



ИДЕНТИФИКАЦИЯ И НАСТРОЙКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ОШИБОК

И. П. Тарасов¹, Н. В. Буров¹, А. Ю. Пищалов²

¹ АО «Ленинградские Лазерные Системы», Санкт-Петербург, Россия

² Standa Ltd, Вильнюс, Литва

В областях производства, где речь идет о микро- и нанометровых значениях (лазерная резка, скрайбирование, литография, голография, 3D-принтинг, аддитивные технологии и т. д.), чрезвычайно важно обеспечить стабильность и повторяемость значений геометрических и динамических ошибок инструментального оборудования в ходе технологического процесса. В частности, основными параметрами, характеризующими качество механических позиционеров, являются: точность, двухсторонняя повторяемость, ошибка отслеживания и время затухания. Для эффективного управления движением и получения точной геометрии изделия необходимо обеспечить высокочастотное селективное векторное управления током и провести селективную калибровку статических ошибок позиционера. В статье проанализирован один из способов уменьшения значений ошибок и повышения качественных параметров позиционера.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ОШИБОК

Работа над динамическими ошибками и оптимизацией параметров управления заключается в четкой идентификации коэффициентов передаточной функции открытой электромеханической системы и селективной адаптации передаточной

Компания «Ленинградские Лазерные Системы» представляет весь спектр продукции Standa на территории РФ и предлагает наиболее выгодные условия поставки продукции, полную техническую поддержку, а также поставку образцов. Для получения дополнительной информации обращайтесь в компанию ЛЛС.

IDENTIFICATION AND ADJUSTMENT OF GEOMETRIC AND DYNAMIC ERRORS

I. P. Tarasov¹, N. V. Burov¹, A. Yu. Pishchalov²

¹ JSC «Leningrad Laser Systems», Sankt-Peterburg, Russia

² Standa Ltd, Vilnius, Lithuania

In the areas of production, where we are talking about micro and nano-meter values, which include laser cutting, scribing, lithography, holography, 3D printing, additive technologies, etc., it is extremely important to ensure the stability and repeatability of geometric and dynamic errors in process time. In particular, the main parameters characterizing the quality of mechanical positioners are: precision, two-way repeatability, tracking error, and decay time. To obtain high-quality motion control and accurate product geometry, it is necessary to provide high-frequency selective current vector control, and to perform a selective calibration of static errors of the positioner. This article analyses one of the ways to reduce errors and improve the quality parameters of the positioner.

DYNAMIC ERROR ANALYSIS

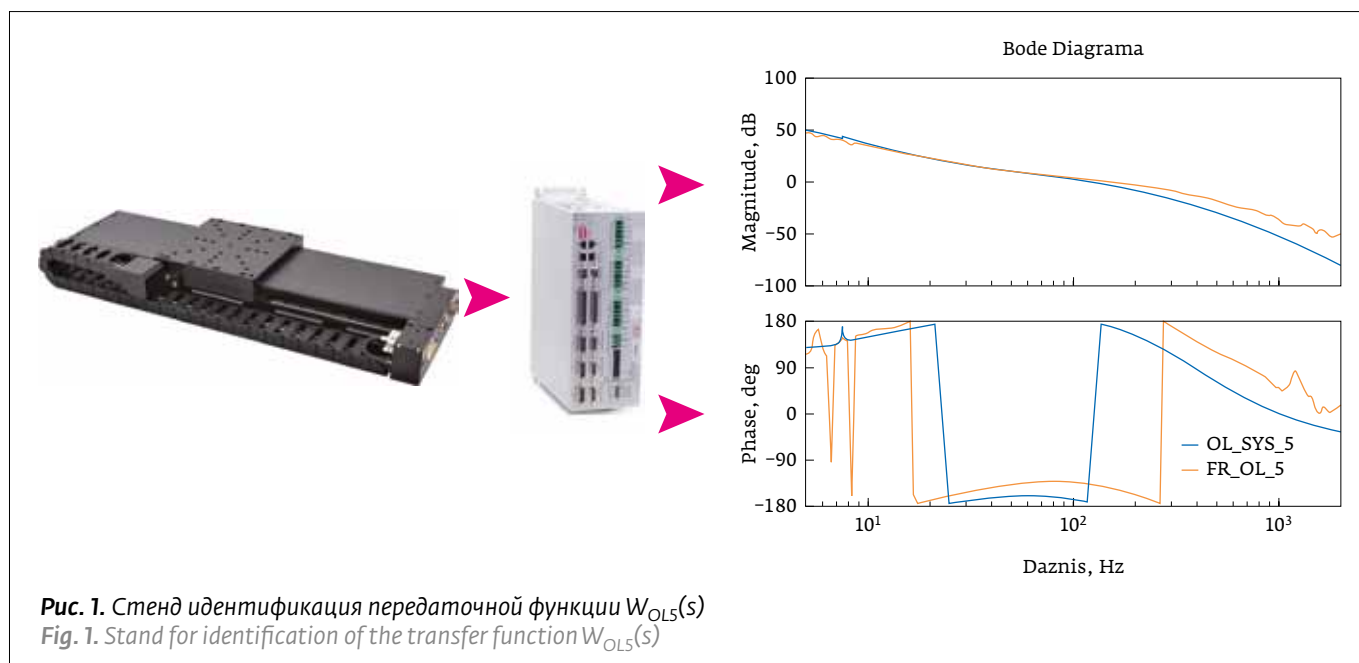
The work on dynamic errors and optimization of control parameters consists in clearly identifying the coefficients of the transfer function of an open electromechanical system and selectively adapting the transfer function to certain characteristics of inertia and displacement modes [1]. The following is the basic equation (1) of an open system, including mechanics, a motor, and a regulator:

