

СТЕНД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ СЕРВОПРИВОДОВ

Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Соболев М.А., Филиппов М.Н., Ян А.П.
Институт автоматизации и электротехники СО РАН. E-mail: kotov@idisys.iae.nsk.su

В работе приведено описание созданного испытательного стенда, предназначенного для получения базовых характеристик и идентификации параметров математического описания сервопривода на основе экспериментальных данных. Представлены результаты экспериментов с приводами фирмы *Hitec* и сравнительный анализ полученных данных.

Введение.

Малогобаритные быстродействующие сервоприводы используются в современных высокоточных системах управления подвижными объектами: рулевыми системами летательных аппаратов, автоматическими манипуляторами, роботами с подвижными элементами конструкции и др.

Для корректного выполнения процедуры синтеза системы управления таких объектов необходима информация о параметрах и структуре математического описания сервопривода. В отличие от предоставляемых производителем численных значений параметров сервопривода адекватная математическая модель позволяет провести анализ управляемости и устойчивости разрабатываемой системы, а также вычислить спектр необходимых характеристик, таких как: время переключки и вращающий момент вала, частотные характеристики под статической и динамической нагрузкой и пр.

В работе [1] решена задача определения спектра необходимых характеристик сервопривода, а также разработки и идентификации полноценного математического описания сервопривода на основе экспериментальных данных, полученных на созданном испытательном стенде.

В докладе представлено описание испытательного стенда, а также результаты экспериментов с приводами фирмы *Hitec* и сравнительный анализ полученных данных, позволяющий сделать вывод об адекватности предложенного математического описания сервоприводов.

Описание сервопривода.

Структурная схема сервопривода, а также уравнения, описывающие процессы в двигателе и в замкнутой системе с П-регулятором приведены в работе [1].

Уравнения замкнутой системы в операторной форме относительно угла поворота выходного вала имеют вид:

$$\varphi(p) = \frac{\varphi_r(p) - r \cdot \frac{K_d}{K_p} \cdot (T_j \cdot p + 1) \cdot M_c}{H_1(p)}, \quad (1)$$

где

$$H_1(p) = T_j \cdot T_m \cdot T_c \cdot p^3 + T_m \cdot T_c \cdot p^2 + T_c \cdot p + 1. \quad (2)$$

Характеристический полином системы $H_1(p)$ определяет все динамические свойства сервопривода. Постоянные времени T_j , T_m , T_c должны определяться на испытательном стенде [1].

Идентификация параметров модели (2) выполнена двумя независимыми способами: с помощью измерения отклика системы на входное воздействие в виде ступенчатой функции и частотным методом.

Описание испытательного стенда.

Помимо идентификации модели зачастую является необходимой информация о точности позиционирования, а также и о предельных нагрузочных и мощностных характеристиках сервопривода в конкретных условиях.

Схема испытательного стенда, позволяющего проводить измерения момента удержания статической или переменной нагрузки на валу, статической ошибки, энергопотребления, амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик привода, представлена на рис. 1.

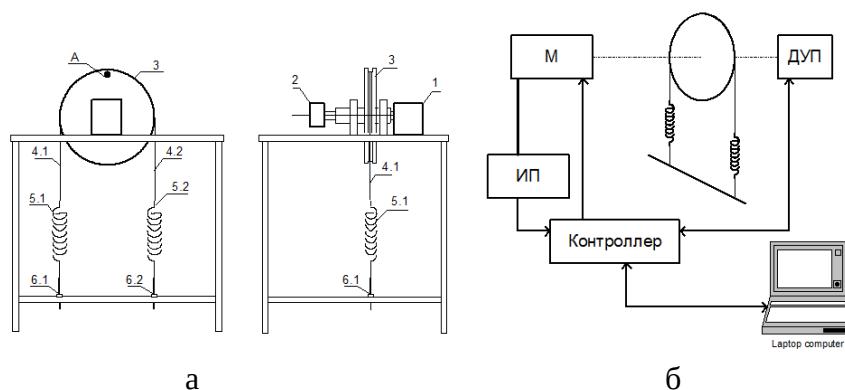


Рис. 1. Испытательный стенд: а – схематическое изображение; б – функциональная схема.

