\tau)^{\tilde{m}}}, \quad (4)$$

где p – комплексная переменная оператора Лапласа при нулевых начальных условиях.

Эта функция выбиралась по двум критериям: устойчивость полинома в ее знаменателе; приемлемая точность аппроксимации частотной характеристики звена запаздывания и частотных характеристик (коэффициентов усиления) ЖРД в частотном диапазоне от 0 до 50 Гц при наименьшем по возможности порядке (m, \tilde{m}) этой функции.

Особенности математической модели

Рассматриваемый перспективный ЖРД представляет собой маршевый двигатель с турбонасосной системой подачи, выполненный по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа и имеющий тягу 250 тс. Упрощенная расчетная схема ЖРДУ, в состав которой входит этот двигатель, показана на рис. 1. Как видно из рис. 1, основной турбонасосный агрегат двигателя (ТНА) включает основной насос окислителя (НО), основной насос горючего (НГ), насос горючего 2-й ступени (НГ2) и турбину (Т). Перед основными насосами установлены бустерные насосные агрегаты, за насосом горючего 2-й ступени – регулятор расхода (РР). В газогенератор (ГГ) поступают жидкие компоненты топлива. Продукты газогенерации дожигаются в камере сгорания (КС). Для привода турбины, вращающей насосы окислителя и горючего, используются продукты сгорания топлива в ГГ. Отработанный газ сбрасывается в газовод (ГВ), откуда поступает в КС. Часть газа отбирается для газовой турбины (ТБНО), вращающей бустерный насос окислителя.

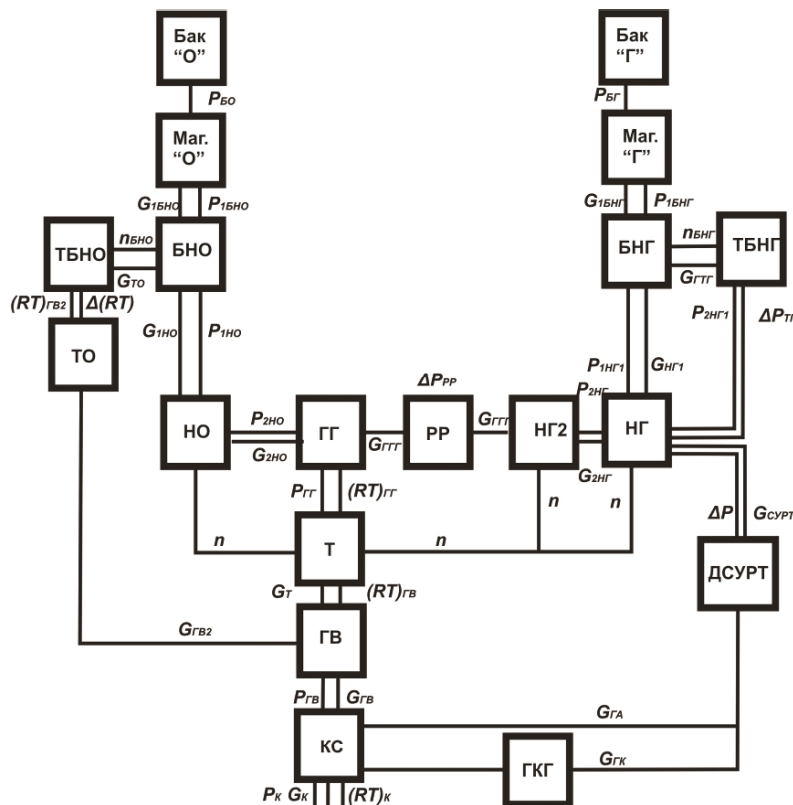


Рис. 1. Расчетная схема перспективного ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа: бак «О», бак «Г» – топливные баки окислителя и горючего; маг «О», маг «Г» – питающие магистрали окислителя и горючего; БНО, БНГ – бустерные насосы окислителя и горючего; НО, НГ, НГ2 – основные насосы окислителя и горючего и насос горючего 2-й ступени; ТБНО, ТБНГ – турбины БНО и БНГ; ТО – теплообменник; ГГ – газогенератор; РР – регулятор расхода; Т – турбина; ГВ – газовод; КС – камера сгорания; ДСУРТ – дроссель системы управления расходом топлива; ГКГ – главный клапан горючего; p, G – давление и весовой секундный расход жидкого топлива или продуктов сгорания; n – частота вращения вала ТНА; RT – работоспособность продуктов сгорания

Бустерный насос горючего (БНГ) приводится во вращение гидравлической турбиной (ТБНГ), рабочая жидкость для которой отбирается за выходом из основного насоса горючего.