$$W_{OLS}(s) = \frac{DP(s)}{CP(s)} = W_s(s) \cdot TPL(s) =$$

$$= \left(\left(K_{VP} \cdot \frac{(s + K_P P) \cdot (s + K_{V1})}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{\omega_c^{-1} s^2 + 2\xi_D \omega_c^{-1} + 1} \right) \cdot \left(\frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \omega_W s + \omega_0^2} \right) \times \right.$$

$$\times \left(\frac{(s/\omega_N)^2 + 2\xi_N (s/\omega_N) + 1}{(s/\omega_D)^2 + 2\xi_D (s/\omega_D) + 1} + A_{FF} S^2 \right) \cdot \left(\frac{K_{IP} s + K_{II}}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_s + R} \right) \times$$

$$\times \frac{1}{m_2 s^2} \left(\frac{(m_1 + m_2) s^2 + C_1 s + K_1}{(m_1) s^2 + C_1 s + K_1} \right) \cdot K_M \cdot K_K \cdot K_E. \quad (1)$$



функции под определенные характеристики инерции и режимов перемещения [1]. Основное уравнение передаточной функции $W_{OL5}(s)$ открытой системы, включающей механику, мотор и регулятор имеет вид:

$$\begin{aligned}
 W_{OL5}(s) &= \frac{DP(s)}{CP(s)} = W_s(s) \cdot TPL(s) = \\
 &= \left(\left(K_{VP} \cdot \frac{(s + K_p P) \cdot (s + K_{V1})}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{\omega_c^{-1} s^2 + 2\xi_D \omega_c^{-1} + 1} \right) \cdot \left(\frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \omega_w s + \omega_0^2} \right) \times \right. \\
 &\times \left. \left(\frac{(s/\omega_N)^2 + 2\xi_N(s/\omega_N) + 1}{(s/\omega_D)^2 + 2\xi_D(s/\omega_D) + 1} \right) + A_{FF} S^2 \right) \cdot \left(\frac{K_{IP} s + K_{II}}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_s + R} \right) \times \\
 &\times \frac{1}{m_2 s^2} \left(\frac{(m_1 + m_2) s^2 + C_1 s + K_1}{(m_1) s^2 + C_1 s + K_1} \right) \cdot K_M \cdot K_K \cdot K_E. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Уравнение (1) характеризует полную архитектуру позиционера (мотор, механические составляющие) и управления (цифровых фильтров, PID регуляторов). Для идентификации передаточной функции $W_{OL5}(s)$ используется стенд (рис. 1), который построен на основе моторизированного позиционера Standa 8MTL1401-300-LEn1-XXX (технические параметры приведены в табл.).

При первичной идентификации исследуемой системы видно, что динамическая ошибка системы соответствует $\sim 10^{-1}$ мм (рис. 2а) во время затухания ~ 180 мс. После настройки регулятора и адаптации передаточной функции $W_{OL5}(s)$ ошибка уменьшилась практически в 10 раз, то есть до $\sim 10^{-2}$ мм (рис. 2б).

