С. В. ЗЛАТОУСТОВ, Л. В. КРАВЧЕНКО,
В. С. ПАЩЕНКО

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ДВУМ ТОЧКАМ ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ

В статье рассматривается метод получения информации о коэффициенте относительного затухания ξ и собственной частоте колебаний ω_0 по двум точкам импульсной переходной функции (ИПФ) при действии импульсного пробного сигнала и наличия помех (возмущений), который может быть использован при построении самонастраивающихся систем (СНС) управления полетом летательных аппаратов (ЛА).

Существующие методы получения информации о ξ и ω_0 [1÷4] обладают рядом недостатков, таких как:

малое быстродействие, определяемое временем переходного процесса;

малая точность из-за зависимости показаний вычислительных устройств от внешних возмущений (болтанки ЛА) начальных условий или амплитуды пробного сигнала и влияния других параметров;

непригодность для систем с относительно большим затуханием ($\xi \geqslant 0{,}7$), так как все методы предполагают наличие в системе управления большой колебательности, иногда близкой к границе устойчивости (при изменении ω_0);

невозможность одновременного получения информации о ξ и ω_0;

косвенная оценка параметров; сложность технической реализации.

Предлагаемый авторами метод свободен от указанных недостатков. Пусть для простоты и наглядности метода основной предпосылкой служит предположение о том, что свободные колебания системы управления с изменяющимися параметрами описываются линейным дифференциальным уравнением динамики

$$[M(p)(p^2 + a_1 p + a_2)]\, x_2(p) = a_2 kA \pm B \qquad (1)$$

и могут быть приближенно представлены уравнением второго порядка при $B=0$ в виде переходной функции

$$x_2(t) = kA\left[1 - \frac{\exp(-\xi\omega_0 t)}{\sqrt{1-\xi^2}}\sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\,\omega_0 t + \varphi\right)\right], \qquad (2)$$

где $x_2(t)$ — выходная координата системы;

A — импульсный пробный сигнал, равный $\frac{x_1(t)}{1(t)}$;

B — возмущение (помеха);

κ — коэффициент пропорциональности;

$$a_1 = 2\xi\omega_0 = \text{var}; \; a_2 = \omega_0^2 = \text{var}.$$

$M(p)$ — полином от $p = \frac{d}{dt}$, для которого справедливо условие квазистационарности, что позволяет рассматривать систему стационарной;

φ — угол сдвига фаз, равный

$$\varphi = \text{arctg}\,\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}.$$

Принцип измерения ξ и ω_0 заключается в том, что на импульсной переходной функции

$$k(t_1, \xi, \omega_0) = x_2(t) = kA\frac{\omega_0}{\sqrt{1-\xi^2}}\exp(-\xi\omega_0 t)\sin\sqrt{1-\xi^2}\,\omega_0 t \qquad (3)$$

фиксируются два ее текущих значения и полученная система уравнений

$$\begin{aligned} k_2(t_1, \xi_1\, \omega_0) &= kA\frac{\omega_0}{\sqrt{1-\xi^2}}\exp(-\xi\,\omega_0 t_1)\sin\sqrt{1-\xi^2}\,\omega_0 t_1, \\ k_2(t_2, \xi_1\, \omega_0) &= kA\frac{\omega_0}{\sqrt{1-\xi^2}}\exp(-\xi\,\omega_0 t_2)\sin\sqrt{1-\xi^2}\,\omega_0 t_2 \end{aligned} \qquad (4)$$

решается относительно ξ и ω_0. При этом вводятся следующие ограничения: $k=\text{const}$; $A=\text{const}$; $t=t_2$; t_2; $t_2>t_1$; метод рассматривается как при отсутствии возмущений, $B=0$, так и при их наличии, $B\neq 0$.

Для получения информации о параметрах ξ и ω_0 система уравнений (4) решается в виде

$$\begin{aligned} \xi &= \xi(k_1;\; k_2); \\ \omega_0 &= \omega_0(k_1;\; k_2). \end{aligned} \qquad (5)$$

Аналитическое решение системы трансцендентных уравнений (4) в виде (5) представляет сложную задачу. Но так как ξ и ω_0 используются в качестве критериев качества СНС, в которых отклонения параметров являются величинами малыми, то задача несколько упрощается. В этом случае систему уравнений (4) можно линеаризовать разложением в ряд Тейлора

$$\begin{aligned} k_1(t_1, \xi, \omega_0) &= k_{10} + c_1\,\Delta\omega + c_2\,\Delta\xi; \\ k_2(t_2, \xi, \omega_0) &= k_{20} + c_3\,\Delta\omega + c_4\,\Delta\xi, \end{aligned} \qquad (6)$$

где k_{10}, k_{20} — значения ИПФ в моменты t_1 и t_2;

c_1, c_2, c_3, c_4 —аналитически или графически получаемые частные производные, соответственно равные

$$\frac{\partial k_1}{\partial \omega}; \quad \frac{\partial k_1}{\partial \xi}; \quad \frac{\partial k_2}{\partial \omega}; \quad \frac{\partial k_2}{\partial \xi}.$$

Система уравнений (6) может быть решена относительно отклонений $\Delta\xi$ и $\Delta\omega$ от заданных значений при помощи несложного вычислительного устройства (ВУ).

