УДК 621.455:534.12

Н.В. ХОРЯК, А.Д. НИКОЛАЕВ, С.И. ДОЛГОПОЛОВ

Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДИНАМИКИ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предложен подход к параметрической идентификации математической модели низкочастотной динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов жидкостных ракетных двигателей на основе определения экспериментальных и расчетных границ области устойчивости и собственных частот колебаний динамической системы «шнекоцентробежный насос – трубопроводы». При моделировании низкочастотной динамики гидравлической системы, включающей кавитирующий шнекоцентробежный насос, использовалась гидродинамическая модель кавитационных колебаний. Параметры собственных колебаний и границы области устойчивости этой системы определялись на основе расчета спектра матрицы. С использованием предложенного подхода выполнена параметрическая идентификация математической модели низкочастотной динамики шнекоцентробежного насоса специальной конструкции, шнек которого имеет прорези лопастей.

Ключевые слова: *жидкостной ракетный двигатель, шнекоцентробежный насос, продольная устойчивость ракеты, кавитационные автоколебания, собственные колебания, устойчивость динамической системы, идентификация модели.*

Введение

Высокооборотные шнекоцентробежные насосы (ШЦН) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) обычно работают в режиме кавитации. Кавитационные явления в осевых шнековых преднасосах (ОШП) оказывают существенное влияние на динамические характеристики ЖРД, могут приводить к кавитационным автоколебаниям в системе питания и потере устойчивости рабочего процесса в ЖРД, нарушить функционирование системы управления и выполнение программы полета ракеты [1, 2]. В силу этих причин построение адекватной математической модели, описывающей низкочастотную (с частотами до 50 Гц) динамику кавитирующих ШЦН, является исключительно важной задачей в общей проблеме обеспечения продольной устойчивости жидкостных ракет [1]. При ее решении исследователи, как правило, полагаются на экспериментальное определение зависимостей параметров кавитационного течения – кавитационной податливости (cavitation compliance) и коэффициента усиления насоса по расходу (mass flow gain factor) – от режимных параметров насоса – расхода, давления на входе, частоты вращения вала турбонасосного агрегата [3- 5]. Надежное прогнозирование динамических характеристик двигательной установки при ее работе в составе ракеты требует корректного решения задачи параметрической идентификации модели, описывающей динамику ШЦН (напр., [6]).

Гидродинамическая модель кавитационных автоколебаний в гидравлических системах с высокооборотными ШЦН [2], разработанная в ИТМ НАН Украины и ГКА Украины, позволяет с удовлетворительной точностью определять динамические характеристики ШЦН со шнеками традиционной конструкции, не прибегая к дорогостоящим динамическим испытаниям насосов. Отметим, что одним из эффективных способов повышения устойчивости ЖРД по отношению к кавитационным колебаниям является использование шнеков нетрадиционных конструкций (в частности, шнеков со специальными прорезями во входной части шнекового колеса [7]) и надлежащий выбор их конструктивных параметров. Сложность и недостаточная изученность кавитационных явлений в ШЦН с ОШП нетрадиционных конструкций приводит к необходимости привлечения экспериментальных данных для уточнения расчетно-экспериментальных зависимостей параметров кавитационного течения в шнеке от режимных параметров работы насоса. Построение адекватной математической модели динамики кавитирующего ШЦН, шнек которого имеет специальную конструкцию, позволит не только уменьшить затраты на экспериментальную отработку ЖРД, но также выполнить надежный прогноз низкочастотной устойчивости ЖРД при его работе в составе ракеты.

Целью настоящей статьи является разработка подхода к параметрической идентификации линейной математической модели низкочастотной динамики кавитирующего ШЦН со шнеком нетрадиционной конструкции на основе результатов автономных испытаний ШЦН в режиме кавитационных автоколебаний и расчета параметров собственных колебаний линейной (линеаризованной) динамической системы «ШЦН – трубопроводы».

Постановка задачи и выбор метода

Для идентификации математической модели низкочастотной динамики кавитирующего ШЦН используются результаты автономных испытаний насоса в режиме кавитационных автоколебаний. Экспериментальные исследования проводятся на специальных стендах для динамических испытаний насосов [3 – 5].

В гидравлической системе с ШЦН устанавливается устройство, создающее гармонические пульсации в жидкости. Насос исследуется как объект регулирования, определяются его частотные характеристики, на основании которых строится передаточная матрица насоса.

