



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 621.81

А.В. КОЗИНЕЦ

инженер¹

E-mail: Alex-2570@kbtem.by

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук, проф.

начальник НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» —
заведующий лабораторией приводных систем и технологического оборудования²

E-mail: vladbas@mail.ru

Р.Е. ВОЛКОТРУБ

научный сотрудник²

E-mail: aug1961r@mail.ru

¹ОАО «Планар», г. Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 24.08.2022.

МЕТОДИКА ВЫБОРА РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИВОДА КАРЕТКИ ЗОНДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МИНИМИЗАЦИЮ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛА ЗОНДИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИВОДА ПРЕДМЕТНОГО СТОЛИКА

Приведены результаты анализа предварительных исследований механических колебаний с собственной частотой предметного столика зондового оборудования, позволившие установить, что длительность их затухания, до завершения которых не может быть осуществлен контроль годности кристаллов, существенно зависит от режима динамики движения в процессе разгона и торможения, при этом их длительность составляет до ~87 % времени цикла зондирования и при определенных режимах функционирования привода оно имеет минимум, позволяющий без использования систем активного гашения колебаний на 25–36 % уменьшить длительность процесса затухания колебаний с соответствующим повышением производительности процесса зондирования. Показано, что диапазон варьирования шага перемещения предметного столика с позиций его влияния на время затухания механических колебаний условно может быть разбит на два участка: перемещение с шагом менее 2–3,5 мм, наиболее перспективное с позиций стабильно существующей тенденции минимизации размеров кристаллов, при котором время затухания колебаний существенно и нелинейно зависит от величины этого шага, и перемещение с шагом более 2–3,5 мм, для которого время затухания колебаний практически не зависит от шага перемещения. Предложен алгоритм дальнейших исследований, позволяющий после их проведения разработать методику выбора рациональных режимов функционирования привода каретки зондового оборудования при переходных процессах, обеспечивающих минимизацию длительности цикла зондирования.

Ключевые слова: зондовое оборудование, методика, микроэлектроника, переходные процессы, производительность

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-38-45>

Введение. Причиной возникновения механических колебаний в зондовой установке являются вызванные переходными процессами рабочего цикла движения (разгон/торможение) упругие деформации элементов привода, которые передают движение от двигателя к подвижной части координатной системы. Чем меньше деформации, тем более жесткой является механическая система. К элементам, влияющим на ее жесткость, относятся муфта, подшипниковая опора, ходовой винт и гайка с шариками. Затуханию колебаний способствуют силы трения в подвижных сопряжениях приведенных выше элементов.

Основной причиной возникающих механических колебаний являются инерционные силы. Они возникают при переходных процессах функционирования привода. При этом чем выше заданная скорость перемещения, тем больше ускорение предметного столика в процессе его разгона и торможения и связанные с ним инерционные силы. Ускорение, создаваемое приводом, определяется настройкой контроллера электродвигателя. В нем предусмотрено несколько режимов создаваемого тягового усилия и возможность изменения динамики разгона и торможения, т. е. плавности движения, при котором ускорение и скорость разгона и торможения изменяются нелинейно.

Увеличение ускорения приводит к сокращению времени разгона и торможения, однако при этом возрастает амплитуда механических колебаний и связанное с ними время их затухания, до завершения которого контроль годности кристаллов не проводится во избежание повреждения зондов и полупроводниковых пластин. В свою очередь уменьшение ускорения способствует снижению амплитуды механических колебаний и времени их затухания, но увеличивается время перемещения привода в заданную координату.

Выбор оптимального, с позиции минимизации времени зондирования, характера протекания переходного процесса и режима настройки привода может обеспечить наименьшее время зондирования, что позволит увеличить производительность зондового оборудования.

Исследованиям в области повышения эффективности оборудования микроэлектроники посвящено значительное число работ [1–10]. Однако до настоящего времени решение приведенной выше задачи остается актуальным и по мере уменьшения размеров кристаллов значимость неизмеримо возрастает, поскольку процесс забраковки кристаллов зондированием в микроэлектронике можно отнести к одному из самых трудоемких.

Цель исследований — разработка методики выбора режимов функционирования привода каретки зондового оборудования при переходных процессах, позволяющей минимизировать длительность цикла зондирования и на основе этого обеспечить максимально достижимую производительность зондового оборудования.