При подстановке в (6) грубо приближенных значений корней в общем виде получим

$$\begin{aligned} \xi\left(k_1^{(0)},\ k_2^{(0)},\ \omega_0^{(0)}\right) &= \varepsilon_1^{(0)}; \\ \omega_0\left(k_1^{(0)},\ k_2^{(0)},\ \xi^{(0)}\right) &= \varepsilon_2^{(0)}. \end{aligned} \tag{7}$$

В системе уравнений (7) изменением переменных ξ и ω_0 на величины $\Delta\xi$ и $\Delta\omega$ можно добиться уменьшения ошибок рассогласования $\varepsilon_1^{(0)}$ и $\varepsilon^{(0)}$. Тогда ξ и ω_0 будут приближаться к корням уравнений (6). С учетом (6) систему уравнений (7) можно записать в виде

$$\begin{aligned} c_1\Delta\omega + c_2\Delta\xi - \Delta k_1 &= \varepsilon_1; \\ c_3\Delta\omega + c_4\Delta\xi - \Delta k_2 &= \varepsilon_2. \end{aligned} \tag{8}$$

Здесь Δk_1, Δk_2 — отклонения ИПФ от фиксированных значений;

ε_1, ε_2 — ошибки системы автоматической обработки ξ, ω_0.

Система линеаризованных уравнений (8) решается ВУ, состоящим из двух функциональных устройств *(F)* и следящих систем отработки (СО), блок-схема устройства изображена на рис. 1а.

Математическая модель ВУ показана на рис. 1б.

Была выполнена графическая оценка погрешностей, для чего на рис. 2 построена сетка в плоскости параметров k_1 (ξ, ω_0) и k_2 (ξ, ω_0), на ко-