Математическую модель исследуемого на стенде объекта можно записать в виде функции

$$F(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{b}) = \mathbf{0},$$

где $\mathbf{x}$ – вектор значений входных величин;

$\mathbf{y}$ – вектор значений выходных величин;

$\mathbf{b} = [b_1,\ldots,b_n]$ – вектор определяемых (или настраиваемых) параметров модели;

Пусть $\mathbf{y}$ и $\mathbf{y}^{\text{М}}$ – соответственно векторы значений, полученных в результате эксперимента и вычисленных с использованием математической модели. Задача параметрической идентификации модели состоит в том, чтобы используя значения элементов этих векторов, найти значения параметров $b_1,\ldots,b_n$ настраиваемой модели $F(\mathbf{x},\mathbf{y}^{\text{М}},\mathbf{b}) = \mathbf{0}$, при которых вектор $\mathbf{y}^{\text{М}}$ максимально приближен к вектору $\mathbf{y}$:

$$I(b) = \Psi(\mathbf{x},\mathbf{y}^{\text{М}},\mathbf{b}) \to \min_b$$

Критерий качества идентификации может быть задан различными функциями $I(b)$ [6, 9]. Например, критерий равномерного приближения – функцией $I(b) = \max_i |y_i - y^{\text{М}}|$, квадратичный критерий – функцией $I(b) = \sum_{i=1}^{N}[y_i - y_i^{\text{М}}]^2 / N$, модульный – функцией $I(b) = \sum_{i=1}^{N}|y_i - y^{\text{М}}|$ (здесь N – количество экспериментов). Чаще всего предпочтение отдают функциям, оценивающим квадраты ошибок.

Задачу параметрической идентификации математической модели динамики кавитирующего ШЦН со шнеком специальной конструкции предлагается решать в следующей постановке.

Идентификация осуществляется на основе явной модели, в качестве которой используется гидродинамическая модель кавитационных автоколебаний в гидравлической системе, включающей насос со шнеком обычной конструкции [2]. Указанная модель рассматривается как «серый ящик»: ее структура задана, но значения параметров неизвестны. Эти значения определяются по экспериментальным данным. В качестве экспериментальных данных используются параметры кавитационных автоколебаний. Полученная модель в дальнейшем используется для описания низкочастотной динамики ШЦН со шнеком нетрадиционной конструкции при анализе низкочастотной устойчивости ЖРД и продольной устойчивости жидкостных ракет.

Поскольку структура модели известна, то, задавая параметры $b_1,\ldots,b_n$, можно вычислить значения выходных величин $y_i^{\text{М}} = y_i^{\text{М}}(x_i, b)$, соответствующие экспериментальным значениям y_i.

При идентификации математической модели низкочастотной динамики ШЦН в качестве выходных величин предлагается использовать расчетные и экспериментальные собственные частоты колебаний и границы области устойчивости (ГОУ) динамической системы «ШЦН – трубопроводы» в плоскости параметров «давление на входе в насос – весовой секундный расход жидкости» («P – G»), а в качестве критериальной функции – функцию

$$I(b) = a_i \sum_{i=1}^{N}[f_i^{\text{М}}(p_i,G_i,b) - f_i(p_i,G_i)]^2 + c_i \sum_{i=1}^{N}[p_i^{\text{М}}(G_i,b) - p_i(G_i)]^2, \quad (1)$$

где N – количество экспериментов с разным весовым секундным расходом жидкости через насос;

G_i – весовой секундный расход жидкости на входе в насос в i-м эксперименте (при $G = G_i$);

p_i, $p_i^{\text{М}}$ – экспериментальное и расчетное значение давления жидкости на входе в насос, соответствующие верхней ГОУ системы при $G = G_i$;

f_i, $f_i^{\text{М}}$ – экспериментальное и расчетное значение частоты колебаний жидкости, соответствующие верхней ГОУ системы при $G = G_i$;

a_i, c_i – весовые множители.

Экспериментальные значения входного давления и расхода жидкости, соответствующие ГОУ, определяются по результатам автономных испытаний насоса в режиме кавитационных автоколебаний. Для их возбуждения в системе вблизи от входа в насос устанавливался проточный ресивер [8].

Расчетные собственные частоты колебаний гидравлической системы с кавитирующим ШЦН и ее ГОУ в плоскости параметров «P – G» предлагается определять на основе вычисления корней характеристического уравнения динамической системы «ШЦН – трубопроводы». Их определение сведено к расчету спектра матрицы **A** коэффициентов исследуемой системы, приведенной к форме Коши:

$$\frac{d\mathbf{z}(t)}{dt} = \mathbf{Az}(t),$$

где $\boldsymbol{z}$ – вектор переменных системы.