При математическом моделировании низкочастотной динамики рассматриваемого ЖРД особое внимание уделялось следующим факторам.

Во-первых, насосы ЖРД обычно работают в режиме скрытой кавитации. Кавитационные явления в насосах приводят к существенному снижению собственных частот колебаний жидкости в питающих магистралях, а при неблагоприятном сочетании значений режимных и конструктивных параметров насосов могут возникнуть кавитационные автоколебания в системе питания ЖРД [2, 3]. В связи с этим динамика насосов рассматриваемого двигателя описывалась с учетом кавитационных явлений.

Во-вторых, источником низкочастотных колебаний в ЖРД может быть система регулирования: при неудачном выборе ее параметров возможна потеря устойчивости контура «двигатель – регулятор» [1]. Отметим, что регуляторные колебания в ЖРД могут возникать при недостаточно большом запасе устойчивости системы регулирования. Учитывая этот факт, для анализа устойчивости рассматриваемого ЖРД была разработана достаточно подробная модель динамики регулятора расхода горючего [7], использование которой позволяет не только диагностировать регуляторные колебания, но также исследовать возможности их устранения.

В-третьих, в ЖРД с дожиганием генераторного газа продукты газогенерации поступают в камеру сгорания, поэтому колебания режимных параметров газогенератора (давления, расхода, температуры) оказывают непосредственное влияние на давление в камере и тягу двигателя. Кроме того, в двигателях указанной схемы между колебаниями режимных параметров газогенератора и насосов двигателя возникает обратная связь, которая реализуется через частоту вращения вала ТНА. При определенных условиях обратная связь может усиливать колебания давления и расхода топлива в насосной группе двигателя и приводить к потере устойчивости контура «ТНА – ГГ». При теоретическом прогнозировании низкочастотных колебаний, обусловленных неустойчивостью контура «ТНА – ГГ», особую важность имеет учет запаздываний в математической модели динамики элементов газовых трактов ЖРД и, прежде всего, газогенератора [4].

При моделировании низкочастотной динамики гидравлических трактов ЖРДУ движение жидкости полагалось одномерным, а жидкость

– сжимаемой. Упругость стенок топливных магистралей учитывалась введением эквивалентной скорости звука в жидкости. Проточные части турбин и насосов, а также топливные магистрали, длины которых малы по сравнению с длиной акустической волны на частоте 50 Гц, моделировались конечными элементами, каждый из которых характеризовался активным сопротивлением, гидравлической массой и емкостью (напр., [8]).

Акустически длинная питающая магистраль окислителя моделировалась цепочкой элементов, каждый из которых представлял собой достаточно короткий участок этой магистрали. Необходимая точность описания волновых явлений обеспечивалась выбором количества участков, их длины и мест размещения емкостей в магистрали. Неустановившееся движение жидкого топлива в i -м участке гидравлического тракта ЖРДУ, рассматриваемого как система с сосредоточенными параметрами, описывалось следующими уравнениями:

$$\delta p_i = \delta p_{i+1} + I_i \frac{d(\delta G_i)}{dt} + R_i \delta G_i, \quad (5)$$

$$c_i \frac{d(\delta p_i)}{dt} = \delta G_i - \delta G_{i+1}, \quad (6)$$

где p_i , G_i и p_{i+1} , G_{i+1} – входное давление и весовой секундный расход компонента топлива на i -м и $(i+1)$ -м участке гидравлического тракта;

c_i , I_i , R_i – эквивалентная сосредоточенная упругость, коэффициент инерционного сопротивления и линеаризованного гидравлического сопротивления i -го участка.

