



Спектральный анализ временного изменения скорости как подход к определению свойств систем позиционирования

О. С. Большаков, А. В. Кирсанов, к. т. н.,
В. В. Чернов, к. ф. - м. н.,
Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН),
Нижний Новгород, Россия

В работе описан способ контроля мгновенной скорости перемещаемых элементов систем позиционирования. Показано, что вклад в изменение скорости вносят различные внутренние или внешние источники (двигатели, передачи, каретки и т. п.). Приводится сравнение нескольких типов приводов конкретной системы, в том числе исследован случай резкого уменьшения скорости – дефекта системы типа некритического «заедания», в котором происходит уменьшение амплитуды скорости виброкомпонент до нуля. Разработанный способ представляет интерес для контроля возникновения и развития дефектов систем позиционирования в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: системы позиционирования, рост кристаллов группы KDP – DKDP

Статья получена: 13.01.2020

Статья принята к публикации: 12.02.2020

ВВЕДЕНИЕ

Неравномерность скорости позиционирования или остановка подачи в экспериментах и технологических процессах приводят к искажению данных или к падению качества конечного продукта. В ИПФ РАН в последние несколько десятилетий разработана технология роста и обработки кристаллов группы KDP – DKDP, соответственно созданы исследовательские

Spectral Analysis of Temporal Velocity Changes as an Approach to Determining the Properties of Positioning Systems

O. S. Bolshakov, A. V. Kirsanov, Cand. of Eng. Sc., V. V. Chernov, Cand. of Phys.-Math. Sc., Institute of Applied Physics RAS (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russia

We describe a method of monitoring of the instantaneous velocity of moving elements in positioning systems. It is shown that various internal or external sources (engines, transmissions, carriages, etc.) can give contribution into the velocity variation. A comparison of several drives is given, including the case of a sharp velocity reduction, namely, the defect of non-critical “jamming” when the amplitude of the vibration velocity components decreases to zero. The developed method is of interest for monitoring the occurrence and development of defects in positioning systems during its operation.

Keywords: positioning systems, growing processing KDP – DKDP crystals

Received: 13.01.2020

Accepted: 12.02.2020

INTRODUCTION

Roughness of the positioning speed or feed stopping in experiments and technological processes leads to data distortion or to reduction in the quality of the final product. In the last few decades, IAP RAS has developed a technology for growing and processing KDP – DKDP crystals, and accordingly, research facilities have been created to performed a number of experiments on developing technologies for growing crystals and its coating [1,2]. Velocity deviations during such processes lead to defects appearance at surfaces of nonlinear crystals. One of the finishing process in the production of water-soluble KDP-DKDP

комплексы для проведения целого ряда экспериментов по отработке технологий роста и покрытия кристаллов [1, 2]. Нарушения скорости в процессе покрытия и обработки нелинейных кристаллов приводят к появлению неравномерности поверхности и покрытия нелинейных кристаллов. Одной из финишных операций изготовления водорастворимых кристаллов группы KDP-DKDP является sole-gel покрытие. Оно выполняет несколько функций. Образующаяся на поверхности кристалла пленка по свойствам близкая к керамике, просветляет поверхность после алмазного микрофрезерования и защищает водорастворимый кристалл от воздействия влаги, присутствующей в атмосферном воздухе. Sole-gel технология покрытия представляет собой равномерный подъем нелинейного элемента из специально подготовленной жидкости. Отклонения скорости при подъеме приводят к неравномерному высыханию защитной плёнки и к последующей неравномерности отражающих и пропускающих свойств нелинейного кристалла. Технической задачей для системы позиционирования в данном случае является перемещение рабочего объекта на участке технологического процесса с постоянной во времени скоростью. Участки разгона и торможения не должны входить в рабочую зону.

ОПИСАНИЕ КОНКРЕТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Исследования в работе проводились применительно к системе позиционирования стэнда покрытия кристаллов – транслятору [3], устроенной по распространенной схеме (см. рис. 1) на коммерчески доступных элементах [4, 5]: на опорной плите 1 расположены два рельса HIWIN20. По рельсам 2 перемещаются четыре каретки HGW20CC 3, на которых размещён предметный стол 4. Приведено сравнение данных измерения скорости трех различных систем реализаций привода и приведён спектральный анализ изменений скорости. Сначала использовалась пара: стальной винт с трапециевидной резьбой с шагом 4 мм/оборот и капролоновая гайка – реализация 1. В качестве исполнительного механизма использовался шаговый двигатель (ШД) стандарта NEMA23. Поскольку скорость технологического процесса сравнительно малая (подача 1,6–1,65 мм/с), между ШД и валом установлен понижающий редуктор 10:1. В системе управления для плавной работы были использованы деление шага на 32 (микростеппинг) и программное подавление резонансов ШД с нагрузкой. Контроль положения обеспечивался с помощью оптической линейки DC-11 [5]. Скорость записывается специальным контроллером «Speedometer»

crystals is the sole-gel coating. It has several functions. First, the film formed on the surface of the crystal has properties similar to those of ceramics, which bleaches the surface after diamond micro-milling and, second, it protects the water-soluble crystal from the influence of moisture presenting in the atmospheric air. The sole-gel coating technology realizes in the process of a uniform lifting of a non-linear element from a specially prepared liquid. Velocity deviations during such process lead to non-uniform drying of the protective film and subsequent non-uniformity of reflection and transmission properties of the nonlinear crystal. Correspondingly, the technical task arises for moving a sample in the processing area with a constant velocity over time. Acceleration and deceleration areas should not be included in the processing area.