Предложенный подход прост в реализации и весьма эффективен [10, 11]. Спектр собственных значений $\{\lambda_k\} = \{-\alpha_k \pm j\omega_k\}$ матрицы **A** содержит значения собственных частот $f_k = \omega_k / 2\pi$ и коэффициентов затухания колебаний α_k системы. Устойчивость системы определяется доминирующим собственным значением – собственным значением $\lambda_д = \mathrm{Re}\,\lambda_д + j \cdot \mathrm{Im}\,\lambda_д$ с наибольшей действительной частью ($\mathrm{Re}\,\lambda_д = \max\{\mathrm{Re}\,\lambda_k\}$), а близость системы к ГОУ – близостью $\lambda_д$ к мнимой оси. Исследуемая система устойчива, если $\mathrm{Re}\,\lambda_д < 0$, неустойчива, если $\mathrm{Re}\,\lambda_д > 0$, и находится на границе области устойчивости, если $\mathrm{Re}\,\lambda_д = 0$. Расчетную ГОУ системы «ШЦН – трубопроводы» в плоскости параметров «P – G» образуют такие пары значений $P = p_i^м$, $G = G_i$, при которых доминирующее собственное значение находится на мнимой оси:

$$\alpha_д = -\mathrm{Re}\,\lambda_д(p_i^м, G_i) = 0.$$

Из этого уравнения для каждого расхода G_i определяется значение $p_i^м$.

С учетом выбранного метода расчета собственных частот колебаний и ГОУ системы «ШЦН – трубопроводы» критериальная функция (1) имеет вид:

$$I(b) = a_i \sum_{i=1}^{N} [\mathrm{Im}\,\lambda_d(p_i, G_i, b)/2\pi - f_i(p_i, G_i)]^2 + \\ + c_i \sum_{i=1}^{N} [\mathrm{Re}\,\lambda_d(p_i, G_i, b)]^2, \qquad (2)$$

где $\mathrm{Im}\lambda_d$, $\mathrm{Re}\,\lambda_d$ – мнимая и действительная часть доминирующего собственного значения $\lambda_д$ на верхней границе области устойчивости системы в плоскости параметров «P – G».

При решении задачи параметрической идентификации математической модели низкочастотной динамики ШЦН со шнеком нетрадиционной конструкции предлагается использовать в качестве первого приближения расчетные значения параметров гидродинамической модели кавитационных автоколебаний [2] для варианта шнека традиционной конструкции с таким же диаметром втулки, наружным диаметров, количеством заходов и осевой длиной. В «базовую» гидродинамическую модель [2] вводятся корректирующие множители $b_1, \ldots, b_n$, которые и являются настраиваемыми параметрами модели. Эти коэффициенты характеризуют степень соответствия параметров «базовой» модели параметрам модели динамики ШЦН со шнеком нетрадиционной конструкции. Их значения вычисляются в результате решения задачи идентификации.

Математическая модель

Низкочастотная динамика системы «ШЦН со шнеком нетрадиционной конструкции – трубопроводы» описывалась системой обыкновенных дифференциальных уравнений, включающей в себя уравнения нестационарного движения жидкости в питающей магистрали до проточного ресивера, от ресивера до сильфонного узла и далее до входа в насос, уравнения динамики проточного ресивера с воздушной полостью конечного объема, уравнения динамики ШЦН (с учетом кавитационных каверн в его проточной части). Динамика проточной части кавитирующего ШЦН описывалась в соответствии с гидродинамической моделью [2] уравнением сохранением массы, уравнением динамики кавитационных каверн и уравнением для определения давления на выходе из насоса.

Соответствующие линеаризованные уравнения в отклонениях имеют вид:

$$\gamma \frac{d\delta V_c}{dt} + \delta G_1 - \delta G_2 = 0, \qquad (3)$$

$$\delta P_1 = b_1 \cdot B_1\, \delta V_c + b_2 \cdot B_2\, \delta G_1 + b_3 \cdot B_1 T_c \frac{d\delta V_c}{dt} + \\ + b_4 \cdot J \frac{d\delta G_1}{dt}, \qquad (4)$$

$$\delta P_2 = \delta P_1 + \varepsilon \delta V_c + s_н \delta G_2 - J_н \frac{d\delta G_2}{dt}, \qquad (5)$$