При описании низкочастотной динамики кавитирующих бустерных и основных насосов окислителя и горючего рассматриваемого двигателя использовалась гидродинамическая модель кавитирующих насосов ЖРД, разработанная в ИТМ НАНУ и ГКАУ академиком В.В. Пилипенко [3]. Эта модель включает уравнение динамики кавитационных камер, уравнение баланса расходов в проточной части насоса и уравнение для определения давления на выходе из кавитирующего насоса:

$$\delta p_1 = B_1 \delta V_{cav} + B_2 \delta G_1 + B_1 T_{cav} \frac{d(\delta V_{cav})}{dt}, \quad (7)$$

$$\gamma \frac{d(\delta V_{cav})}{dt} + \delta G_1 - \delta G_2 = 0, \quad (8)$$

$$\delta p_2 = (1 + m_n) \delta p_1 + s_n \delta G_2 - J_n \frac{d(\delta G_2)}{dt} + \eta_n \delta n, \quad (9)$$

где p_1, G_1, p_2, G_2 — давление и весовой секундный расход на входе и выходе из насоса;

V_1, V_2, T_{cav} — кавитационная упругость, отрицательное кавитационное сопротивление и постоянная времени кавитационных каверн;

V_{cav} — объем кавитационных каверн в проточной части насоса;

m_n, s_n — тангенс угла наклона кавитационной и, соответственно, напорной характеристики шнекоцентробежного насоса;

γ — удельный вес компонента топлива;

J_n — коэффициент инерционного сопротивления насоса;

n — частота вращения вала ТНА;

η_n — тангенс угла наклона зависимости напора шнекоцентробежного насоса от частоты вращения вала ТНА.

Уравнения динамики ротора ТНА представлялись в традиционном виде [8]

$$\frac{\pi}{30} J \frac{d(\delta n)}{dt} = \delta M_T - \sum_i \left(\delta M_{ni} - D_{ni} \frac{d(\delta G_{2ni})}{dt} \right), \quad (10)$$

где J — момент инерции ротора ТНА;

M_T — крутящий момент турбины;

M_{ni} — крутящий момент i -го насоса;

D_{ni} — коэффициенты, учитывающие инерционное сопротивление массы жидкости в проточных частях насосов при ее поступательном движении;

G_{2ni} — расход компонента топлива на выходе из i -го насоса.

При построении математической модели низкочастотной динамики газовых трактов ЖРД принимают следующие общепринятые упрощения [1, 2, 8]. Камера сгорания, газогенератор и газовод рассматривались как элементы с сосредоточенными параметрами; процессы, протекающие в газовых трактах ЖРД, полагались адиабатическими; при описании динамических процессов в КС и ГГ использовалась простейшая модель горения, основанная на аппроксимации кривой выгорания и кривой переноса температур транспортным запаздыванием — единичными ступенчатыми функциями $\phi_{выг}(t) = 1(t - \tau)$ и $\phi_{п}(t) = 1(t - \tau')$ (здесь τ' — время пребывания газа на участке тракта, τ — время преобразования жидких компонентов в продукты сгорания).

В настоящей работе значения τ' и τ оценивались с использованием расчетно-теоретических и эмпирических формул (напр., [1, 8]).

С учетом принятых упрощений нестационарное неизотермическое адиабатическое движение газа в элементах газового тракта ЖРД описывалось в низкочастотном диапазоне дифференциально-алгебраической системой уравнений с запаздываниями. Структура этих уравнений одинакова для КС, ГГ и ГВ. Ниже приведены линейные уравнения в отклонениях, описывающие низкочастотную динамику газогенератора рассматриваемого ЖРД.