Методика исследований. В качестве объекта исследования была принята прецизионная координатная система с шарико-винтовой парой (ШВП), которая установлена на экспериментальной зондовой установке ЭМ-6710 ОАО «Планар» (г. Минск). Данная установка оснащена антивибрационным столом, использование которого позволяет эффективно поглощать значительную часть вибрации внешней среды (рисунок 1).

Исследования механических колебаний проводились с использованием двухкоординатного модуля ИЯМБ 0006 (рисунок 2) для прецизионного контроля вибрации (виброускорения), который был установлен на каретке привода Y с ориентацией в направлении и осях XU , и лазерного

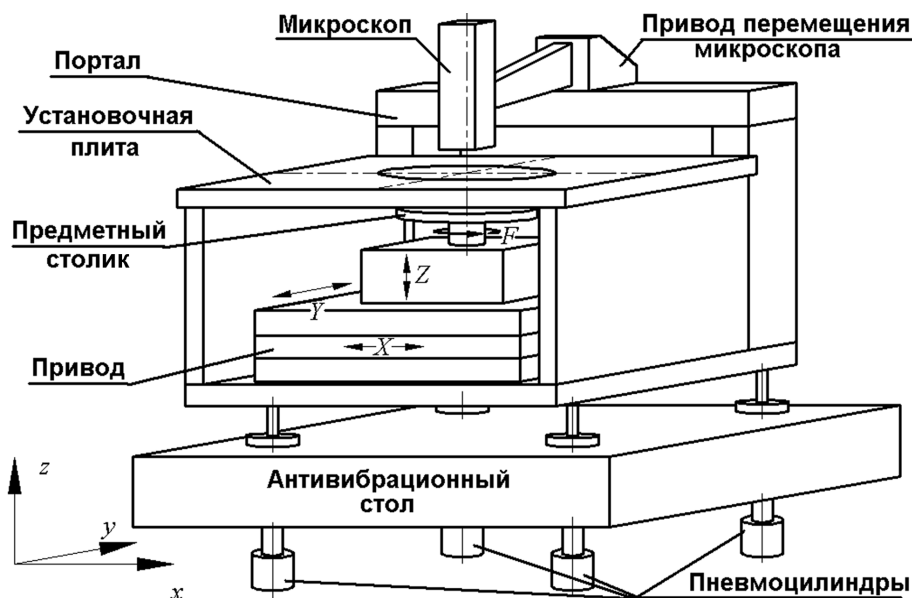


Рисунок 1 — Схема установки зондовой ЭМ-6710 с антивибрационным столом
 Figure 1 — Installation diagram of the probe ЭМ-6710 (EM-6710) with an anti-vibration table

интерферометра Lazertex HPI-3D (Польша), схема установки которого показана на рисунке 3.

При исследованиях изучались механические колебания при шаге перемещений 0,5, 1 и 5 мм, соответствующие наиболее используемым в настоящее время размерам кристаллов, а также влияние характера протекания переходного процесса, который представлял собой два варианта динамики разгона/торможения (режима динамики): линейный и нелинейный (в зависимости от характера изменения скорости предметного столика в процессе его разгона) при различной степени сглаженности ее изменения, а также при использовании антивибрационного стола и без него.

Необходимо отметить, что на зондовых установках ЭМ-6710 ОАО «Планар» оператору для настройки привода доступно варьирование таких параметров, как шаг перемещения, выбираемый исходя из размеров контролируемых кристаллов; скорость перемещения; ускорение при разгоне и торможении; плавность, под которой понимает-

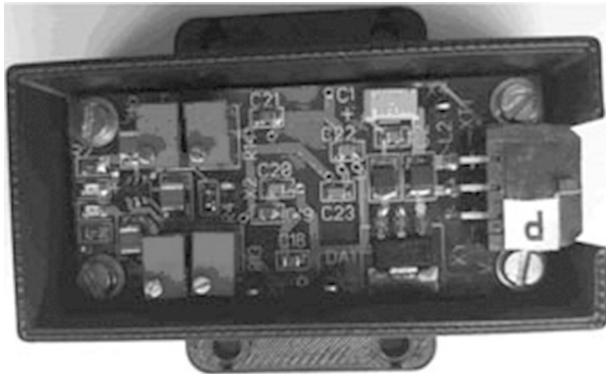


Рисунок 2 — Двухкоординатный модуль ИЯМБ 0006 прецизионного контроля вибрации (виброускорения)
Figure 2 — Two-coordinate module ИЯМБ 0006 (IYaMB 0006) of precision vibration control (vibration acceleration)