где G_1, P_1 и G_2, P_2 – весовой секундный расход и давление жидкости на входе и выходе из насоса;

V_c – объем кавитационных каверн в проточной части шнека;

B_1, B_2 – кавитационная упругость и отрицательное кавитационное сопротивление;

T_c – постоянная времени кавитационных каверн;

J, $J_н$ – коэффициент инерционного сопротивления шнека на участке роста высоты каверны и коэффициент инерционного сопротивления насоса;

ε, $s_н$ – тангенс угла наклона кавитационной и, соответственно, напорной характеристики ШЦН на рабочем режиме;

b_1, b_2, b_3, b_4 – корректирующие множители.

Здесь и далее символ δ в уравнениях используется для обозначения вариации параметра.

Уравнения неустановившегося движения жидкости в элементах гидравлических трактов, рассматриваемых как системы с сосредоточенными параметрами, имели вид:

$$J_k \frac{d\delta G_k}{dt} = \delta p_{k-1} - \delta p_k - R_k\, \delta G_k\,,$$

$$C_k \cdot \frac{d\delta p_k}{dt} = \delta G_k - \delta G_{k+1}\,,$$

где G_k, P_k – весовой секундный расход и давление жидкости на входе в k-й элемент тракта;

J_k, R_k – коэффициенты инерционного и линеаризованного гидравлического сопротивления k-го элемента гидравлического тракта.

Динамика проточного ресивера описывалась уравнением неустановившегося движения жидкости в проточной емкости и уравнением динамики воздушной полости в ресивере

$$J_r \frac{d\delta G_r}{dt} = \delta P_g - \delta P_u - R_r\, \delta G_r\,,$$

$$\delta G_r + \frac{\gamma \overline{V}_g}{\kappa \overline{P}_g} \frac{d\delta P_g}{dt} = 0\,,$$

где G_r – весовой секундный расход из ресивера,

P_u – давление в месте подсоединения ресивера,

P_g – давление в воздушной полости ресивера,

$\overline{V}_g$, $\overline{P}_g$ – установившиеся значения объема и давления в воздушной полости,

J_r – коэффициент инерционного сопротивления столба жидкости в проточном ресивере.

Результаты моделирования

Задача параметрической идентификации математической модели динамики кавитирующего ШЦН решалась применительно к насосу, у которого лопасти предвключенного шнека имеют прорези. При ее решении использовались результаты автономных динамических испытаний двух ШЦН [8] – основного насоса системы питания окислителем маршевого ЖРД первой ступени жидкостной ракеты-носителя, предвключенный шнек которого не имеет прорезей лопастей, и такого же насоса, шнек которого выполнен с тремя прорезями лопастей в соответствии с [7]. Прорези сделаны на входном участке лопастей перпендикулярно оси шнекового колеса.

Результаты математического моделирования низкочастотной динамики системы «ШЦН – трубопроводы» со шнеком без прорезей (традиционной конструкции), полученные на основе гидродинамической модели кавитационных колебаний [2], удовлетворительно согласуются с результатами автономных динамических испытаний насоса как по частотам колебаний (рис. 1), так и по границам области устойчивости (рис. 2).

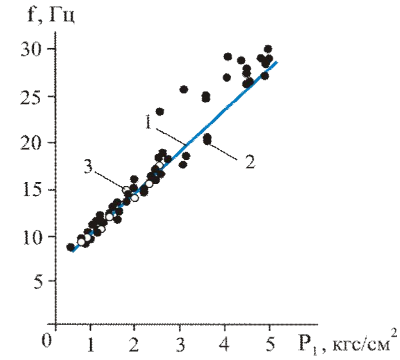

Рис. 1. Зависимость частоты кавитационных колебаний в системе «ШЦН – трубопроводы» от давления на входе в насос:
1 – расчетная зависимость;
2, 3 – экспериментальные точки (2 – для варианта шнека без прорезей, 3 – с прорезями)

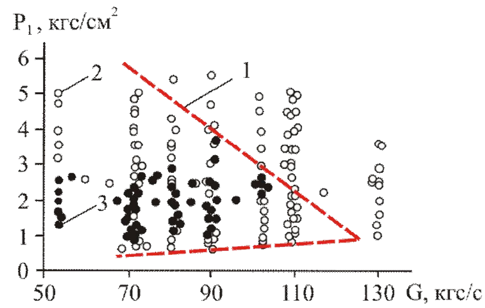

Рис. 2. Области устойчивости системы «ШЦН – трубопроводы» для варианта шнека без прорезей:
1 – расчетная граница области устойчивости;
2 – экспериментальные точки (2 – режимы устойчивой работы, 3 – неустойчивой)