Рабочие процессы в газогенераторе описывались системой уравнений, включающей уравнения для определения давления в газовом тракте газогенератора $p_{ГГ}$ с учетом запаздываний газообразования окислителя и горючего в газогенераторе; уравнения для определения работоспособности продуктов сгорания на входе в газовый тракт газогенератора $(RT)_{ГГ1}$ и на его выходе $(RT)_{ГГ2}$; уравнение для расхода газа на выходе из газогенератора:

$$\frac{d(\delta p_{ГГ})}{dt} = \frac{\kappa_{ГГ} R T_{ГГ}}{V_{ГГ}} [\delta G_{ГГО}^* + \delta G_{ГГГ}^* - \delta G_T], \quad (11)$$

$$\delta G_{ГГО}^* = \delta G_{ГГО} (t - \tau_{ГГ}), \quad (12)$$

$$\delta G_{ГГГ}^* = \delta G_{ГГГ} (t - \tau_{ГГ}), \quad (13)$$

$$\delta(RT)_{ГГ1} - \frac{\partial(RT)_{ГГ}}{\partial k_{ГГ}^*} \cdot \begin{pmatrix} - \\ \delta G_{ГГО}^* - \frac{G_{ГГО}}{G_{ГГ}^2} \delta G_{ГГГ}^* \end{pmatrix} = 0, \quad (14)$$

$$\delta(RT)_{ГГ2} = \delta(RT)_{ГГ1} (t - \tau'_{ГГ}), \quad (15)$$

$$\delta G_T + a_{\tau 1} \delta(RT)_{ГГ2} + a_{\tau 2} \delta p_{ГГ} + a_{\tau 3} \delta p_{ГВ} = 0, \quad (16)$$

где $p_{ГГ}, p_{ГВ}$ — давления в газовых трактах газогенератора и газовода;

$G_{ГГО}, G_{ГГГ}$ — весовые секундные расходы окислителя и горючего на входе в газовый тракт газогенератора;

$G_{ГГО}^*, G_{ГГГ}^*$ — весовые секундные расходы окислителя и горючего на входе в газогенератор с учетом запаздывания газообразования $\tau_{ГГ}$;

G_T — весовой расход газа через газогенератор;

$(RT)(k_{гг}^*)$ – зависимость работоспособности продуктов сгорания компонентов топлива (жидкий кислород – керосин) от соотношения компонентов топлива $k_{гг}^*$;

$\kappa_{гг}$ – показатель адиабаты в газогенераторе;

$a_{т1}, a_{т2}, a_{т3}$ – коэффициенты, полученные после линеаризации уравнения для расхода газа на выходе из газогенератора.

$V_{гг}$ – объем газового тракта газогенератора;

Для аппроксимации передаточных функций звеньев запаздывания с малыми запаздываниями ($\tau_{кс} = 0,0019$ с, $\tau'_{кс} = 0,0017$ с и $\tau_{гг} = 0,0049$ с) был выбран дробный ряд Тейлора 1-го порядка, для звеньев с большими запаздываниями ($\tau'_{гг} = 0,011$ с, $\tau'_{гв} = 0,035$ с) – ряд Паде 2-го порядка $P_{2,2}(p\tau)$:

$$T_{0,1}(p\tau) = 1/(1 + p\tau) \quad (17)$$

$$P_{2,2}(p\tau) = (12 - 6p\tau + p^2\tau^2)/(12 + 6p\tau + p^2\tau^2). \quad (18)$$

Замене передаточной функции звена запаздывания функцией (17) и, соответственно, (18) соответствует замена уравнения звена запаздывания $y(t) = x(t - \tau)$ уравнением апериодического звена $\tau \cdot \dot{y} + y = x$ и дифференциальным уравнением 2-го порядка $\tau^2 \ddot{y} + 6\tau \dot{y} + 12y = \tau^2 \ddot{x} - 6\tau \dot{x} + 2x$.

Линейная математическая модель низкочастотных динамических процессов в регуляторе расхода горючего рассматриваемого двигателя была получена путем линеаризации нелинейной математической модели, представленной в работе [7]. Эта модель включала уравнение движения подвижных частей регулятора расхода, уравнения движения жидкости в соответствующих гидравлических каналах регулятора расхода и уравнение баланса расходов в регуляторе расхода. Особенностью этой модели является использование эквивалентных коэффициентов линеаризованных гидравлических сопротивлений $R_A(\Delta p_{1pp})$, $R_B(\Delta p_{1pp})$, и характерной амплитуды движения золотника x_M , которые отражают основные нелинейности математической модели регулятора расхода (здесь Δp_{1pp} – амплитуда колебаний давления на входе в регулятор расхода). Они определяются из условия согласования частотных характеристик регулятора расхода, полученных по нелинейной и линейной моделям регулятора расхода [7].

