

В.А.Короткий

ТУРБОНАСОСНЫЙ АГРЕГАТ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

На основе линеаризованной математической модели ТНА получены простые выражения для передаточных функций ТНА, описывающие вариацию напора насоса ТНА при воздействиях по газовой и гидравлической линиям. Показано, что безразмерный коэффициент усиления ТНА есть величина постоянная, не зависящая ни от конструктивных характеристик, ни от номинального режима работы ТНА. Теоретически рассчитанная импульсно-переходная функция ТНА при изменении гидравлической нагрузки подтверждена экспериментально.

Для исследования динамических процессов в регулируемых системах, включающих в себя турбонасосный агрегат (ТНА), необходимо представить ТНА как динамическое звено с некоторой передаточной функцией. В качестве входных воздействий на ТНА рассмотрим вариацию давления газа δp_f перед сопловым блоком турбины и вариацию проходного сечения δf гидравлической нагрузки центрального насоса. Выходной сигнал ТНА — изменение напора $\delta \Delta p$, развиваемого насосом ТНА (рис. 1).



Примем допущения: коэффициенты полезного действия насоса η_n и турбины η_t постоянны; режим работы насоса бескавитационный; волновыми процессами в гидролиниях пренебрегаем.

Запишем основное уравнение ТНА в виде [1]

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = N_t - N_n . \quad (1)$$

Здесь мощность турбины

$$N_t = G_T L_A \eta_t , \quad (2)$$

а мощность, потребляемая насосом, может быть представлена в виде [1]

$$N_H = q \Delta p / \eta_H, \quad (3)$$

где $G_r = A_k F_T \rho_r$ — массовый расход горячего газа через критическое сечение F_T соплового блока турбины. Адиабатная работа L_A , зависящая от степени расширения газа в сопловом аппарате турбины, при рассмотрении малых вариаций рабочих параметров может быть принята постоянной. Таким образом, выражение (2) приводится к виду

$$N_T = \varphi P_r, \quad (4)$$

где $\varphi = A_k F_T L_A \eta_T$ — постоянный коэффициент.

Расход через насос равен расходу через потребитель с приведенным проходным сечением μf :

$$q = \mu f \sqrt{2 \Delta p / \rho}. \quad (5)$$

Линеаризуя (1)–(5) и переходя к относительным отклонениям, получаем основное уравнение ТНА

$$J \frac{\omega^2 d\delta\omega}{N_T dt} = \delta p_r - \delta q - \delta \Delta p. \quad (6)$$

Здесь

$$\delta q = \delta f + 0,5 \delta \Delta p, \quad (7)$$

$$\delta \Delta p = \alpha \delta \omega + \beta \delta q. \quad (8)$$

Частные производные

$$\alpha = \frac{\omega}{\Delta p} \frac{\partial \Delta p}{\partial \omega}, \quad \beta = \frac{q}{\Delta p} \frac{\partial \Delta p}{\partial q}$$

определяются по напорной характеристике насоса, а символ δ означает малое относительное отклонение параметра от номинала.

Исключая из (6)–(8) неизвестную переменную δq , получаем искомыми передаточные функции ТНА по выходному параметру $\delta \Delta p$, считая внешними воздействиями вариации входных параметров δp и δf :

$$W_1(s) = \frac{\delta \Delta p(s)}{\delta p(s)} = \frac{\kappa}{T_s + 1}, \quad (9)$$

$$W_2(s) = \frac{\delta \Delta p(s)}{\delta f(s)} = \frac{\tau s + \kappa}{Ts + 1}, \quad (I0)$$

где

$$T = \frac{J\omega^2}{3N_H}, \quad \tau = 2T\alpha^{-1} \operatorname{mod}(\beta), \quad \kappa = 2/3.$$

Решая уравнения (3) и (5) совместно с уравнениями напорной характеристики насоса, получаем

$$N_H = \psi \omega^3, \quad (II)$$

где коэффициент пропорциональности ψ зависит, в частности, от номинального значения площади проходного сечения f гидравлического потребителя. Подставляя (II) в выражение для T , получаем $T = 0,5 \kappa \times J \psi^{-1} \omega^{-1}$, т.е. постоянная времени ТНА обратно пропорциональна номинальной частоте вращения ротора [2].

Отметим, что в рамках модели (1)–(3) коэффициент усиления ТНА в относительных параметрах

$$\kappa = \frac{\delta \Delta p}{\delta p} = - \frac{\delta \Delta p}{\delta f} = \frac{2}{3}$$

есть постоянная величина, не зависящая ни от конструктивных характеристик, ни от номинального режима работы ТНА.

Таким образом, при воздействии по газовой линии ТНА описывается аperiodическим звеном (9), а при подаче возмущения по величине гидравлической нагрузки ТНА может быть представлен как параллельное соединение реального дифференцирующего и аperiodического звеньев (10). В соответствии с (10) переходная функция ТНА при воздействии по нагрузке имеет вид

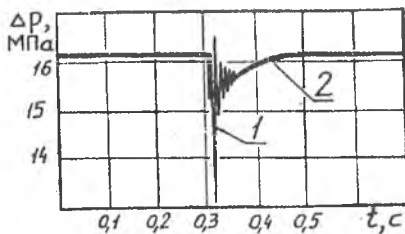
$$h(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \frac{\tau}{T} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (I2)$$

а импульсно-переходная функция (ИПФ)

$$h'(t) = \delta(t) + \frac{1}{T} (k - \frac{\tau}{T}) e^{-\frac{t}{T}}, \quad (I3)$$

где $\delta(t)$ – импульсная функция.

Теоретически полученная ИПФ ТНА подтверждается экспериментально (рис. 2). В момент срабатывания пироклапана, переключающего поток жидкости с шунтовой магистрали на потребитель, в напорной магистрали



Р и с. 2. Реакция ТНА на импульсное изменение нагрузки: 1 - эксперимент (с осциллограммы); 2 - расчет по теоретической ИИД ТНА

практически мгновенно происходит разрыв столба жидкости, что эквивалентно импульсному изменению проходного сечения потребителя. При этом давление за насосом резко падает с последующим восстановлением до прежнего уровня в соответствии с теоретической ИИД ТНА (13). Сопутствующие высокочастотные колебания обусловлены динамическими процессами в напорном трубопроводе, не учтенными в модели (1)-(5).

Библиографический список

1. Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 540 с.
2. Шевяков А.А., Калпин В.М., Науменкова Н.В. и др. Теория автоматического управления ракетными двигателями. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.

УДК 534.1-621.45.00-752

И.Л.Письменный

ЯВЛЕНИЕ синхронизации в лопаточных машинах

Показано, что многим колебательным процессам в лопаточных машинах свойственна тенденция синхронизации. Частным случаем проявления этой тенденции является явление, известное как вращающийся срыв. Проводится аналогия между свойствами вращающегося срыва и характеристиками скоростей вращения планет вокруг Солнца.

Исследования периодических процессов в сложных динамических системах и взаимодействий колебательных и вращательных движений в раз-

Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.