

УДК 621.454.2:629.76

В.А. ЗАДОНЦЕВ¹, А.Д. НИКОЛАЕВ²¹Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Украина²Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, Украина

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ДЕМПФИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

На основании численного решения задачи параметрической оптимизации демпфирующего устройства продольных колебаний гидромеханической системы (ГМС), устанавливаемого в питающей магистрали двигательной установки (ДУ), показано, что для достижения максимальных запасов устойчивости динамической системы «ДУ – корпус ГМС» параметры демпфера могут быть выбраны в соответствии с оптимальной реализацией разных теоретически возможных (амплитудных и фазовых) способов обеспечения продольной устойчивости ГМС.

продольная устойчивость, демпфер, питающая магистраль ДУ, параметрическая оптимизация

Введение

Разработка демпфирующих устройств для обеспечения продольной устойчивости гидромеханических систем (ГМС) является неотъемлемой частью работ, выполняемых при проектировании ГМС. Выбор параметров демпферов продольных колебаний обычно проводится на основании значительного объема расчетных работ по исследованию свойств динамической системы «ДУ – корпус ГМС» [1 – 3]. Однако такой подход отличается повышенной трудоемкостью процесса поиска решения и не ведет к гарантированному обеспечению максимальных запасов устойчивости ГМС по отношению к продольным колебаниям.

Постановка задачи. Очевидно, что наиболее надежным средством обеспечения продольной устойчивости ГМС будет такое, которое отвечает максимальным запасам устойчивости замкнутой системы «ДУ – ГМС». В этом случае малые отклонения параметров системы «ДУ – корпус ГМС», которые могут возникнуть из-за неточностей принятой ее математической модели, не приведут к недопустимому снижению запаса устойчивости системы. К этой задаче наиболее логично подойти как к задаче

нелинейного математического программирования. Постановка задачи параметрической оптимизации подразумевает определение решения, удовлетворяющего условиям оптимальности по единственному критерию качества (целевой функции). При оптимизации демпфера по степени устойчивости системы «ДУ – корпус ГМС» – постановка задачи нелинейного математического программирования будет следующей:

$$\max_{i \in I} \max_{i \in K} \operatorname{Re} \lambda_i \rightarrow \min_{x \in D}; \quad (1)$$

$$D = \left\{ x \in R^n / g_j(x) \leq 0; \quad (j = \overline{1, m}) \right\}$$

где R^n – мерное евклидово пространство, т.е. множество векторов параметров демпфирующего устройства $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, все компоненты x_1, x_2, \dots, x_n которых являются действительными числами;

g_j – скалярная функция;

D – множество допустимых решений, в пределах которого выполняются параметрические ограничения, представленные в виде неравенств и равенств;

$\operatorname{Re} \lambda_i$ – действительная часть i -го собственного значения матрицы системы, доминирующего в за-

даче [1] о продольной устойчивости ГМС;

t – текущее время, соответствующее временно-му диапазону T работы ДУ.

Динамика демпфера в задаче (1) описывалась посредством линеаризованного уравнения:

$$\frac{d^2}{dt^2}G_d + \frac{1}{R_d I_d} \frac{d}{dt}G_d + \frac{1}{C_d I_d} G_d + \frac{1}{I_d} \frac{d}{dt}P_0 = 0,$$

где переменные G_d, P_0 – соответственно весовой расход жидкости через демпфер и давление в месте его установки в системе питания ДУ, а в качестве параметров демпфера продольных колебаний рассматривались: координата места его установки в питающей магистрали ДУ, коэффициенты линеаризованного гидравлического R_d и инерционного I_d сопротивления и податливость демпфера C_d .

1. Решение задачи оптимизации параметров демпфера

При решении задачи оптимизации (1) численное определение целевой функции проводилось с использованием упрощенной математической модели системы «ДУ – корпус ГМС» [2], описывающей один (первый) тон продольных колебаний корпуса и одну линию ДУ. Топливоподающая магистраль ДУ моделировалась как система с сосредоточенными параметрами. Основной отличительной особенностью этой модели является учет кавитационных явлений [3] в насосах линии питания ДУ, благодаря чему указанная модель описывает основные для анализа продольной устойчивости ГМС динамические свойства системы «ДУ – корпус ГМС», что принципиально важно в задаче (1). Исследуемая система «ДУ – корпус ГМС» без демпфера неустойчива по первому приближению Ляпунова на конечном интервале времени работы ДУ вследствие резонансного взаимодействия корпуса и «акустически длинной» питающей магистрали ДУ на частотах колебаний 6 – 11 Гц.

Для сравнения подходов решение задачи параметрического синтеза демпфирующего устройства

проводилось в двух постановках – во временной и частотных областях: в первой – с использованием в задаче (1) в качестве целевой функции максимальной по времени работы ДУ действительной части собственного значения матрицы системы «ДУ – корпус ГМС» и максимального по времени работы ДУ модуля частотной характеристики $W_{rs}(j\omega)$ разомкнутой системы «ДУ – корпус ГМС» – во второй. Проведение расчетов указало на существование в области определения D двух локальных экстремумов при решении задачи (1) в первой постановке (решения 1, 2), а для второй – одного локального экстремума (решение 3).