DESCRIPTION OF THE SPECIFIC IMPLEMENTATION OF THE POSITIONING SYSTEM

In this work, we investigated the positioning system of the crystal coating, namely, a translation stage [3], assembled according to a common scheme (see Fig. 1) based on commercially available elements [4, 5] including two HIWIN20 rails which are located on the base plate 1. On rails 2, four carriages 3 are moved, on which the object table 4 is placed. A comparison of velocities measurement data for three different drive implementation systems was carried out based on a spectral analysis of velocities variations. First, pair of steel screw with a trapezoidal thread with a pitch of 4 mm per revolution and a caprolon nut (realization 1) was used. A stepper motor (SM) of the NEMA23 standard was used as an actuator. Since the velocity of the process is relatively low (feedrate of 1.6–1.65 mm/s), a 10:1 reduction gear is installed between the stepper motor and the shaft. In the control system step division by 32 (microstepping) and software suppression of resonances of the SM with load were used for smooth operation. Position control was provided using the Ditron optical linear glass scale DC-11 [5]. The velocity is recorded by a special “Speedometer” controller with the appropriate software. After a certain amount of experimental testing in the system described above, there was some wear and, accordingly, a backlash in the shaft-nut friction pair. This was the reason for replacing the sliding friction pair of the lead screw-nut with a ball-screw transmission (realization 2) with some design adjustments to increase stability of velocity. Separately, a direct drive system was tested as a drive on the same rails and carriage supports (realization 3). A commercially

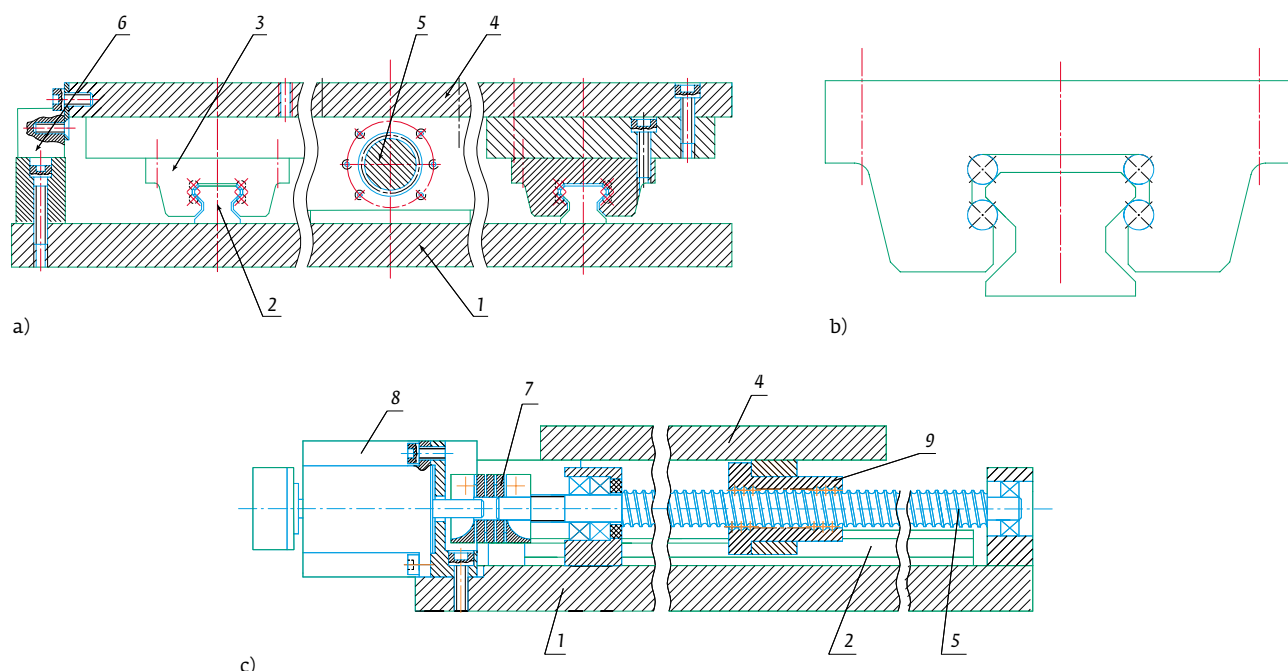


Рис. 1. Кинематическая схема системы позиционирования (а) и (с), увеличено сечение каретки (б). На рисунке обозначено цифрами: 1 – основание, 2 – рельсы, 3 – каретки-опоры, 4 – предметный стол, 5 – ходовой вал, 6 – оптическая линейка, 7 – гибкая муфта, 8 – шаговый двигатель, 9 – гайка ШВП.

Fig. 1. Kinematic diagram of a positioning system (a) and (c), enlarged carriage (b): 1 – base, 2 – rails, 3 – carriages, 4 – subject table, 5 – running shaft, 6 – optical linear scale, 7 – flexible coupling, 8 – stepper motor, 9 – ballscrews nut.

с соответствующим программным обеспечением. После определенного количества экспериментальной отработки в описанной выше системе появился некоторый износ и соответственно люфт в паре трения: вал-гайка. Это послужило поводом для замены пары трения скольжения: ходовой винт – гайка на шарико-винтовую передачу (ШВП) – реализация 2 с некоторой корректировкой конструкции для увеличения стабильности скорости. Отдельно был опробован в качестве привода линейный шаговый двигатель (ЛШД) на тех же рельсах и каретках-опорах – реализация 3. Коммерчески доступная система позиционирования – транслятор с использованием технологии ЛШД представлен в [6].

ОПИСАНИЕ КОНТРОЛЛЕРА «SPEEDOMETER»

Для анализа данных с оптической линейки разработан микроконтроллер «Speedometer» на основе микропроцессора ATmega328 с соответствующим программным обеспечением [7]. В микроконтроллере «Speedometer» собственный кварцевый генератор частоты формирует своё, независимое от компьютерных прерываний, время. С определенной выбранной частотой F микроконтроллер опрашивает и записывает в буфер значение координаты

available positioning direct drive system is presented in [6].