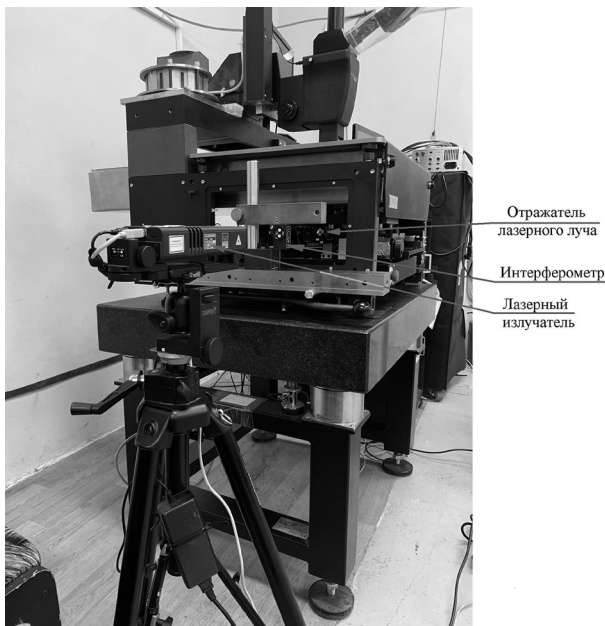


Рисунок 3 — Схема установки лазерного интерферометра
Figure 3 — Laser interferometer installation scheme

ся программно-управляемая контроллером сглаженность процесса разгона (рисунок 4).

При линейном режиме динамики создаваемое электродвигателем ускорение разгона и торможения предметного столика имеет только два варианта реализации: постоянное и изменяющееся по заданному контроллером закону.

Если режим сглаживания не используется, то кривые изменения скорости, ускорения и перемещения принимают вид, показанный на рисунке 5.

При нелинейном режиме динамики ускорение, создаваемое двигателем, изменяется по определенному закону, т. е. в процессе разгона и торможения изменяется на определенных участках ускорение. Кривые скорости, ускорения и перемещения при этом имеют вид, показанный на рисунке 6.

При предварительных исследованиях для фиксации механических колебаний рабочего столика рядом с зондовой установкой на треноге устанавливался лазерный излучатель с приемником. При этом на подвижной части координатной механической системы (предметном столике) был закреплен отражатель лазерного луча, а к неподвижной плите установки был прикреплен интерферометр, который разделял лазерный луч на два (см. рисунок 3). При регистрации колебаний каждый из лучей проходил различные оптические пути и направлялся в приемник, создавая интерференционную картину, по которой можно установить разность фаз интерферирующих лучей в контролируемой точке.

В программном обеспечении интерферометра был выбран режим фиксации параметров «динамический», который позволял с частотой дискре-