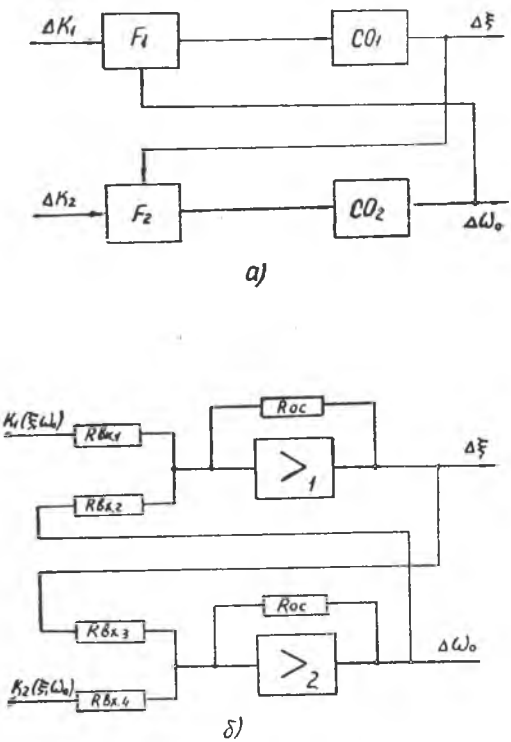

Рис. 1. Блок-схема *а* и математическая модель *б* вычислительного устройства

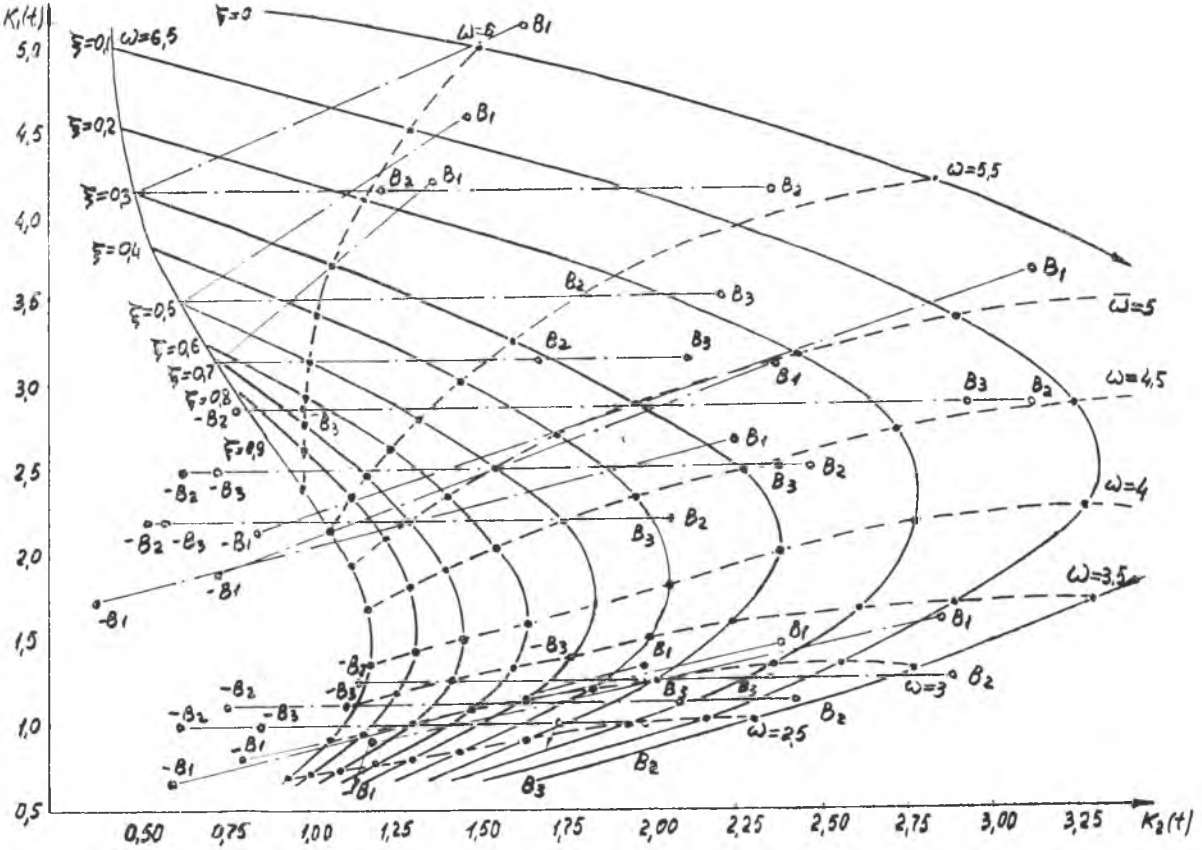

Рис. 2. Плоскость параметров κ_1 (ξ, ω_0); κ_2 (ξ, ω_0)

торую нанесены линии действий возмущений $\pm B_1$, $\pm B_2$, $\pm B_3$. При воздействии помех $B=\pm 0{,}5A$ и изменении динамических параметров $\omega=0\div 4$, $\xi=0\div 0{,}9$ максимальные относительные погрешности равны $\delta\omega=0{,}10$; $\delta\xi=0{,}15$.

Анализ графиков, представленных на рис. 2, показывает, что в плоскости параметров $k_1(\xi, \omega_0)$ и $k_2(\xi, \omega_0)$ имеются области, в которых ВУ по каналам ξ или ω_0 оказывается инвариантным к действию возмущений B и точность вычислительного устройства повышается. Например, линия равных значений ω_0 $(\omega_0 = 3\frac{1}{сек})$ почти совпадает с линией действия возмущений.

Это говорит о том, что при измерении параметра ω_0 в области $\omega_0=(2{,}5\div 3{,}5)\frac{1}{сек}$ действие помех на ВУ оказывается незначительным.

Достоинствами предлагаемого метода являются:

высокое быстродействие, определяемое десятыми долями секунд и устанавливаемое временем отсчета t_1 *и* t_2;

относительно высокая точность, вызванная измерением на начальном участке ИПФ, где отношение амплитуд ускорений от действий пробного сигнала и помех максимальны;

независимость показаний ВУ от начальных условий или амплитуды пробного сигнала;

прямая оценка параметров;

пригодность метода для систем с большим затуханием, что позволяет создать оптимальную систему ($\xi=0{,}707$);

одновременное получение информации о параметрах ξ и ω_0;

относительная простота реализации.

К недостакам метода, присущим также [1÷4], следует отнести необходимость подачи на вход системы автоматического управления пробного сигнала.

В заключение следует отметить, что рассмотренный метод позволяет получать информацию о динамических параметрах ξ и ω_0 и при наличии внешних возмущений (болтанки ЛА). Это в сочетании с получаемыми преимуществами дает возможность создать помехозащищенную и быстродействующую СНС управления полетом летального аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. М. Юсупов. Получение информации об управляемом процессе в самонастраивающихся системах. М., «Энергия», 1966.

2. Приспосабливающиеся автоматические системы. Сб. переводов. под ред. Я. З. Цыпкина, М., ИЛ., 1963.

3. П. И. Чинаев. Самонастраивающиеся системы. М., Машгиз, 1963.

4. Самонастраивающиеся автоматические системы. Труды международного симпозиума (ИФАК). М., «Наука», 1964.