Результаты математического моделирования

Расчет спектра линейного оператора динамической системы «питающие магистрали – ЖРД» показал, что данная система устойчива (все ее собственные значения $\lambda_i = -\alpha_i + j\omega_i$ расположены на комплексной плоскости слева от мнимой оси), а в частотном диапазоне от 0 до 50 Гц находятся семь ее собственных частот $f_i = \omega_i / 2\pi$, $i = \overline{1, 7}$. Низкочастотная часть спектра комплексных собственных частот колебаний исследуемой системы представлена на рис. 2. На этом рисунке показаны только шесть собственных значений λ_i , поскольку седьмое находится на большом отдалении от мнимой оси ($\text{Re } \lambda_7 < -100$). Черными кружками изображены собственные значения, вычисленные с учетом запаздываний, белыми – без их учета.

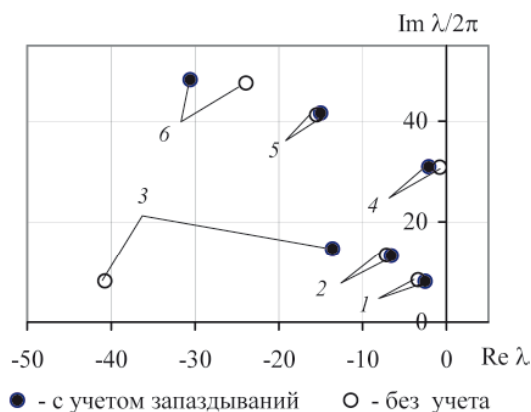


Рис. 2. Низкочастотная часть спектра комплексных собственных частот колебаний системы «питающие магистрали – ЖРД»:

Для диагностирования источников колебаний с низшими частотами $\omega_1, \dots, \omega_7$ выполнялась декомпозиция системы «питающие магистрали – ЖРД», при этом из нее выделялись подсистемы «питающая магистраль – насосы окислителя», «питающая магистраль – насосы горючего», «регулятор расхода горючего» и подсистема «ТНА – ГГ – КС», описывающая динамику ЖРД на участке от газогенератора до камеры сгорания и включающая в себя также основную турбину и газовод. В результате сравнительного анализа собственных частот и декрементов колебаний системы «питающие магистрали – ЖРД» и выделенных из нее изолированных подсистем было установлено, что колебания системы, характеризующиеся

комплексными собственными частотами λ_1 и λ_4 , «порождаются» подсистемой «питающая магистраль – насосы окислителя»; λ_2 и λ_5 – подсистемой «питающая магистраль – насосы горючего»; λ_3 – подсистемой «ТНА – ГГ – КС»; λ_6 – регулятором. На рис. 4 цифры 1 – 6 соответствуют индексам λ_i .

Как следует из этого рисунка, доминирующими являются комплексные собственные частоты λ_1 и λ_4 , которые находятся на наименьшем расстоянии от мнимой оси. Таким образом, динамические процессы в линии питания ЖРД окислителем оказывают наиболее существенное влияние на устойчивость и переходные процессы в рассматриваемой системе «питающие магистрали – ЖРД».

Результаты расчета параметров собственных колебаний этой системы без учета кавитации в насосах показали, что в этом случае ее собственные частоты и декременты колебаний, обусловленных колебаниями подсистем «питающая магистраль «О» – насосы», «питающая магистраль «Г» – насосы», имеют значительно большие значения. Так, значение f_1 увеличилось с 8 Гц до 11,5 Гц, δ_1 – с 0,316 до 0,638, а значения f_2, f_4, f_5 превысили 90 Гц и вышли за пределы рассматриваемого частотного диапазона.

Кроме того, учет запаздываний привел к уменьшению коэффициента затухания $\alpha_3 = -\text{Re}\lambda_3$ собственных колебаний системы, «порождаемых» подсистемой «ТНА – ГГ – КС», почти в 3 раза.