DESCRIPTION OF THE “SPEEDOMETER” CONTROLLER

To analyze data from the optical scale, a speedometer microcontroller based on the ATmega328 microprocessor with the appropriate software has been developed [7]. In the Speedometer microcontroller, its own quartz frequency generator forms its own timescale, independent of computer interrupts. With certain selected frequency F , the microcontroller polls and writes to the buffer the coordinate value from the optical scale for further data transfer via the USB interface to the computer, in which the Speedometer software unit records the time and coordinate of the moving part in a “csv” file for further analysis. The recording frequency F can vary widely up to 10 000 times per second (10 kHz), which, according to Kotelnikov’s theorem [8], allows analyzing the spectrum up to 5000 Hz. The amount of movement data and velocity is huge even for relatively small displacement, but due to the rapid development of computer technology, arrays of millions of rows can be completely processed

с оптической линейки для дальнейшей передачи данных по интерфейсу USB в компьютер, в котором программный блок «Speedometer» записывает время и координату подвижной части в файл формата csv для дальнейшего анализа. Частота записи F может варьироваться в широких пределах до 10 000 раз в секунду (10 кГц), что, по теореме Котельникова [8], позволяет анализировать спектр до 5000 Гц. Количество данных перемещения и скорости для сравнительно небольших ходов огромны, но в связи с бурным развитием вычислительной техники массивы в миллионы строк вполне обрабатываются математическими программами (MATLAB, MathCAD, ORIGIN и др.). Из опыта работы с механическими системами видно, что основные резонансы механических систем ниже 200 Гц, но в области 300–900 Гц находится рабочая область частоты ШД с его резонансами, которые полезно контролировать. Высокая частота записи координат и скоростей $F=10$ кГц является излишней и в то же время приводит к существенному увеличению обрабатываемого массива. Поэтому была выбрана частота записи $F=2$ кГц, т. е. один раз в 500 мкс. Соответственно анализируется спектр скорости до 1 кГц. Применялись линейки серии DC-11 разной длины. У данной серии линеек дискретизация координаты 1 μ . Следовательно, дискретизация данных для скорости $\delta v = \pm 2$ мм/с.

Для визуализации скорости необходимо её усреднить по определенному окну. Рассмотрев несколько вариантов размера окна усреднения, было выбрано окно усреднения по 500 точкам или за 0,25 с при выбранной нами частоте записи. При этом начало записи и окончание при остановке движения по 0,25 с могут отражаться некорректно при усреднении, поэтому их, как и разгон с торможением, не

by mathematical programs (MATLAB, MathCAD, ORIGIN, etc.). Experience of operation with mechanical systems shows that the main resonances of the mechanical system is located below 200 Hz. However the frequency of the stepper motor with its resonances are in the range of 300–600 Hz, which is useful to monitoring. Thus, the high frequency of recording coordinates and velocities $F=10$ kHz is unnecessary, and, besides, it leads to a significant increase in the processed array. Therefore, the recording frequency $F=2$ kHz was chosen, i. e. one measurement every 500 ms. Accordingly, the velocity variation spectrum up to 1 kHz was analyzed. For measurements, DC-11 series scales of different lengths were used. This series of scales has a 1 μ coordinate sampling. Hence, data sampling for the velocity was $\delta v = \pm 2$ mm/s.

To visualize the velocity temporal dependence, it should be averaged over some window. After considering several options for the size of the averaging window, we selected such window for 500 points or 0.25 seconds at the recording frequency. The recording start and finish can be recorded incorrect for the motion stop of 0.25 s. Therefore these points as well as acceleration and deceleration areas were not taken into consideration. Choosing the recording range more than technologically necessary, it is possible to resolve this problem programmatically, averaging either on the next 500 points for the motion start or on the previous points for the finish with a certain time of stitching in the middle of motion.

DATA ANALYSIS

Figure 2 shows the temporal dependence of the instantaneous velocity of the object table of the



ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ УЗЛЫ (более 1000 видов)
ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
АНТРЕСОЛИ И ПОЛКИ ДЛЯ ПРИБОРОВ

МЫ ИЗГОТАВЛИВАЕМ РАЗЛИЧНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ШИРОКОГО КЛАССА ОПТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ:

- устройства для дистанционного управления оптическими элементами лазерной установки
- устройства для прецизионной юстировки оптических элементов
- установочные устройства
- угловые столики
- системы прецизионного вращения
- системы линейного перемещения
- системы управления шаговыми двигателями
- вакуумные пространственные фильтры для мощных лазерных комплексов
- вакуумная техника

www.optomech.ru
 тел.: +7 951 918 0914
 e-mail: optomech.nn@gmail.com

берут в рассмотрение, выбирая диапазон записи больше технологически необходимого, хотя можно эту проблему программно устранить, усредняя либо по последующим 500 точкам для начала движения, либо по предыдущим для окончания с определённым моментом их сшивания в середине перемещения.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

На рис. 2 представлена зависимость мгновенной скорости предметного стола системы позиционирования (см. рис. 1а) в реализации 1 (ходовой винт с шагом 4 мм на оборот с капролоновой гайкой), нормированной на максимум, от времени для двух диапазонов рассмотрения: на рис. 2а весь технологический процесс от начала до 200-й секунды, на рис. 2б диапазон времени от 10-й до 12-й секунды, т.е. за 2 секунды. На верхнем графике рис. 2а видны два типа колебаний скорости – амплитудная модуляция низкочастотной зависимости с частотой 0,041 Гц с заполнением с частотой 0,413 Гц (частоты легко считаются по представленному на графике времени). На рис. 2б представлен фрагмент предыдущего графика за 2 секунды – с 10-й по 12-ю секунды. При этом зависимость скорости вся изрезана более высокочастотными колебаниями. Можно сделать два вывода:

1. Зависимость средней скорости от времени $v(t)$ носит периодический характер, с периодом $T=S/v_{cp.}$, где $S=4$ мм – шаг резьбы для реализации системы 1, $T \approx 2,42$ с для данной средней скорости $v_{cp.}=1,65$ мм/с;
2. Ближайшее рассмотрение показывает наличие вибрации. Вибрации предметного стола означают, что у системы есть свободный ход и что в системе есть источники вибрации. Свободный ход в механических системах необходим для их нормального функционирования – например в технике принципиально наличие тепловых зазоров.