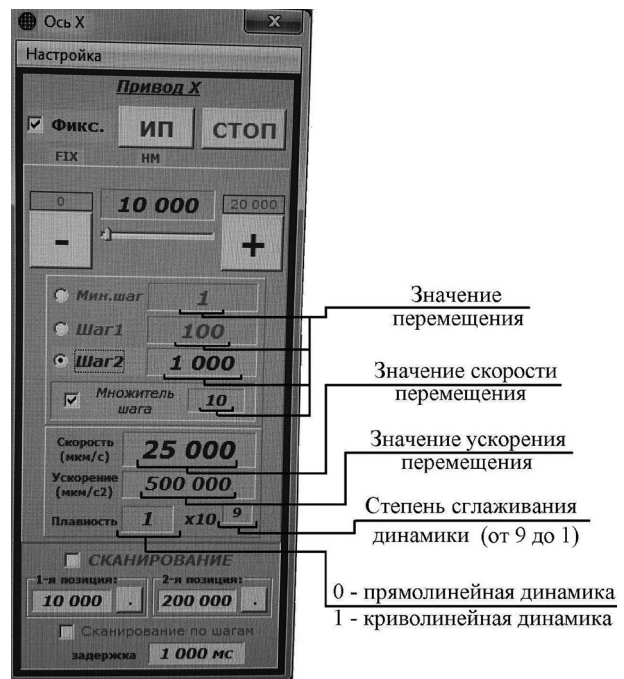
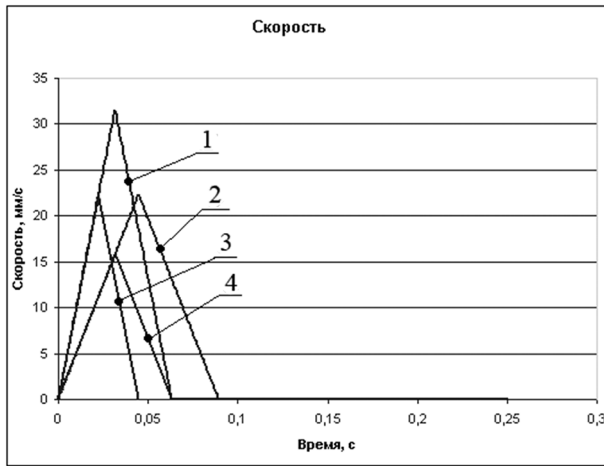
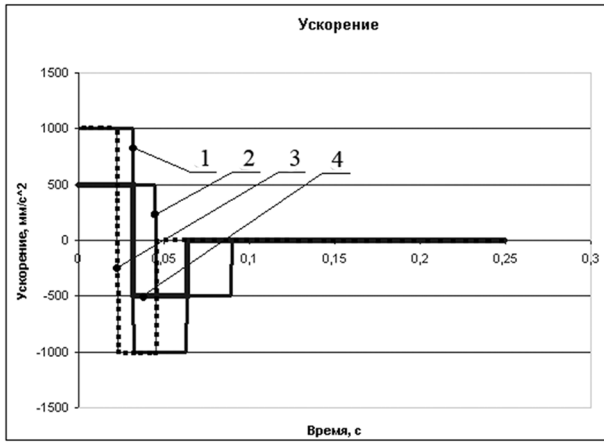


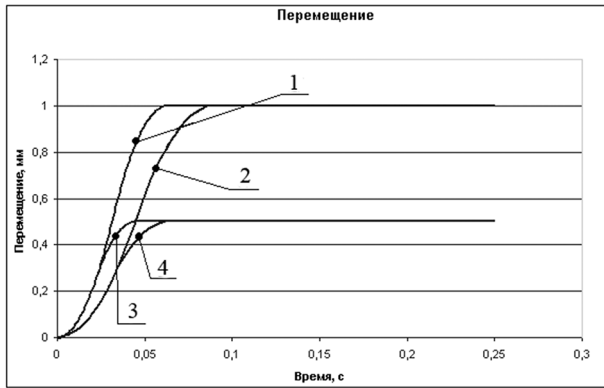
Рисунок 4 — Окно настройки привода установки зондовой ЭМ-6710
Figure 4 — Setup window of the probe EM-6710 installation drive