Необходимо отметить, что в ЖРД с дожиганием генераторного газа время пребывания газа в газогенераторе $\tau'_{гг}$ может существенно повлиять на устойчивость низкочастотных процессов в двигателе [4], а при теоретической оценке величины запаздываний в уравнениях динамики газовых трактов ЖРД возможны значительные погрешности. В связи с этим были проведены численные исследования влияния запаздываний на параметры собственных колебаний системы «питающие магистрали – ЖРД». В результате этих исследований установлено, что по мере увеличения $\tau'_{гг}$ рассматриваемая система приближается к границе области устойчивости (годограф собственной частоты λ_3 приближается к мнимой оси), и при увеличении $\tau'_{гг}$ на 70% система теряет устойчивость по отношению к колебаниям в контуре «ТНА – ГГ» (рис. 3).

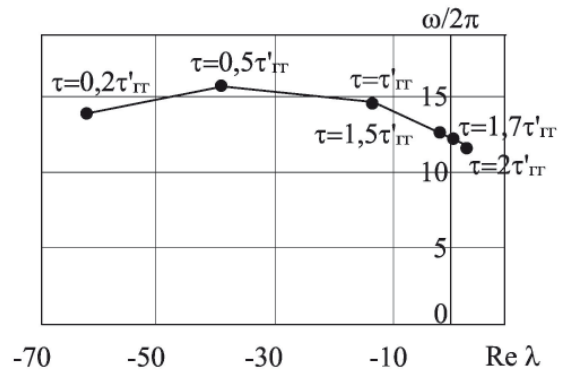


Рис. 3. Годограф комплексной собственной частоты λ_3 системы «питающие магистрали – ЖРД»

Анализ результатов расчетов показал, что величина запаздывания $\tau'_{гг}$ оказывает существенное влияние только на те собственные частоты и декременты колебаний системы «питающие магистрали – ЖРД», которые обусловлены колебаниями подсистемы ТНА – ГГ – КС. Этот вывод наглядно иллюстрируют зависимости, показанные на рис. 4 а, б.

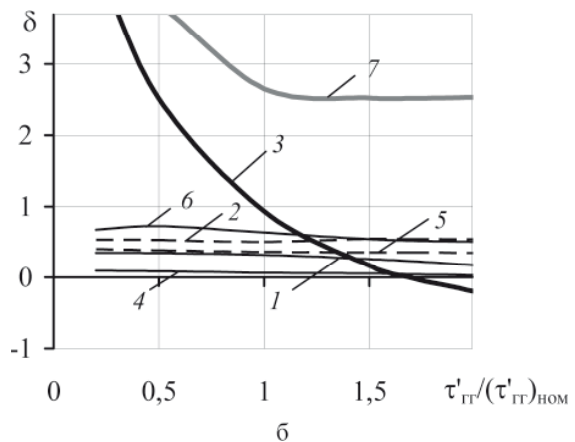
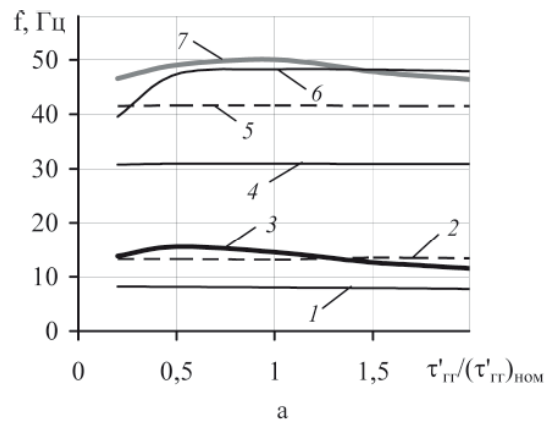


Рис. 4. Параметры собственных колебаний системы «питающие магистрали – ЖРД»: а – собственные частоты; б – декременты

Нумерация кривых на этих рисунках соответствует нумерации точек на рис. 2. Цифрой 7 обозначены частоты и декременты колебаний, определяемые собственным значением λ_7 . Отметим, что колебания системы с собственной частотой $f_7 = |\operatorname{Im} \lambda_7| / 2\pi$ и декрементом $\delta_7 = -\operatorname{Re} \lambda_7 / f_7$, «порождаются» подсистемой «ТНА – ГГ – КС».