Выявление разного типа колебаний скорости является предпосылкой для рассмотрения её спек-

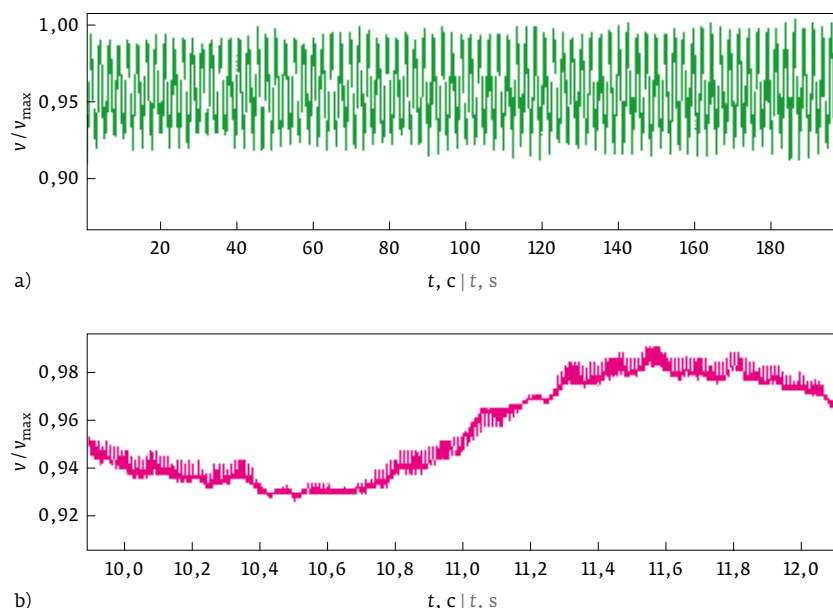


Рис. 2. Зависимость мгновенной скорости позиционирования (нормированная на максимум) от времени для двух выбранных диапазонов по времени, реализация 1 (вал стальной трапецевидный с капролоновой гайкой с шагом 4 мм на оборот): а – диапазон рассмотрения от 0 до 200 секунд; б – диапазон рассмотрения 2 секунды от 10-й до 12-й секунды

Fig. 2. Temporal dependence of instantaneous positioning velocity (normalized to its maximum value) for system realization 1 (steel trapezoidal shaft with caprolon nut, step of 4mm per revolution): а – recording range from 0 to 200th second; б – recording range 2 seconds from 10th to 12th second

positioning system in the realization 1 (lead screw with a pitch of 4mm per revolution with a caprolon nut) normalized to the maximum for two ranges of consideration, including the whole technological process from the beginning to the 200th second (Fig. 2a) and the time range from the 10th to the 12th second (Fig. 2b). In Fig.2a, one can recognized two types of velocity fluctuations including slow amplitude modulation with a frequency of 0.041 Hz and high-frequency modulation with a frequency of 0.413 Hz (the frequencies are easily calculated from the graph). In Fig. 2b, a fragment of the previous graph for 2 seconds (from the 10th to the 12th seconds) are shown. It is seen, that the temporal velocity dependence additionally includes rough more high-frequency fluctuations. Thus, two conclusions can be drawn:

1. The periodical dependence of the average frequency on time $v(t)$ is determined by a period $T=S/v_{cp.}$, where $S=4$ mm is the screw pitch for the system realization 1. For a given average speed $v_{cp.}=1,65$ mm/s, we can find $T \approx 2.42$ s;

тра как в сверхнизких частотах (от 0 до 1 Гц), так и в частотах до 200 Гц.

На рис. 3 представлен спектр, нормированный на максимум спектральной плотности. Он получен в результате Фурье-анализа зависимости скорости от времени на всей длине хода технологического процесса. На рис. 3а показан спектр от 0 до 300 Гц, овалом 1 выделена компонента на частоте 0,413 Гц – частота вращения приводного вала системы позиционирования в реализации 1 для средней скорости технологического процесса $v_{\text{ср.}} = 1,65$ мм/сек и резьбы 4 мм на оборот с редуктором 1:10 между ШД и ходовым валом, показанная на рис 3б. Овалом 2 выделена группа компонент на средней частоте 82,5 Гц, более подробно показанная на рис. 3с. Видно, что спектр дискретный с величиной дискретизации 0,413 Гц. Овалом 3 отмечена компонента спектра на частоте примерно 206 Гц – 1/4 от частоты следования шагов ШД для данной средней скорости 1,65 мм/с. Выше 300 Гц особых выделенных компонент нет, если, с одной стороны, выполнены условия подавления резонансов ШД и нагрузки и, с другой стороны, использовано деление шага (в нашем случае на 32). Большое время записи и соответственно огромное количество точек приводит к возможности рассматривать в спектральной зависимости сверхнизкие частоты. Так, видимые глазом биения скорости на графике рис. 2а с частотой 0,041 Гц представлены в качестве частотной компоненты в спектральной плотности. Компонента с частотой 0,041 Гц возникает как 1/10 от частоты биений ходового вала. Поскольку все колебания скорости для пользователей являются негативным явлением, с которым необходимо бороться, одной из задач анализа скорости и её спектра было идентифицировать все компоненты спектра и определить причины возникновения данного типа колебаний. Достаточно большие отклонения скорости *peak to peak* для реализации 1–6% в начале и 7,4% в конце технологического процесса и появившийся износ послужили причиной появления реализации 2 данной системы позиционирования. Пара трения скольжения: ходовой вал – гайка была заменена на шарико-винтовую передачу (ШВП) с шагом 5 мм/оборот. Поскольку очевидно, что причиной колебаний скорости на частоте вращения ходового винта и причиной разницы этих колебаний в начале и в конце перемещения являются угловые и координатные несоосности ходового винта и приводных механизмов, в следующих реализациях постарались эти дефекты минимизировать.

Рассмотрим получившуюся характеристику скорости и её спектр. На данном графике (см. рис. 4) видно, что отклонения скорости *peak to peak* состав-

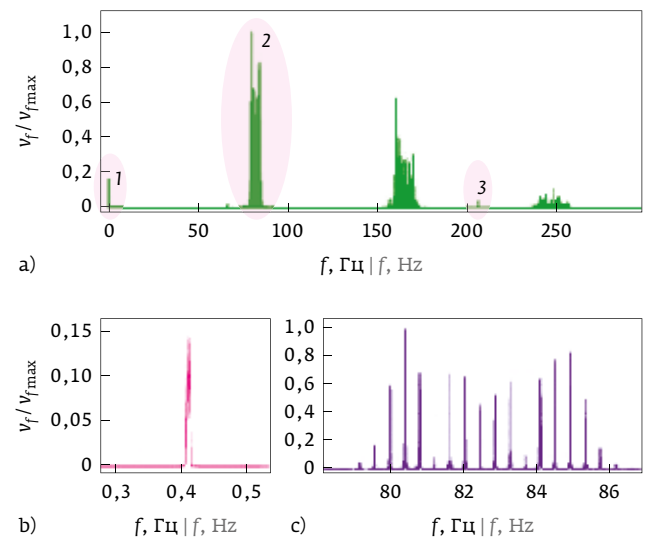


Рис. 3. Спектр скорости позиционирования, реализация 1 с подробным рассмотрением частотных отрезков 1 и 2; а – спектр скорости в диапазоне от 0 до 300 Гц; б – компонента спектра на частоте $f_s = 0,413$ Гц, выделенная на рисунке 3а овалом 1 (частота вращения ходового вала); с – область 79–86 Гц выделенная на рисунке 3а овалом 2 с дискретизацией скорости каждые $f_s = 0,413$ Гц. Овалом 3 на рис. 3а) обозначена компонента спектра на частоте 206 Гц – 1/4 от частоты следования шагов ШД 825 Гц для данной средней скорости 1,65 мм в секунду