a



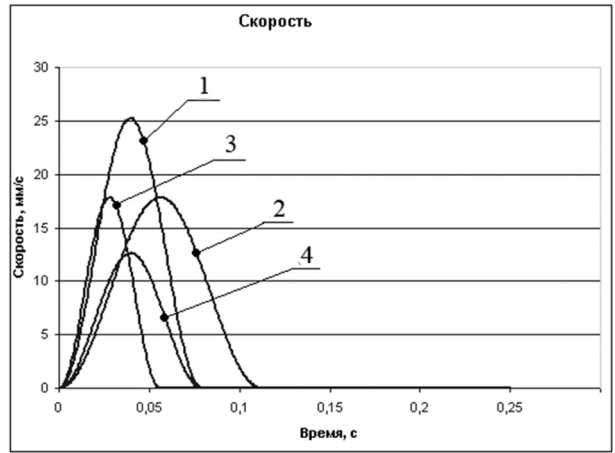
b



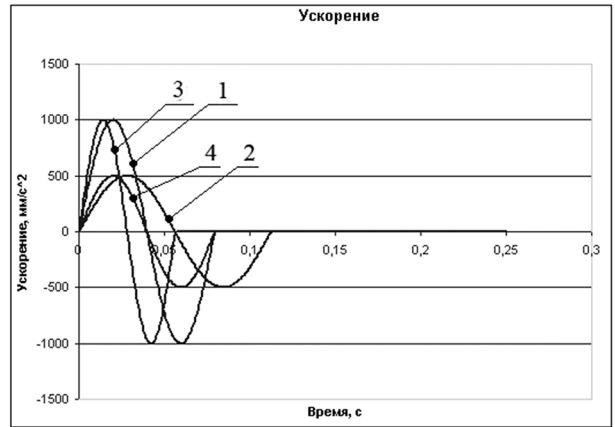
c

Рисунок 5 — Графики изменения номинальных скорости (a), ускорения (b) и перемещения (c) при линейном режиме динамики, в которых ускорение и величина шага между контактными площадками равняются соответственно: 1 — 1000 мм/с² и 1 мм; 2 — 500 мм/с² и 1 мм; 3 — 1000 мм/с² и 0,5 мм; 4 — 500 мм/с² и 0,5 мм
 Figure 5 — Graphs of changes in nominal speeds (a), acceleration (b) and displacement (c) in linear dynamics mode, in which the acceleration and the value of the step between the pads are equal, respectively: 1 — 1,000 mm/s² and 1 mm; 2 — 500 mm/s² and 1 mm; 3 — 1,000 mm/s² and 0.5 mm; 4 — 500 mm/s² and 0.5 mm

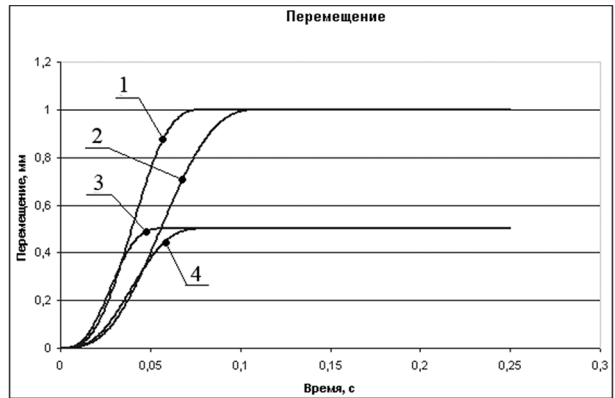
тизации 500 Гц в течение заданного времени регистрировать перемещения контролируемых частей зондового оборудования. Используемые при исследованиях режимы динамики разгона и торможения предметного столика приведены в таблице.



a



b



c

Рисунок 6 — Графики номинальных скорости (a), ускорения (b) и перемещения (c) при нелинейном режиме динамики, при котором ускорение и величина шага между контактными площадками равняются соответственно: 1 — 1000 мм/с² и 1 мм; 2 — 500 мм/с² и 1 мм; 3 — 1000 мм/с² и 0,5 мм; 4 — 500 мм/с² и 0,5 мм
 Figure 6 — Graphs of nominal speeds (a), acceleration (b) and displacement (c) in a nonlinear dynamics mode, in which the acceleration and the value of the step between the pads are equal, respectively: 1 — 1,000 mm/s² and 1 mm; 2 — 500 mm/s² and 1 mm; 3 — 1,000 mm/s² and 0.5 mm; 4 — 500 mm/s² and 0.5 mm

Двухкоординатным модулем ИЯМБ 0006 одновременно с интерферометром фиксировалось виброускорение. Анализ полученных при этом данных подтвердил возможность использования существенно более дешевого двухкоординатного модуля для проведения исследования и последующего

Таблица – Режимы динамики привода движения предметного столика

Table — Modes of dynamics of the object stage motion drive

Наименование режима	Обозначение режима q
Линейное изменение ускорения	0
Нелинейное изменение ускорения и 9-я степень сглаженности	1
Нелинейное изменение ускорения и 8-я степень сглаженности	2
Нелинейное изменение ускорения и 7-я степень сглаженности	3
Нелинейное изменение ускорения и 6-я степень сглаженности	4
Нелинейное изменение ускорения и 5-я степень сглаженности	5

Примечание: при 1–4 степенях сглаженности время перемещения предметного столика существенно возросло, а механические колебания практически не возникали, поэтому данные режимы не рассматривались.

мониторинга параметров колебаний предметного столика при эксплуатации зондового оборудования.

При исследованиях по значениям перемещений и отрезкам времени их реализации определялись скорость перемещения и ускорение.