Анализ результатов решения задачи (1) показал, что оптимальное демпфирование системы «ДУ – корпус ГМС» может быть проведено несколькими путями: оптимальным изменением фазовой характеристики питающей магистрали в частотном диапазоне проявления резонансных свойств корпуса ГМС (решение 2); максимальным демпфированием питающей магистрали ДУ, достигаемым при установке демпфера с максимальной податливостью и гидравлическим сопротивлением (решение 1); максимальным уменьшением коэффициента усиления питающей магистрали по каналу продольной устойчивости в диапазоне изменения частот колебаний слабо демпфированных мод корпуса ГМС (решение 3).

Как следует из рис. 1, наиболее удален от мнимой оси годограф собственного значения λ_i , соответствующий параметрам решения 2. Вместе с тем, для этого решения зависимость модуля частотной характеристики разомкнутой системы «ДУ – корпус ГМС» от времени работы ДУ имеет наиболее высокие максимумы. Установка в питающую магистраль ДУ демпфера с параметрами решения 2 позволяет уменьшить частоту колебаний первого тона жидкости в питающем трубопроводе с 9,6 до 6 Гц. Это приводит к фазовой (при $t > 50$ сек), а при $t = 40$ сек – к амплитудной стабилизации контура «ДУ – корпус ГМС».

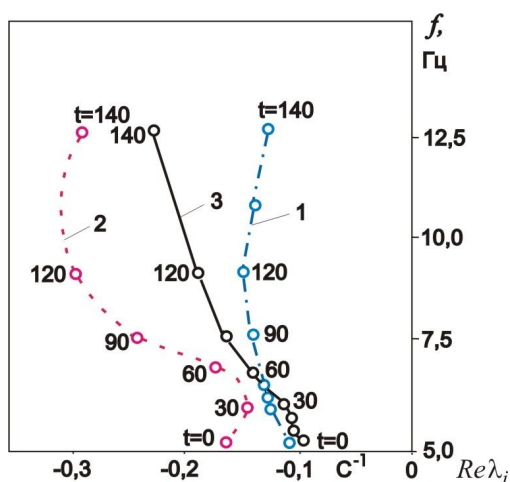


Рис. 1. Годографы доминирующего собственного значения матрицы системы для различных решений задачи (1) параметрической оптимизации демпфера

Решение 1 определяет максимально возможное демпфирование питающей магистрали. Однако для его реализации необходимо обеспечение максимальной податливости демпфера, что ведет в случае установки в магистраль, например, газожидкостного демпфера, к предельно возможным габаритам и массе этого устройства. Решение 3 соответствует оптимальному расположению «антирезонансной» области частотной характеристики питающей магистрали ДУ в диапазоне изменения собственных частот корпуса ГМС с превышением этого диапазона резонансной частотой второго тона колебаний жидкости в питающей магистрали ДУ.

Проведение оптимизационных расчетов также показало, что устойчивость системы «ДУ – корпус ГМС» в случае недостаточного демпфирования системы питания ДУ, вносимого демпфирующим устройством (т.е., если при максимальном значении линеаризованного гидравлического сопротивления демпфера система питания ДУ неустойчива по отношению к кавитационным колебаниям), может быть достигнута за счет перемещения места установки демпфера от входа в ДУ. Оптимальность места установки демпфера в этом случае обеспечивает

ся компромиссом между повышением устойчивости по отношению к кавитационным колебаниям и снижением запаса продольной устойчивости ГМС.

Выводы

На основании решения задачи параметрической оптимизации демпфирующего устройства ДУ могут быть определены условия обеспечения максимальных запасов продольной устойчивости ГМС, которые соответствуют: оптимальному изменению фазовой характеристики питающей магистрали в частотном диапазоне проявления резонансных свойств корпуса ГМС; максимальному демпфированию ДУ, достигаемому при установке демпфера с максимальной податливостью и гидравлическим сопротивлением; максимальному уменьшению модуля коэффициента усиления питающей магистрали по каналу продольной устойчивости в диапазоне изменения частот колебаний слабо демпфированных мод корпуса ГМС.

Литература

1. Rubin S. Longitudinal Instability of Liquid Rockets Due to Propulsion Feedback (POGO) // J. Spacecraft and Rockets. – 1966. – Vol.3, No.8. – P.1188-1195.
2. Zadontsev V.A., Khoryak N.V. Stability Analysis of Coupled LPRE – LV structure system in time domain // Proceeding of the VIIth Sino – Russia – Ukraine Symposium on Astronautical Science and Technique. – China, Sian. – Sept, 17-19. – 2002. – P. 235-243.
3. Пилипенко В.В, Задонцев В.А., Натанзон М.С. Кавитационные колебания и динамика гидросистем. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.

Поступила в редакцию 31.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.Д. Коваленко, ИТМ НАНУ и НКАУ, Днепрпетровск.