Fig. 3. Spectrum of positioning velocity for system realization 1 with a detailed consideration of frequency segments 1 and 2; a) velocity spectrum in the range from 0 to 300 Hz; b) spectrum component at a frequency of 0.413 Hz marked by oval 1 in Fig. 3a (frequency of rotation of the running shaft); c) the 79–86 Hz region marked by oval 2 with discrete components every 0.413 Hz. Oval 3 in Figure 3a) marks the spectrum component at a frequency of 206 Hz corresponding to 1/4 of the frequency of the step motor of 825 Hz for a given average speed of 1.65 mm/sec

2. An additional consideration shows the presence of vibrations. Actually, vibrations of the object table mean that the system has the free stroke and that there are some sources of vibration in the system. Free stroke in mechanical systems is necessary for their normal functioning, for example, the presence of thermal gaps is essential.

Detection of different types of velocity fluctuations can be done based on consideration of the spectrum of its temporal dependence both at ultra-low frequencies (from 0 to 1 Hz) as well as at frequencies up to 200 Hz.

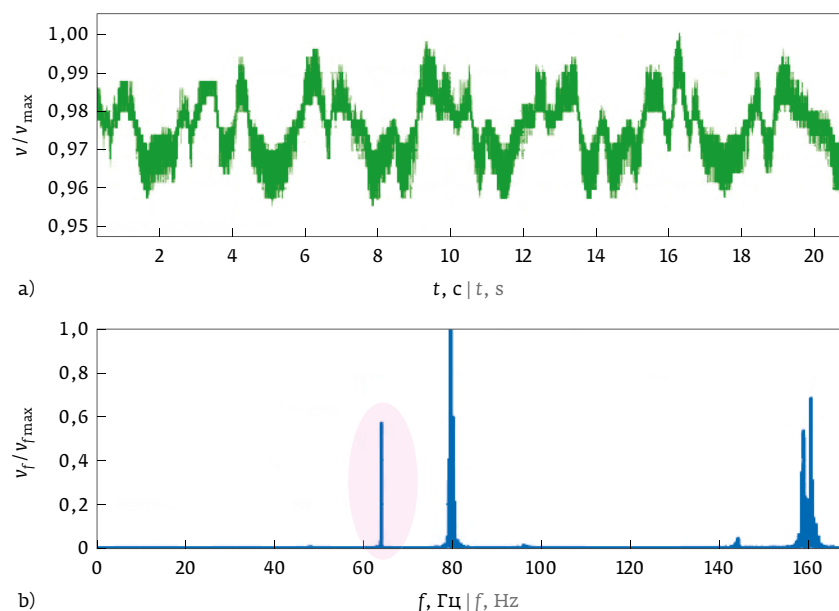


Рис. 4. Скорость за 20 секунд записи на рисунке (а) и её спектр от 0 до частоты 160 Гц для реализации привода 2-ШВП на рисунке (б). Овалом выделена компонента на частоте 64 Гц, возбуждаемая системой вал-гайка-шарики ШВП

Fig. 4. Temporal velocity dependence for recording time of 20 seconds (a) and its spectrum (b) for frequencies from 0 to 160 Hz for the realization 2 (ball screw drive). An oval marks a component at a frequency of 64 Hz, excited by a shaft-nut-ball system

ляют 4%. В спектре, по сравнению со случаем 1, к размытым уширенным компонентам с частотами 80 Гц и 160 Гц добавляется узкая (около 0,07 Гц по 50%) компонента на частоте 64 Гц с интенсивностью, такой же, как и у предыдущих компонент. В области сверхнизких частот присутствует компонента 0,32 Гц (частота вращения – биение основного приводного вала).

Нами был протестирован вариант (см. рис 5) такой же системы позиционирования на тех же направляющих и каретках-опорах с приводом типа линейный шаговый двигатель. В спектре скорости видны те же компоненты с частотами 80 Гц, 160 Гц, а также гармоники 240 Гц и 320 Гц. Девиация скорости в данном случае менее 1%, поэтому её не приводим. Для всех трёх проанализированных реализаций привода перемещения предметного стола можно выделить общие характерные особенности спектров: для скорости около рабочей 1,6 мм/сек есть компоненты со средними частотами, близкими значениям 80, 160, 240 Гц. Кроме того, в случае с ШВП возникает еще одна компонента с частотой 64 Гц. При изменении

The velocity spectrum normalized to the maximum spectral density is shown in Fig. 3. It is obtained as a result of Fourier analysis of the velocity-time dependence over the entire time of the technological process. Figure 3a demonstrate the spectrum from 0 to 300 Hz, while the oval 1 marks the spectral components at a frequency of 0.413 Hz, which corresponds to the frequency of rotation of the drive shaft in the system realization 1 for the processing average velocity of 1.65 mm/s and a the screw pitch of 4mm per revolution with a 1:10 reducer between the stepper motor and the running shaft. This component is presented in more detail in Fig. 3b. The oval 2 highlights a group of components at an average frequency of 82.5 Hz, shown in more detail in Fig. 3c. It can be seen that the spectrum is discrete with a discreteness of 0.413 Hz. The oval 3 marks the spectrum component at a frequency of approximately 206 Hz which is 1/4 of the frequency of the stepper motor steps for this average speed of 1.65

mm/s. There are no selected spectrum components above 300 Hz, if resonances of the stepper motor are suppressed and the step division is used (in our case by 32). The long recording time, and corresponding large number of recording points, makes it possible to consider ultra-low frequencies in the spectral dependence. Thus, the visible velocity beats in Fig.2a with a frequency of 0.041 Hz is represented as a frequency component in the spectral density. A component with a frequency of 0.041 Hz occurs as 1/10 of the frequency of the running shaft beats. Since all velocity fluctuations are a negative phenomenon for users to deal with, the tasks of analyzing the velocity spectrum arises aimed to identification of all spectrum components and determination of the causes of their occurrence.