Привод 1 закреплен на неподвижной горизонтальной поверхности и связан посредством несущей втулки с датчиком углового положения 2. Втулка закреплена в двух шарикоподшипниках и обеспечивает передачу вращающего момента на сменный шкив 3. В точке А шкива закреплены тросики 4, позволяющие передавать статический или переменный момент на шкив. Для возможности установки нужного натяжения пружин 5 предусмотрены подстроечные винты 6, рис. 1а.

Функциональная схема испытательного стенда приведена на рис. 1б. С выхода контроллера управляющий сигнал (ШИМ) поступает на привод М. Поворот вала регистрируется датчиком угловых перемещений (ДУП). Также выполняется измерение падения напряжения на токовом шунте, включенном в цепь источника питания (ИП) привода, что позволяет оценить среднее значение тока или энергопотребление в цепи питания привода.

Экспериментальные результаты.

В качестве исследуемых объектов использованы два сервопривода HS-7980TH фирмы *Hitec* [2]. Частота ШИМ равна 200 Гц. Параметры стенда (сменный шкив 3 радиусом 5 см) обеспечивали момент инерции $J = 0.265 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ на валу привода.

Эксперименты на холостом ходу при отсутствии статической нагрузки.

На рис. 2а приведены переходные характеристики (точечная линия) привода и величина потребляемого тока (сплошная линия) в функции времени при подаче ступенчатого входного воздействия $\varphi_r = 30^\circ$. Входное воздействие изменяется скачкообразно в момент времени 3.0 с. Величина полного запаздывания при обработке входного воздействия непостоянна и составляет 15-20 мс.

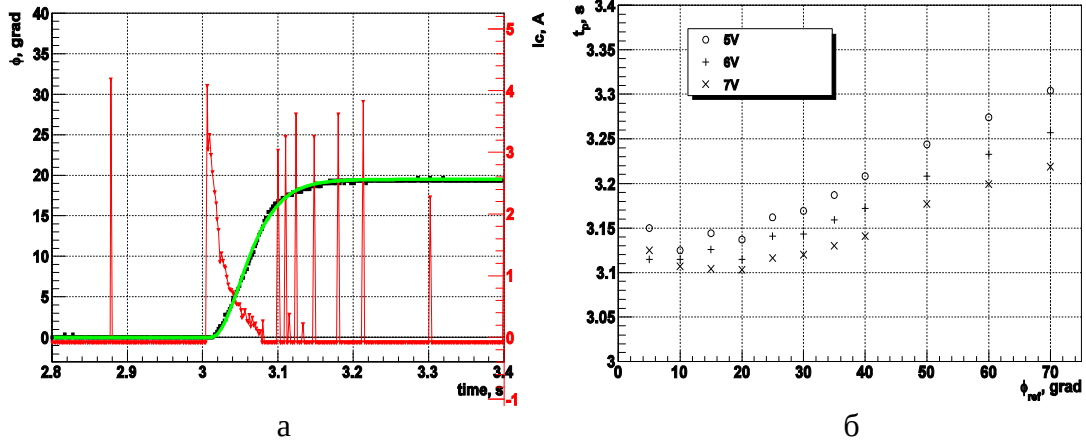


Рис. 2. Переходная характеристика и ток (а), время реального переходного процесса в зависимости от задающего воздействия (б).