Приведенные на рис. 1 результаты получены для расхода G=70 кгс/с. Кривой 1 изображена расчетная зависимость частоты кавитационных колебаний в системе от входного давления, кружочками – экспериментальные точки. Черными кружочками показаны результаты автономных испытаний ШЦН со шнеком без прорезей, белыми – с прорезями лопастей. На рис. 2 расчетная ГОУ системы «ШЦН – трубопроводы» для шнека без прорезей изображена кривой 1, а экспериментальные точки – кружочками (белые кружочки соответствуют режимам устойчивой работы насоса, черные – неустойчивой).

Для варианта шнека с прорезями лопастей удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных получено только для собственных частот колебаний (рис. 1). На основании этого результата можно сделать вывод, что в уравнении (4) параметры B_1 и J, которые определяют частоту кавитационных колебаний, не нуждаются в корректировке. Это позволяет упростить решение задачи идентификации, положив $b_1=1$, $b_4=1$ и ограничившись определением значений b_2 и b_3.

В результате решения задачи идентификации определено, что значения параметров b_1, b_2, b_4 близки к 1, а $b_3=2{,}1$. Экспериментальные и расчетные области устойчивости системы «ШЦН – трубопроводы» для варианта шнека с прорезями лопастей показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, введение в модель корректирующих коэффициентов b_i $(i=1,...,4)$ обеспечило приемлемое согласование расчетных ГОУ с результатами экспериментов.

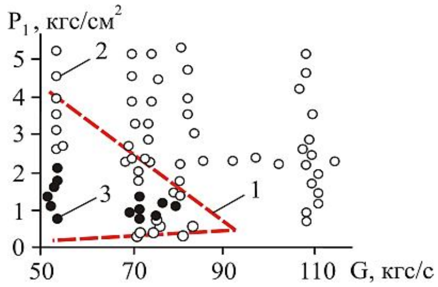

Рис. 3. Области устойчивости системы «ШЦН – трубопроводы» для варианта шнека с прорезями:
1 – расчетная граница области устойчивости;
2 – экспериментальные точки (2 – режимы устойчивой работы, 3 – неустойчивой)

Сравнение областей устойчивости системы «ШЦН – трубопроводы» для двух вариантов шнека (рис. 2, 3) наглядно показывает, что использование шнека с прорезями значительно уменьшает область неустойчивости этой системы по отношению к кавитационным колебаниям.

Заключение

Рассмотрена задача параметрической идентификации линейной математической модели низкочастотной динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов ЖРД, которая необходима для выполнения теоретических прогнозов низкочастотной устойчивости ЖРД и продольной устойчивости жидкостных ракет .

Предложен подход к решению этой задачи на основе определения собственных частот колебаний и границы области устойчивости динамической системы «ШЦН – трубопроводы» в плоскости параметров «давление жидкости на входе в насос – расход». Экспериментальные значения указанных характеристик определяются по результатам автономных динамических испытаний насоса в режиме кавитационных автоколебаний, а теоретические – по результатам расчета спектра матрицы коэффициентов исследуемой системы. Идентификация осуществляется на основе минимизации выбранной критериальной функции с использованием явной модели. В качестве базовой модели используется гидродинамическая модель кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРД со шнеками традиционных конструкций.

Рассмотрен пример реализации предложенного подхода при идентификации математической модели низкочастотной динамики кавитирующего ШЦН со шнеком нетрадиционной конструкции, лопасти которого имеют прорези. Получено приемлемое согласование расчетных ГОУ и собственных частот колебаний исследуемой динамической системы с результатами экспериментов.

Литература

1. Натанзон, М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты [Текст] / М.С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

2. Пилипенко, В.В. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем [Текст] / В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, М.С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.

3. Cavitation and Turbopump Hydrodynamics Research at Alta S. P. A. and Pisa University [Text] / A. Cervone, L. Torre, A. Pasini, L. d'Agostino // Proc. of the 4-th Int. Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering. – Beijing (China), November 24-27, 2008. – No. 4ISFMFE-IL16. – 8 p.

4. Development History of Liquid Oxygen Turbopumps for the LE-7 Engine [Text] / K. Kamijo, H. Yamada, N. Sakazume, Sh. Warashina // Trans. Japon. Soc. Aero. Space Sci. – 2001. – Vol. 44, No. 145. – P. 155-163.