Sufficiently large velocity deviations for the realization 1 (6% at the beginning and 7.4% at the finish of a technological process) and appeared wear-out caused the development of the realization 2 for this positioning system. In this realization, the sliding friction pair, namely, “running shaft – screw nut” was replaced with a pair of rolling friction, namely, the ball-and-screw unit with a step of 5 mm per revolution. For minimiza-

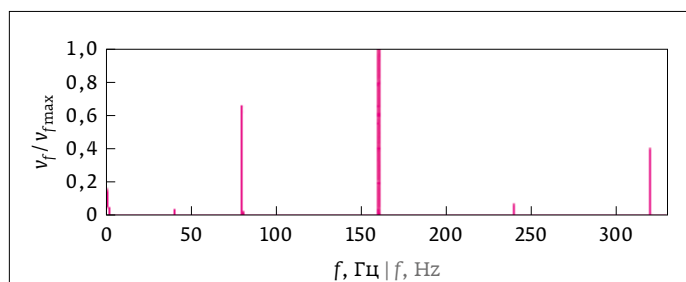


Рис. 5. Спектр для случая линейного шагового двигателя (Direct Drive)

Fig. 5. Velocity spectrum for the case of a linear stepper motor in the realization 3 (Direct Drive System)

заданной скорости средние частоты всех этих компонент изменяются в соответствии с формулами:

$$f_{\text{каетки}} = nAv, \quad (1)$$

$$f_{\text{ШВП}} = 0,8Av, \quad (2)$$

где $n=1,2,3,\dots$ – целое число, $A=50 \text{ [мм}^{-1}\text{]}$ – некий коэффициент, характерный для данного типа опор HIWIN, $v \text{ [мм/с]}$ – скорость предметного стола.

tion of velocity fluctuations, we tried to minimize the defects caused by angular and coordinate misalignment of the spindle and drive mechanisms.

Let us consider the resulting velocity characteristic and its spectrum in Fig.4. One can see that the peak-to-peak velocity deviations are about 4%. In the spectrum, in contrast with the case 1, a narrow (about 0.07 Hz at half maximum) component at the frequency of 64 Hz with the same intensity as the previous components is added to the blurred widened components with frequencies of 80 Hz and 160 Hz. In the area of ultra-low frequencies, there is a component of 0.32 Hz which corresponds to the beat of the main drive shaft.

We tested also similar positioning system (see Fig. 5) which is based on the same rails and support carriages but with linear stepper motor drive (realization 3). One can see that the same components with frequencies of 80 Hz, 160 Hz, and harmonics of 240 Hz and 320 Hz are presented in the velocity spectrum shows. The velocity deviation in this case is less than 1%. Thus, for all three analyzed realizations of the object table movement drive, we can identify common characteristic features of the spectra. For a speed of about 1.6 mm/sec, there are components with average

Средство измерений энергетических и пространственных параметров лазерного излучения СИЭПХ-2
 Свидетельство об утверждении типа RU.C.37.314.B №65349 (рег. №66833-17)
 Опциональная конфигурация Интерактивное программирование



РАЗРАБОТЧИК И ИЗГОТОВИТЕЛЬ ООО "ЛАМЕТ" www.lamet.ru
 125371, Москва, Волоколамское шоссе, 112, к.1, стр.3
 Тел. +7 (495) 490-90-10 E-mail info@lamet.ru

Поскольку скорость меняется, соответственно с формулами (1) и (2) мы имеем механическое частотное уширение спектральных компонент, имеется в виду, что с изменением скорости меняется частота связанных с ней компонент согласно формулам (1) и (2), что видно на спектрах реализаций 1 и 2. В реализации 3 (ЛШД) скорость изменяется меньше, чем на 1%, и соответственно уширение в данном случае не заметно. Источником данных типов колебаний являются системы, состоящие из корпусов каретки и гайки ШВП с одной стороны и рециркулирующих элементов качения – шаров с другой стороны (см. рис. 1б). Элементы качения входят/выходят из нагруженной зоны предварительного натяга с неким ударом, который возбуждает колебания корпуса каретки или гайки ШВП. В некотором смысле это обратная сторона использования систем с предварительным натягом. В процессе эксплуатации системы позиционирования её необходимо обслуживать – смазывать согласно регламенту. Необходимо отметить, что после смазывания элементов, например всех кареток 3 (см. рис. 1), амплитуда возбуждаемых ими колебаний падает и постепенно увеличивается к следующему обслуживанию, поскольку часть смазки неизбежно покидает зону контакта элементов качения. В качестве выводов об использовании данного типа систем позиционирования заметим следующее: очевидно, что привод типа вал-гайка ШВП лучше работает, чем привод на основе пары ходового вала и гайки на трении скольжения. Во всех системах с источником движения на основе двигателей вращения необходимо минимизировать угловые и координатные несоосности ходового вала и системы привода. При этом можно добиться отклонений скорости в таких системах менее 1%, как и в случае привода типа линейного шагового двигателя. Отклонения скорости мене 1% практически не оказывают влияния на технологический процесс.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ

Для проверки возможностей системы Speedometer был проделан некий эксперимент: на предметный стол был установлен вертикальный излучатель. В процессе перемещения он излучал на низкой частоте 66Гц. Геометрия излучателя и системы позиционирования была выбрана таким образом, чтобы основное воздействие излучателя было направлено с направлением перемещения. Система перемещения представляла обычный транслятор (см. рис. 1): две направляющие, на них каретки с рециркулирующими шарами, на них закреплён предметный стол.

frequencies close to 80, 160, and 240 Hz. In addition, in the case of ball-and-screw unit, there is another component with a frequency of 64 Hz. If we change the velocity, the average frequencies of all these components change according to the formulas:

$$f_{\text{carriages}} = nAv, \quad (1)$$

$$f_{\text{ballscrewnut}} = 0.8Av, \quad (2)$$

where $n=1, 2, 3, \dots$ is the harmonic number, $A=50 \text{ [mm}^{-1}\text{]}$ is a coefficient typical for this type of HIWIN carriages, $v \text{ [mm/s]}$ is the velocity of the object table.