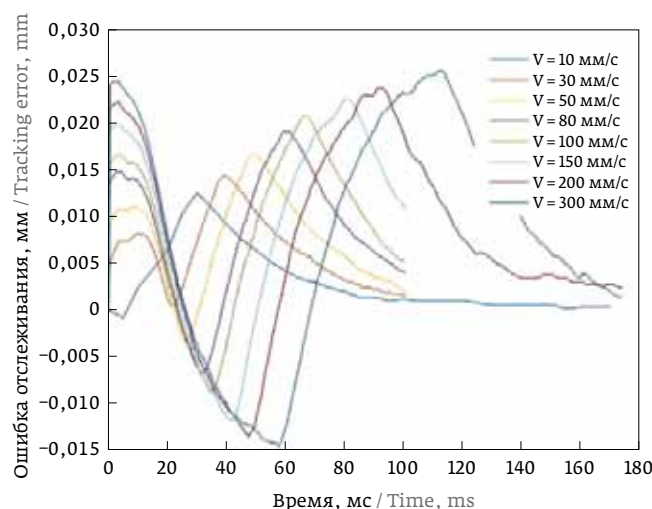
The equation (1) characterizes the complete architecture of the positioner (motor, mechanical components) and control (digital filters, PID regulators).

To identify the transfer function (1), the following stand is used (Fig. 1), which is based on the motorized positioner Standa 8MTL1401-300-LEn1-XXX.

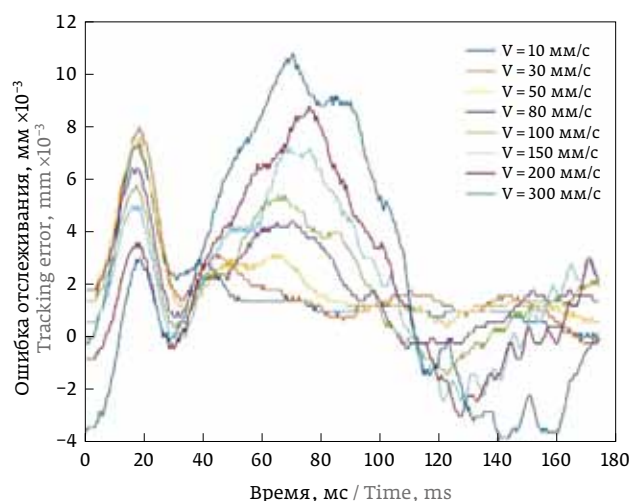
During the primary identification of the system, it can be seen that the dynamic error of the system corresponds to $\sim 10^{-1}$ mm (Fig. 2a) during the decay time of ~ 180 ms. After adjusting the regulator and adapting the transfer function $W_{OL5}(s)$, the error decreased almost by 10 times, i. e., to $\sim 10^{-2}$ mm (Fig. 2b).

It is important to note that the exact identification of the $W_{OL5}(s)$ transfer function and its selective tuning influence the two-way repeatability [2,3]. The two-way repeatability can be measured by an external laser interferometer and, after professional tuning, can correspond to the system resolution (Fig. 3).

“Leningrad Laser Systems” represents the whole range of Standa products in the territory of the Russian Federation and offers the most favourable conditions for the delivery of products, full technical support, as well as the delivery of samples. For more information, contact “LLS”.



a)



b)

Рис. 2. Ошибка отслеживания при разном состоянии регулятора: а) ошибка отслеживания до настройки $W_{OL5}(s)$; б) Ошибка отслеживания после настройки $W_{OL5}(s)$

Fig. 2. Tracking error with different states of the regulator: а) before setting up $W_{OL5}(s)$; б) after setting up $W_{OL5}(s)$

Важно отметить, что на двустороннюю повторяемость влияют точная идентификация передаточной функции $W_{OL5}(s)$ и ее селективная настройка [2, 3]. Двухсторонняя повторяемость измеряется внешним лазерным интерферометром и после профессиональной настройки может соответствовать разрешению системы (рис. 3).

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ (НЕТОЧНОСТИ) СИСТЕМЫ

После того как контур, воспроизводимый механической системой, становится стабильным во времени, а также имеет высокую повторяемость, необходимо провести настройку статических ошибок. Статические ошибки (точность) зависят от погреш-

ANALYSIS OF STATIC ERRORS (INACCURACIES) OF THE SYSTEM

After the contour reproduced by the mechanical system becomes stable over time and also has a high repeatability, it is necessary to adjust the static errors. Static errors (precision) depend on the quality (tolerances) of parts and the assembly process, and do not depend on the dynamics of the system. In order to compensate for the inprecision of the system, it is necessary to calibrate the straight line in the case of movement along one axis X, or the calibration matrix in the case of movement in the XY plane.