5. A Water Test Facility for Liquid Rocket Engine Turbopump Cavitation Testing [Text] / D. Ehrlich, J. Schwille, R. Welle, J. Murdock, B. Hardy // Proc. of the 7-th Int. Symposium on Cavitation. – Ann Arbor, Michigan(USA). – 2009. – CAV2009. – P. 11–10.

6. Грабовская, Т.А. К вопросу об идентификации уравнения для определения давления на входе в насос [Текст] / Т.А. Грабовская // Математические модели рабочих процессов в гидро пневмосистемах: сб. науч. тр. – К.: Наук. думка, 1981. – С. 63-77.

7. Пат. 73783 Україна, МПКF04D 9/00. Шнековідцентровий насос / Иванов Я.Н., Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Дрозд В.А.; Заявник і патен-

товолодар ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля. – № 2003021144; заявл. 07.02.2003; опубл. 15.09.2005, Бюл. № 9. – 3 с.

8. Автономные динамические испытания шнекоцентробежного насоса ЖРД большой размерности в режиме кавитационных автоколебаний [Текст] / В.А. Задонцев, В.А. Дрозд, С.И. Долгополов, Т.А. Грабовская // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 9 (66). – С. 100-106.

9. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя [Текст] / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

10. Хоряк, Н.В. Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы «ЖРД – корпус РН» по спектру матрицы: методические основы и приложение [Текст] / Н.В. Хоряк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9 (45). – С. 87-91.

11. Zadontsev, V.A Stability Analysis of Coupled LPRE–launch vehicle structure system in time domain [text] / V.A. Zadontsev, N.V. Khoryak //Proc. of the VII[h] Sino-Russia-Ukraine Symposium on Astronautical Science and Technique. – Xi'an (China), 2002. – P. 235-243.

Поступила в редакцию 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., главн. науч. сотр. В.А. Задонцев, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск.

ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ ДИНАМІКИ ШНЕКОВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ РІДИННИХ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ

Н.В. Хоряк, О.Д. Ніколаєв, С.І. Долгополов

Запропоновано підхід до параметричної ідентифікації математичної моделі низькочастотної динаміки кавітуючих шнековідцентрових насосів рідинних ракетних двигунів на основі визначення експериментальних і розрахункових границь області стійкості та власних частот коливань динамічної системи «шнековідцентровий насос – трубопроводи». При моделюванні низькочастотної динаміки гідравлічної системи з кавітуючим шнековідцентровим насосом використовувалася гідродинамічна модель кавітаційних коливань. Параметри власних коливань та границі області стійкості цієї системи визначалися на основі розрахунку спектра матриці. З використанням запропонованого підходу виконано параметричну ідентифікацію математичної моделі низькочастотної динаміки шнековідцентрового насосу спеціальної конструкції, шнек якого має прорізи лопастей.

Ключові слова: рідинний ракетний двигун, шнековідцентровий насос, поздовжня стійкість ракети, кавітаційні автоколивання, власні коливання, стійкість динамічної системи, ідентифікація моделі.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE LOW-FREQUENCY DYNAMICS PUMPS OF LIQUID ROCKET ENGINES

N.V. Khoryak, A.D. Nykolayev, S.I. Dolgopolov

The approach to parametric identification of a mathematical model of the low-frequency dynamics cavitating inducer centrifugal pumps of liquid rocket engines based on the definition of experimental and computational the stability boundary and natural vibration frequencies of the «inducer centrifugal pump – pipelines» dynamic system is offered. The hydrodynamic model of cavitation oscillations was used in modeling of low-frequency dynamics of the hydraulic system with cavitating inducer centrifugal pump. Natural oscillations parameters and stability boundary were determined by calculation of a system matrix spectrum. The offered approach was applied for the parametric identification of a mathematical model of the low-frequency dynamics of the special design pump had inducer blades with slots.

Key words: liquid rocket engine, inducer centrifugal pump*,* launcher POGO stability, cavitation oscillations, natural oscillations, stability of the dynamic system, identification of the model.

Хоряк Наталия Витальевна – канд. техн. наук, науч. сотр. отдела динамики гидромеханических систем, Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: khoryak@i.ua.

Николаев Алексей Дмитриевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела динамики гидромеханических систем, Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск, Украина.

Долгополов Сергей Иванович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела динамики гидромеханических систем, Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск, Украина.