Since the velocity changes according to (1), (2), we have a mechanical frequency broadening of the spectral components, i.e. the associated components changes together with the velocity value. It can be seen on the spectra of realizations 1 and 2. In the realization 3, the velocity changes by less than 1% and, correspondingly, the broadening is not noticeable in this case. The source of these types of vibrations are systems consisting of the carriage bodies and balls crew nuts, on the one side, and recirculating rolling elements-balls on the other side (see Fig. 1b). Rolling elements enter/exit the pre-tensioning zone with a certain impact which excites vibrations of the carriage body or ball screw nut. In some sense, this is the downside of using pre-tensioning systems. During the operation of the positioning system, it must be serviced and lubricated according to the regulations. It should be noted that after smearing the elements, for example all the carriages 3 (Fig. 1), the amplitude of the vibrations excited by them decreases and gradually increases for the next service, because the part of the lubricant inevitably leaves the contact zone of the rolling elements. As conclusions about the use of this type of positioning system, it should be noted that, obviously, the drive type shaft-nut ball screw works better than the drive based on a pair of running shaft and nut on sliding friction. In all systems with a motion source based on rotation motors, it is necessary to minimize angular and coordinate misalignments of the drive shaft and the SM. In this case, it is possible to achieve velocity deviations of less than 1%, as in the case of a linear stepper motor type drive. Velocity deviations of less than 1% have almost no effect on the technological process.

INFLUENCE OF EXTERNAL SOURCES

In order to test the capabilities of the Speedometer system, the following experiment was performed. A vertical radiator was installed on the object table. In the process of moving, it radiated at a low frequency

При включении внешнего источника вибрации в спектре скорости возникают несколько новых узких спектральных (менее 1%) компонент – на частоте вибрации источника 66 Гц, на второй 132 Гц и третьей гармонике 198 Гц. Привычные для данной системы на данной скорости компоненты спектра остаются, поскольку источники вибрации никак не связаны друг с другом.

КРАТКОВРЕМЕННЫЕ УМЕНЬШЕНИЯ СКОРОСТИ

В эксплуатации систем позиционирования возникают ситуации, при которых скорость предметного стола кратковременно падает. Пример кратковременного падения скорости представлен на рис. 6. На верхнем рис. 6а представлена нормированная на максимум скорость за 26 секунд перемещения, окружностью отмечен случай кратковременного уменьшения скорости на 5% на 242 секунде записи. Не вдаваясь в рассмотрение причин данного «заклинивания», можно сказать, что система проскочила данный дефект. В данном случае дефект оказался некритическим для системы позиционирования. На нижнем рис. 6б показана подробно скорость в этом случае. На времена T1 и T2 приходятся моменты времени, когда амплитуда виброколебаний скорости равна нулю – именно эти моменты и есть моменты «заклинивания». Такие одноразовые всплески-выбросы сильно искажают – портят спектр скорости в сверхнизких частотах, что можно использовать для диагностики возникновения таких дефектов. Слабые компоненты типа 1/10 частоты вращения приводного вала не видны на их фоне.

of 66 Hz. The geometry of the radiator and positioning system was chosen so that the main impact of the radiator was co-directed with the direction of movement. The translation system represented a conventional translation stage shown in Fig. 1 and includes two guides with carriages and circulating balls. The object table was fixed to them. When the vibration source was switched on, several new narrow spectral components (less than 1%) appear in the velocity spectrum. These frequencies correspond to the source vibration frequency of 66 Hz, at the second and the third harmonics of 132 Hz and of 198 Hz, respectively. The typical for a given velocity spectrum components remain in this system, since the sources of vibration are not related to each other.

SHORT-TERM SPEED DECREASES

During the operation of positioning systems, there are situations in which the velocity of the object table drops fast. An example of a short-term velocity drop is shown in Fig. 6. Figure 6a shows the velocity normalized to its maximum for 26 seconds of movement, the circle indicates the case of a short-term reduction in speed by 5% at the 242s second of recording. Without going into a consideration of the reasons for this “jamming”, we can say that the system missed the defect. In this case, the defect was not critical for the positioning system. Figure 6b shows in detail the velocity in this case. Times T1 and T2 represent the moments when the amplitude of the velocity vibrations is zero, i.e. the moments of jamming. Such one-time bursts strongly distort the velocity spectrum at ultra-low frequencies, which can be used for diagnostics of such defects. Weak

	<p>Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники</p>		<p>Разработка и изготовление тонкопленочных изделий</p>	
	<p>Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»</p>		<p>Разработка технологий формирования тонких пленок</p>	
	<p>Програмное обеспечение и автоматизация</p>		<p>Оптические элементы</p>	
	<p>Изготовление технологических устройств</p>	<p>Напылительный сервис</p>	<p>Сложные и уникальные покрытия</p>	
<p>ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845</p>		<p>www.izovac.com www.izovac-coatings.com</p>		

ВЫВОДЫ

Предложен и реализован новый подход к анализу мгновенной скорости перемещаемых объектов в экспериментах или технологических процессах. Данный подход к спектральному анализу временных изменений скорости позиционируемых элементов позволяет контролировать возникновение и развитие негативного влияния дефектов систем перемещения в процессе эксплуатации. В работе рассмотрен случай применения данного метода анализа скорости для систем линейного перемещения. Однако он может быть более интересен для контроля систем вращения. Вместо сигнала с оптической линейки системой Speedometer можно использовать сигнал углового положения с осевого инкрементального энкодера, например с 1000 отсчетов на оборот, и анализировать угловую скорость. После процедуры усреднения можно наблюдать динамику угловой скорости или провести Фурье-анализ массива данных угловой скорости для рассмотрения спектральной зависимости скорости, в которой проявляются особенности или дефекты механической системы.

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № 0035-2019-0015.