На рис. 2а показаны результаты аппроксимации экспериментальной переходной характеристики с использованием передаточной функции на базе полинома $H_1(p)$ для случая $n = 3$ [1]. Для оценки величины запаздывания введен дополнительный параметр T_d , соответствующий простому сдвигу переходной характеристики по времени. Параметр k описывает амплитуду входного воздействия и является масштабирующим множителем переходной характеристики. При этом значения параметров получены из требования наилучшего приближения к реальной переходной характеристике. Значения полученных параметров и величина

$$G^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_{\text{exp}}(t_i) - h_{\text{teor}}(t_i))^2,$$

характеризующая отклонение теоретической переходной характеристики h_{teor} от реальной h_{exp} для дискретных моментов времени t_i и для различной величины задающего воздействия, сведены в таблицу 1.

Таблица 1

φ_r	k	$t_{\text{ин}}$	T_d	G^2
5.	4.85	3.155	3.000	0.051
10.	9.55	3.130	3.000	0.054
15.	14.74	3.146	3.002	0.056
20.	19.50	3.145	3.007	0.039
25.	24.61	3.157	3.017	0.121
30.	29.88	3.172	3.025	0.633
35.	34.80	3.187	3.025	2.735
40.	40.07	3.206	3.025	7.572

Частотная передаточная функция и частотные характеристики.

Для экспериментального получения частотной передаточной функции на вход исследуемого динамического объекта подавалось гармоническое воздействие следующих угловых частот:

$\omega_i = \{0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 15.0, 17.0, 20.0, 22.0, 25.0, 27.0, 30.0, 35.0, 40.0, 45.0, 50.0, 55.0, 60.0, 65.0, 70.0, 75.0, 80.0, 85.0, 90.0, 95.0, 100.0\}$ рад/с.

Амплитуда входного сигнала изменялась от -20° до 20° . На рис. 3 приведены полученные по выражениям (17) АЧХ и ФЧХ (сплошная кривая) совместно с

реальными характеристиками (пунктирная кривая), в зависимости от линейной частоты $f = \omega/(2\cdot\pi)$. Ось абсцисс на рис. 3 имеет логарифмический масштаб.

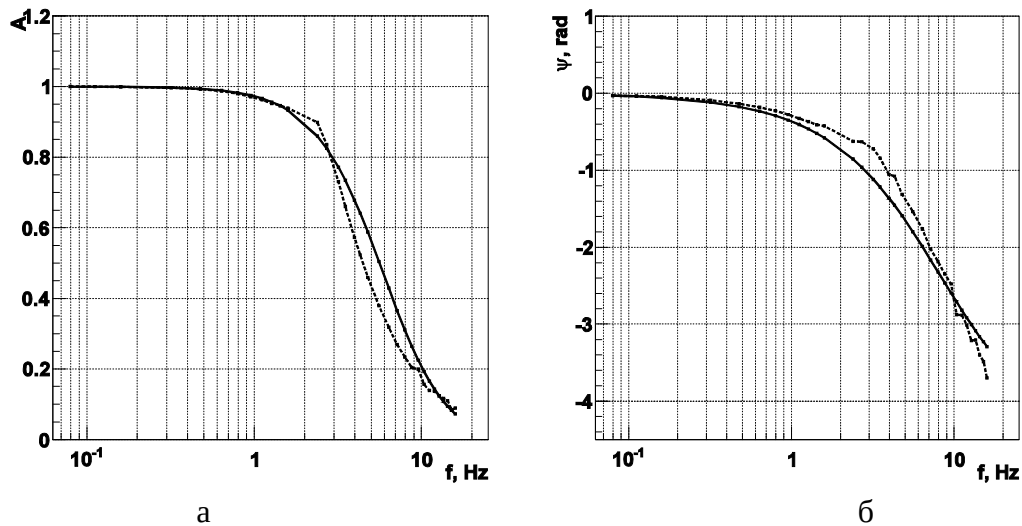


Рис. 3. АЧХ (а) и ФЧХ (б) в зависимости от линейной частоты (на холостом ходу)

Удержание статической нагрузки.

После установления требуемого положения вала в режиме холостого хода привод нагружался различными весами, обеспечивавшими статический момент M_c на валу до 21 кг·см.