The following is an example of using an external measuring system (Fig. 4) – a laser interferometer that

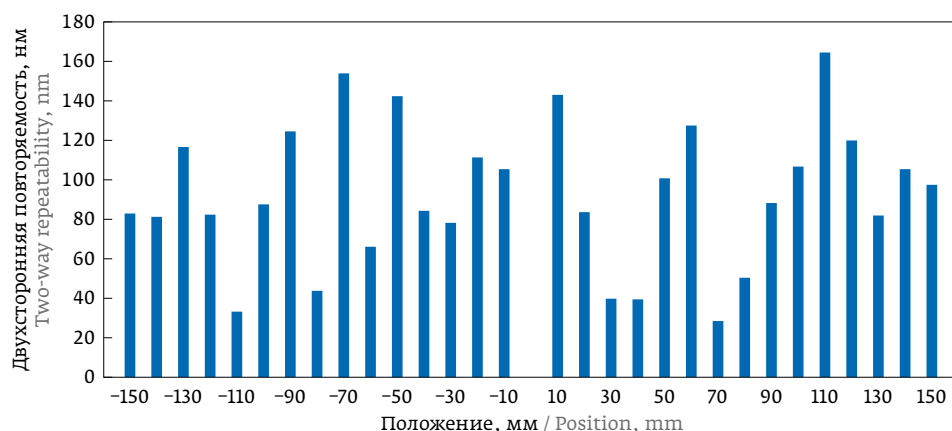


Рис. 3. Двухсторонняя повторяемость после настройки $W_{OL5}(s)$
Fig. 3. Two-way repeatability after setting up $W_{OL5}(s)$

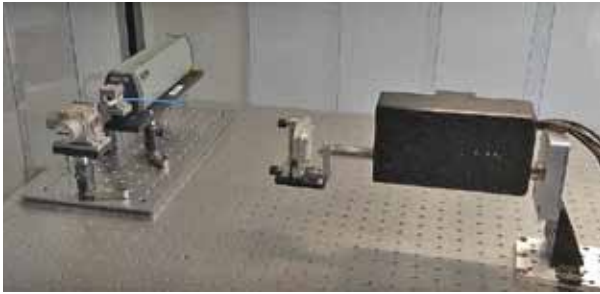


Рис. 4. Пример калибровочного стенда линейной подвижки
Fig. 4. Example of linear motion calibration stand

ности изготовления (допусков) деталей и качества сборочного процесса и не зависят от динамики системы. Для того чтобы компенсировать неточность системы, необходимо иметь калибровочную прямую (в случае движения по одной оси X), либо калибровочную матрицу (в случае движения в плоскости XY).

Представим пример использования внешней измерительной системы (рис. 4) – лазерный интерферометр, который позволяет минимизировать величину статической ошибки от $17 \cdot 10^{-3}$ мм до $<10^{-3}$ мм (рис. 5).

Параметры системы 8MTL120XY

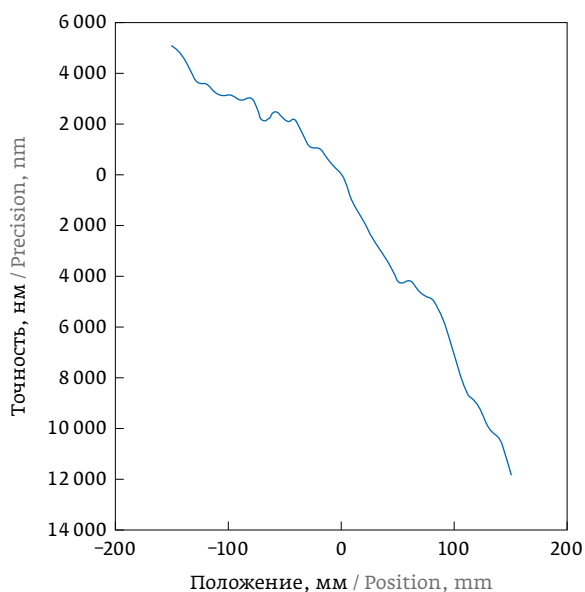
Parameters of system 8MTL120XY

Модель позиционера Positioner model	8MTL1401-300-LEn1-200
Тип энкодера Encoder type	Оптический, цифровой (RS-422) Optical, digital (RS-422)
Разрешение энкодера Encoder resolution	200 нм 200 nm