REFERENCES

1. V.I. Bespalov et al. Effective technology for fabricating KDP, DKDP crystals to be used in high-energy lasers. Proc. SPIE Vol.2633(1995), p.732–739.
2. Н. Андреев и др. Производство крупногабаритной оптики из водорастворимых кристаллов // Фотоника, 2007, № 5 с. 34–37. DOI:10.22184/1993-7296. FROS. 2007.5.34.37. N. Andreev et al. Large-size optics made from water-soluble crystals // Photonics, 2007, № 5 p. 34–37. DOI:10.22184/1993-7296. FROS. 2007.5.34.37.
3. <https://www.optomech.ru/> (дата обращения 25.02.2020)
4. https://www.hiwin.com.ru/files/pdf/hiwin.com.ru/linear_guideway/linear_guideway_rg.pdf/ (дата обращения 25.02.2020)
5. <https://www.purelogic.ru/> (дата обращения 25.02.2020)
6. http://www.standa.it/products/catalog/motorised_positioners?item=664 (дата обращения 25.02.2020)
7. Заявка на изобретение RU2019143712 от 25.12.2019. Способ измерения линейной скорости и её неоднородности / Большаков О. С., Кирсанов А. В. Application for invention RU2019143712 from 25.12.2019. Method of measuring linear velocity and its deviations / Bolshakov O. S., Kirsanov A. V.
8. Биккенин Р. Р., Чесноков М. Н. Теория электрической связи. – М.: Академия, 2010. – 329 с. Bikkenin R. R., Chesnokov M. N. Theory of electrical connection. – M.: Akademia, 2010 – 329p.

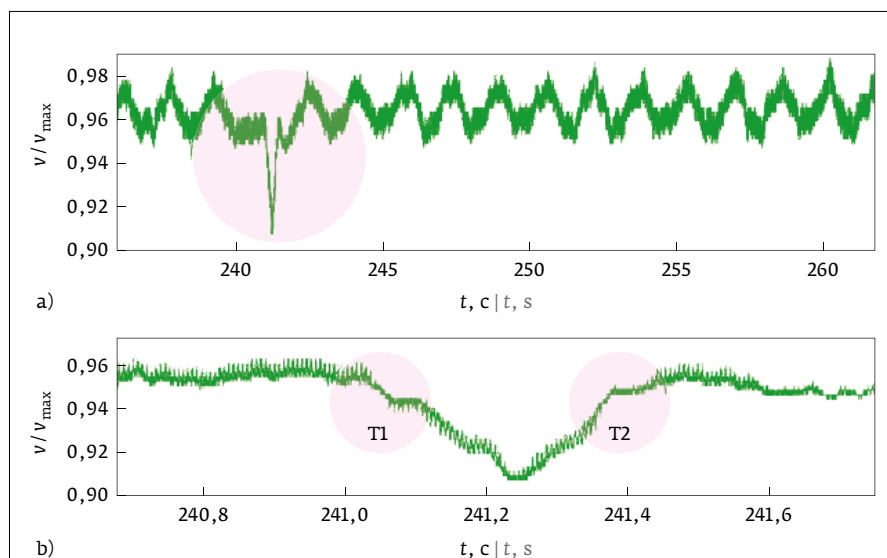


Рис. 6. Нормированная на максимум скорость за 26 секунд на рисунке (а) и за одну секунду на рисунке (б) в случае кратковременного уменьшения скорости на 5% (некритического заедания). На времена T1 и T2 приходятся моменты времени, когда амплитуда виброколебаний скорости равна нулю – именно эти моменты и есть моменты заклинивания

Fig. 6. Temporal dependence of the normalized velocity in 26 seconds (a) and in 1 second (b) for the case of a short-term decrease in the velocity by 5% (non-critical jamming). Times T1 and T2 (moments of jamming) correspond to zero velocity of rough vibrations

components such as 1/10 of the drive shaft velocity are not visible against their background.

CONCLUSIONS

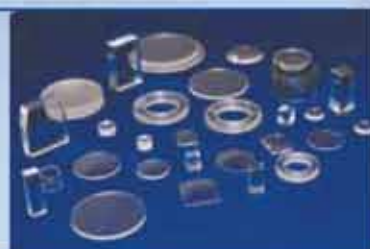
A new approach to the analysis of the instantaneous velocity of moving objects in experiments or technological processes is proposed and implemented. The developed approach to the spectral analysis of temporal changes in the velocity allows controlling the occurrence and development of negative defects in moving systems during their operation. In this paper, we considered the case of using this method of velocity analysis for linear motion systems. However, it may be more interesting for control of rotation systems. Instead of a signal from an optical linear scale, the Speedometer system can use an angular position signal from an axial incremental encoder, for example, with 1000 counts per revolution. The angular velocity should be calculated. Then, after the averaging procedure, one can observe the dynamics of the angular velocity or perform a Fourier analysis of the angular velocity data array in order to consider the spectrum of the velocity dependence in which the features or defects of the mechanical system are reflected.

Синтетический САПФИР

Производство кристаллов и оборудования



Пластины, окна, подложки:
смотровые, защитные, сканерные окна, часовые
стекла, экраны для смартфонов и мобильных
телефонов, оптические компоненты



Трубы и тигли
трубки и тигли различной длины и сечения
для ламп высокого давления, термореакторов,
установок плазменного травления



Стержни круглого и
прямоугольного сечения:
световоды для пирометров, плунжера для
хроматографических насосов и сиквенаторов,
изоляторы, износостойкие направляющие



Индивидуальный заказ:
Термореакторы, часовые и приборные камни,
подшипники, компоненты для научной и
медицинской техники, брекетты, сувенирная
продукция



Оборудование для выращивания
кристаллов

Nika-M60, Nika-M30, Nika-3, Nika-PROFILE



ЗАО «РОСТОКС-Н»

Since 1993

142432 Россия, Московская обл., г. Черноголовка, Проспект Академика Семенова, д. 9, ЗАО «Ростокс-Н»

Тел.: +7 496 527 35 91, +7 496 527 35 96, +7 496 527 35 95 • Факс: +7 496 52 7 36 03

E-mail: belov@ezan.ac.ru, info@rostox-n.ru • <http://www.rostox-n.ru>