Запаздывания в уравнениях динамики КС практически не влияют на устойчивость системы «питающие магистрали – ЖРД», а влияние времени газообразования в газогенераторе $\tau_{ГГ}$ и времени пребывания продуктов сгорания в газоваде $\tau'_{ГВ}$ относительно невелико. Так, при увеличении $\tau'_{ГВ}$ в два раза коэффициент затухания колебаний α_3 уменьшился на 13%, а при двукратном уменьшении $\tau'_{ГВ}$ увеличился на 30%.

Заключение

Численное исследование устойчивости низкочастотных процессов в ЖРД и определение причин колебаний в двигателе является неотъемлемой частью работ при разработке ЖРД. Возможность реализации различных механизмов потери устойчивости рабочего процесса в ЖРДУ требует разработки достаточно подробной математической модели низкочастотной динамики ЖРД. В статье показано, что при моделировании низкочастотных процессов в ЖРД с дожиганием генераторного газа необходимо учитывать кавитационные явления в насосах, обратные связи между колебательными процессами в газогенераторе и насосах, неизотермичность процессов в газогенераторе и газовадах, временные задержки газообразования, динамические процессы в регуляторе расхода. В силу этих причин анализ устойчивости низкочастотных процессов в ЖРД сводится к численному исследованию устойчивости многоконтурной динамической системы «питающие магистрали – ЖРД» с потенциально неустойчивыми подсистемами «питающая магистраль окислителя – насосы окислителя», «питающая магистраль горючего – насосы горючего», «ТНА – газогенератор», «двигатель – регулятор расхода».

С учетом сформулированных выше требований выполнено математическое моделирование низкочастотной динамики перспективного маршевого ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа тягой 250 тонн. Для анализа устойчивости низкочастотных процессов и диагностирования причин низкочастотных колебаний в рассматриваемом ЖРД использован подход, основанный на расчете спектра собственных значений оператора линейной динамической системы

«питающие магистрали – ЖРД» и декомпозиции этой системы на изолированные подсистемы.

Установлено, что исследуемая динамическая система «питающие магистрали – ЖРД» является устойчивой. Определены ее собственные частоты и декременты колебаний. Показано, что низкочастотная часть спектра собственных частот колебаний этой системы содержит 7 частот, из которых две определяются динамическими процессами в линии питания ЖРД окислителем, две – в линии питания ЖРД горючим, две – в подсистеме «ТНА – газогенератор» и одна – в регуляторе расхода. Показано, что учет кавитационных явлений в насосах ЖРД привел к существенному уменьшению собственных частот и декрементов колебаний горючим в линиях питания окислителем и горючим. Определено, что низкочастотные динамические процессы в регуляторе расхода характеризуются большими декрементами колебаний. Установлено, что рассматриваемая динамическая система «питающие магистрали – ЖРД» чувствительна к значению времени пребывания газа в газогенераторе: несмотря на то, что колебания, порождаемые динамическими процессами в подсистеме «ТНА – газогенератор» характеризовались относительно большим затуханием, при увеличении времени пребывания газа в газогенераторе в 1,7 раза система становится неустойчивой.

Результаты проведенных исследований будут использованы при отработке перспективного маршевого ЖРД с дожиганием генераторного газа.

Литература

1. Гликман Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.Ф. Гликман. – М. : Машиностроение, 1989. – 296 с.
2. Натанзон М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты [Текст] / М. С. Натанзон. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
3. Пилипенко, В.В. Кавитационные автоколебания [Текст] / В.В. Пилипенко. – К. : Наукова думка, 1987. – 316 с.
4. Хоряк Н.В. Декомпозиция и анализ устойчивости динамической системы «питающие магистрали – маршевый ЖРД с окислительной схемой дожигания генераторного газа» по спектру матрицы: методические основы и приложение [Текст] / Н.В. Хоряк, А.Д. Николаев // Техническая механика. – 2007. – №1. – С. 28 – 42.
5. Беляев Е.Н. Математическое моделирование ЖРД [Текст] / Е.Н. Беляев, В.В. Черваков. – М. : МАИ, 2009. – 278 с.
6. Хоряк Н.В. Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы «ЖРД – кор-

пус РН» по спектру матрицы: методические основы и приложение [Текст] / Н.В. Хоряк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9(45). – С. 87 – 91.