Результаты исследований параметров перемещений и механических колебаний предметного столика приведены на рисунке 7. Предварительно перед обработкой результатов исследований была осуществлена оценка зависимости суммарного времени перемещения предметного столика в заданную координату и затухания механических колебаний от шага перемещения. Осциллограммы затухания механических колебаний в зависимости от режима динамики разгона и торможения представлены на рисунке 7 а. Графики зависимости: суммарного времени цикла перемещения и затухания механических колебаний t_{Σ} от режима динамики разгона и торможения представлены на рисунке 7 б; времени затухания механических колебаний $t_{\text{от}}$ от режима динамики разгона и торможения показаны на рисунке 7 с; отношения $t_{\text{к}}$ к t_{Σ} от режима динамики разгона и торможения представлены на рисунке 7 д; времени затухания механических колебаний $t_{\text{к}}$ от шага перемещения представлены на рисунке 7 е.

Результаты и их обсуждение. Анализ рисунка 7 показал следующее:

- механические колебания предметного столика с собственной частотой, во многом определяющие точность координатных перемещений и усталостный ресурс компонентов привода, существенно зависят от режима динамики разгона и торможения (см. рисунок 7 а);
- относительная длительность времени цикла перемещения с затуханием механических колебаний после достижения заданной координаты, соответствующей шагу перемещения или размеру кристалла, достигает в зависимости от режима динамики

разгона и торможения и шага перемещения $\sim 87\%$ времени цикла (см. рисунки 7 б, с) и она определяет производительность процесса зондирования, причем наиболее существенно это влияние в диапазоне относительно малых шагов перемещения S ;

- время затухания механических колебаний имеет минимум (см. рисунки 7 б, с) для рассматриваемых массы и жесткости кинематической цепи привода, соответствующей $q(1, 2)$, причем при относительно малых шагах перемещений длительность периода затухания связана с ними нелинейно;
- диапазон варьирования шага перемещения предметного столика с позиций его влияния на время затухания механических колебаний условно может быть разбит на два диапазона:

- для шага перемещения менее 2–3,5 мм, наиболее перспективного с позиций стабильно существующей тенденции минимизации размеров кристаллов, время цикла перемещения с затуханием механических колебаний существенно и нелинейно зависит от величины шага S перемещения (см. рисунок 7 е), что обусловлено отсутствием периода движения с постоянной скоростью в цикле перемещения предметного столика в заданную координату и в ряде случаев возможности достижения заданной числовым программным управлением (ЧПУ) зондового оборудования номинальной скорости;

- для шага перемещения более 2–3,5 мм время цикла зондирования незначительно зависит от времени затухания и, в основном, определяется режимом динамики разгона и торможения (см. рисунок 7 е).

С учетом приведенного выше, в основу методики выбора рациональных режимов функционирования привода каретки зондового оборудования при переходных процессах, обеспечивающих минимизацию длительности цикла зондирования, может быть положен следующий алгоритм проведения дальнейших исследований:

- определение закономерностей, связывающих режим динамики разгона и торможения со временем затухания механических колебаний, для рассматриваемых инерционно-жесткостных параметров привода зондовой установки ЭМ-6710 целесообразно проводить для режимов $q(1, 2)$, имеющих минимальное время реализации цикла перемещения (см. рисунок 7 е) и для наиболее перспективных размеров кристаллов менее 3,5 мм, у которых t_{Σ} нелинейно связано с S ;
- определение параметров рассеивания времени затухания механических колебаний;
- определение зависимостей, связывающих суммарное время реализации цикла перемещения и затухания колебаний с шагом перемещения и динамикой разгона и торможения, позволяющих, с учетом величины рассеивания, осуществить выбор рациональных режимов функционирования привода каретки зондового оборудования при пе-