На рис. 4 приведена вычисленная статическая ошибка углового положения вала для различной статической нагрузки на валу привода в точках:

$M_c = \{0.0, 3.5, 6.0, 8.5, 11.0, 13.5, 16.0, 18.5, 21.0\}$ кг·см.

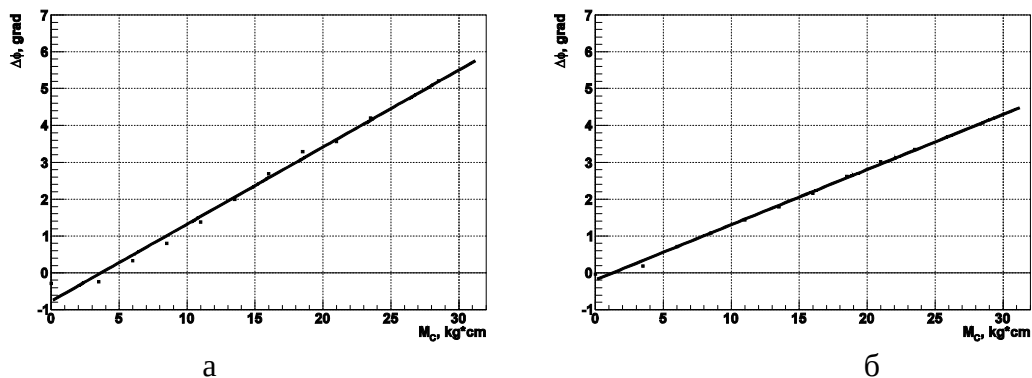


Рис. 4. Статическая ошибка углового положения вала при различной нагрузке:
а – привод 1, б – привод 2

Зависимость угловой ошибки от момента M_c удовлетворительно описывается линейным приближением (сплошная кривая).

После каждого измерения под нагрузкой проводилось измерение без нагрузки для проверки стабильности в удержании заданного положения угла приводом, отсутствия механических повреждений, стабильности показаний ДУП. Стабильность заданного положения угла составила 0.6° .

Переменная нагрузка.

Для обеспечения переменного момента M_c , зависящего от угла поворота вала, шкив 3 станда соединялся с пружинами 5. Каждая пружина предварительно откалибрована посредством натяжения через шкив эталонными грузами и регистрацией показаний ДУП. В процессе калибровки привод отсоединен от несущей втулки. Использованные пружины имеют одинаковый коэффициент жесткости равный 263.15 Н/м. Линейный ход пружин обеспечивается в диапазоне нагрузки от 13.5 кг·см до 28.5 кг·см.

Дальнейшая установка натяжения пружин с помощью подстроечных винтов 6 в середину этого диапазона обеспечивает диапазон возможного поворота вала $\pm 30^\circ$ и изменение усилия на валу от -15 кг·см до 15 кг·см согласно выражению:

$$M_c = \alpha \cdot \varphi, \quad (20)$$

где $\alpha = 0.5 \text{ кг}\cdot\text{см}/1^\circ$.

Вычисленные параметры переходной характеристики или передаточной функции (12), а также величина статической ошибки углового положения вала соответствуют полученным выше.

Заключение.

Представлено описание созданного испытательного станда, позволяющего, в соответствии с предложенными ранее методами, провести идентификацию требуемых параметров сервоприводов. Результаты экспериментов с приводами фирмы *Hitec* показали, что при относительно небольших отклонениях выходного вала от положения равновесия правомерно использовать в качестве описания линейную модель. При этом величина среднеквадратического отклонение между моделью и экспериментальными данными составила 5%.

Представленные в работе математическая модель сервопривода и испытательный стенд нашли применение при создании модели летательного аппарата.

Список литературы

1. К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев М.Н. Филиппов, А.П. Ян. Разработка и идентификация модели сервопривода на основе экспериментальных данных // Автометрия, 2013. [В печати].
2. Продукция фирмы *Hitec* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hitecrnd.com/products/servos/digital/premium-digital/hs-7955tg.html>. Загл. с экрана.