7. Долгополов С.И. Математическое моделирование низкочастотной динамики регулятора расхода жидкости при различных амплитудах гармонического возмущения [Текст] /

С.И. Долгополов, А.Д. Николаев // Техническая механика – 2017. – № 1. – С. 3 –13.

8. Теория автоматического управления ракетными двигателями / Шевяков А.А., Калнин В.М., Науменкова Н.В., Дятлов В.Г. – М.: Машиностроение, 1978. – 287 с.

Поступила в редакцию 12.06.2017 г.

О.В. Пилипенко, О.О. Прокопчук, С.І. Долгополов, Н.В. Хоряк, О.Д. Николаєв, В.Ю. Писаренко, В.М. Коваленко. Математичне моделювання та аналіз стійкості низькочастотних процесів у маршовому РРД з допалюванням генераторного газу

Розглянуто можливі причини втрати стійкості низькочастотних (до 50 Гц) динамічних процесів у рідинних ракетних двигунах (РРД) із допалюванням генераторного газу. Показано, що для теоретичного визначення стійкості РРД і з'ясування природи його коливань є необхідним дослідження багатозв'язкової динамічної системи «живильні магістралі–РРД». Викладено підхід до вирішення цієї задачі в лінійній постановці, заснований на розрахунку спектра матриці, яка є оператором лінійної системи «живильні магістралі–РРД», і декомпозиції цієї системи. Виконано математичне моделювання низькочастотної динаміки рідинної ракетної двигунної установки (РРДУ), що містить перспективний маршовий РРД із допалюванням окислювального генераторного газу. Показано, що досліджувана РРДУ є стійкою. Урахування кавітаційних явищ у насосах РРД привело до суттєвого зменшення власних частот і декрементів коливань рідини в лініях живлення окислювачем і пальним; динамічні процеси в регуляторі витрати характеризуються великими декрементами коливань; система є чутливою до значення часу перебування газу в газогенераторі.

Ключові слова: рідинний ракетний двигун, турбонасосний агрегат, кавітація, регулятор витрати, стійкість, власні частоти і декременти коливань, спектр матриці.

O.V. Pilipenko, O.O. Prokopchuk, S.I. Dolgoplov, N.V. Khorjak, O.D. Nikolayev, V.Yu. Pisarenko, V.N. Kovalenko. Mathematical modeling and stability analysis of low-frequency processes at main liquid-propellant rocket engine in an oxidizer rich staged combustion cycle

Possible reasons for the loss of stability of low-frequency (up to 50 Hz) dynamic processes in staged liquid-propellant rocket engines (LRE) are considered. It is shown that the theoretical determination of the LRE stability and clarify the nature of its low-frequency oscillations is necessary to investigate the multilinked dynamic system «feed lines - LRE». An approach to the solution of this problem is presented in linear formulation. The approach is based on the calculation of the spectrum of the matrix, which is an operator of the linear dynamic system «feed lines - LRE» and the decomposition of this system. The mathematical modeling of the low-frequency dynamics of the liquid rocket propulsion system inclusive the perspective staged LRE in an oxidizer rich combustion cycle. The investigated liquid rocket engine is stable. It is shown that taking into account cavitation phenomena in the LRE pumps led to a significant decrease in natural frequencies and decrements of fluid oscillations in the LRE feed lines. The low-frequency dynamic processes in the flow regulator are characterized by large decrements of oscillations. The dynamical system under investigation is sensitive to the value of the gas time delays in the gas generator.

Keywords: liquid-propellant rocket engine, dynamic system, low-frequency stability, natural frequencies, cavitation surge decrements, root locus.