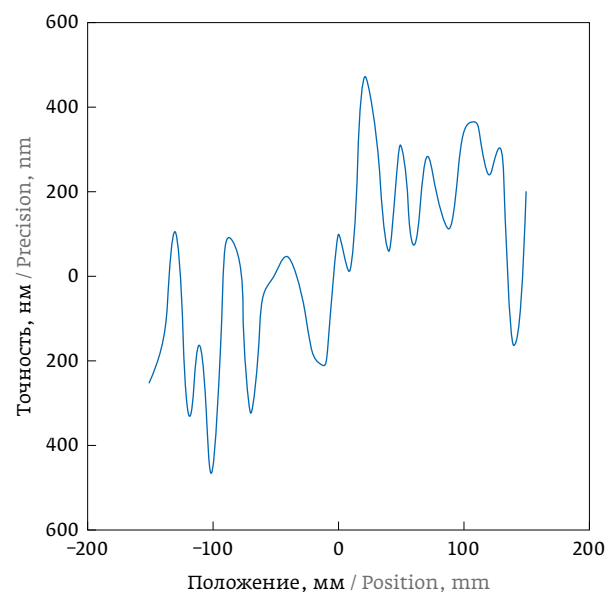
minimizes the static error from $17 \cdot 10^{-3}$ mm to $<10^{-3}$ mm (Fig. 5).

DESIGN FEATURES OF THE MOTORIZED POSITIONER USED TO IDENTIFY THE TRANSFER FUNCTION

Standa motorized positioner series 8MTL1401-300-LEn1-200 is based on three-phase linear servo technology (Fig. 6). Direct drive allows the user



a)



b)

Рис. 5. Точность 8MTL1401-300-LEn1-200: а) перед калибровкой; б) после калибровки
Fig. 5. Precision of 8MTL1401-300-LEn1-200: а) before calibration; б) after calibration

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОТОРИЗИРОВАННОГО ПОЗИЦИОНЕРА, ИСПОЛЪЗУЕМОГО ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Моторизованный позиционер компании Standa серии 8MTL1401-300-LEn1-200 (рис. 6) основан на технологии трехфазного линейного сервопривода. Прямой привод позволяет пользователю осуществлять движение с нулевым люфтом с высокой точностью, повторяемостью и низким коэффициентом трения.

В качестве системы обратной связи используется линейный бесконтактный оптический энкодер, обеспечивающий прямой контроль перемещения с субнанометровым разрешением движения. Естественно состаренный алюминиевый сплав гарантирует высокую температурную стабильность и превосходную длительную кинематику без дрейфа направляющей системы [4].

Устройство обладает следующими особенностями:

- Сверхпрецизионное движение;
- Диапазон перемещения: 300 мм;
- Тип энкодера: бесконтактный, оптический;
- Разрешение энкодера: 200 нм;
- Высокая точность линейных направляющих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество системы управления зависит от ее точности. Анализ параметров подвижки показал, что подбор оптимальной архитектуры регулятора, а также его селективная настройка позволяет достичь уровня динамической ошибки до нескольких микрометров, а значение времени затухания становится равным 100–200 мс; селективная настройка динамической системы обеспечивает высокую двухстороннюю повторяемость, соответствующую значениям разрешения энкодера. Также в результате опытов была установлена необходимость калибровки статической ошибки интерферометром, что позволило достигнуть абсолютной точности системы до $<10^{-3}$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 230-2:1997. Test of machine tools. Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes.
2. ГОСТ 27843–2006. Испытания станков. Определение точности и повторяемости позиционирования осей с числовым программным управлением. 2008.
3. Chen C. S. The Feedforward Friction Compensation of Linear Motor Using Genetic Learning Algorithm. *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea. 2008; July 6–11: 15696–15701.
4. Dynamic Error Compensation. Application Note. ACS Motion Control Inc. 2018.
4. Standa motorized positioner. URL: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=596&prod=Direct-Drive-Linear-Translation-Stage (appeal date: 04.01.2019)



Рис. 6. Моторизованный позиционер серии 8MTL1401-300-LEn1-200 [4]

Fig. 6. Motorized positioner Series 8MTL1401-300-LEn1-200 [4]

to move with zero play with high precision, repeatability and low friction coefficient.

As a feedback system, a linear contactless optical encoder is used, which provides direct motion control with subnanometer motion resolution. Naturally aged aluminum alloy guarantees high temperature stability and excellent long-term kinematics without a drift of the guide system [4].

The device has the following features:

- Super precision movement;
- Range of movement: 300mm;
- Encoder type: non-contact, optical;
- Encoder resolution: 200 nm;
- High-precision linear guides;

CONCLUSION

The quality of the control system depends on its precision.

The analysis of the parameters of the shift showed that the selection of the optimal architecture of the regulator, as well as its selective adjustment allows to achieve the level of dynamic error up to several micrometers, and the value of the decay time becomes equal to 100–200 ms; selective tuning of a dynamic system provides high two-way repeatability corresponding to the encoder resolution values. Also, as a result of experiments, the need for calibrating the static error with an interferometer was established, which made it possible to achieve the absolute precision of the system up to $<10^{-3}$ mm.