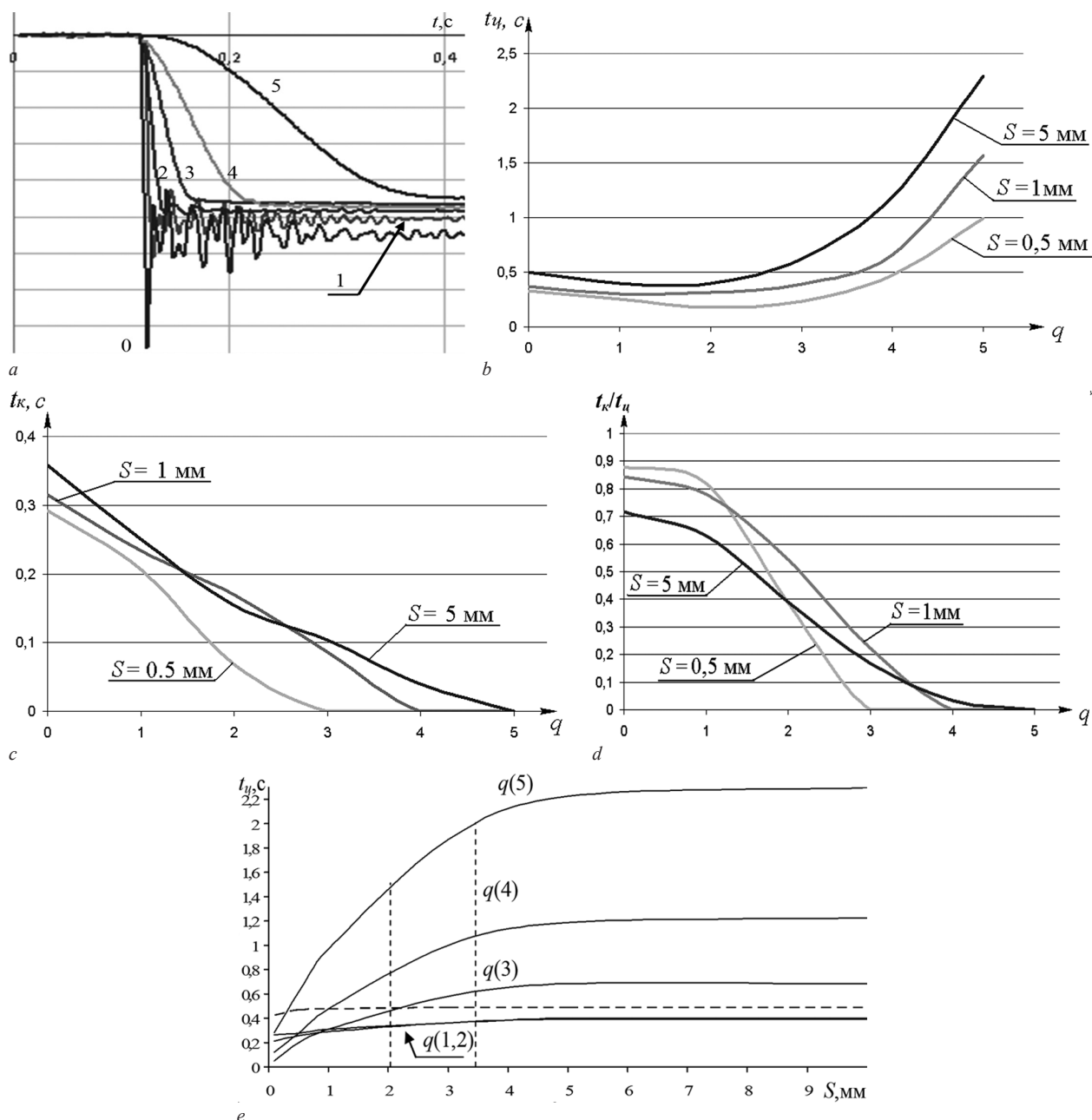


Рисунок 7 — Результаты исследований параметров перемещений и механических колебаний предметного столика: типовые осциллограммы затухания механических колебаний в зависимости от режима динамики разгона и торможения (а); графики зависимости суммарного времени цикла перемещения и затухания механических колебаний t_u от режима динамики разгона и торможения (б); графики зависимости времени затухания механических колебаний t_k от режима динамики разгона и торможения (с); графики зависимости отношения t_k к t_u от режима динамики разгона и торможения (д); графики зависимости суммарного времени цикла перемещения и затухания механических колебаний t_u от шага перемещения (е)

Figure 7 — Results of studies of the parameters of displacements and mechanical vibrations of the object stage: typical oscillograms of the attenuation of mechanical vibrations depending on the acceleration and braking dynamics mode (a); graphs of the dependence of the total cycle time of displacement and attenuation of mechanical vibrations t_u on the acceleration and braking dynamics mode (b); graphs of the dependence of the attenuation time of mechanical vibrations t_k on the acceleration and braking dynamics mode (c); graphs of the relationship of t_k to t_u from the acceleration and braking dynamics mode (d); graphs of the dependence of the total time of the displacement cycle and the attenuation of mechanical vibrations t_u on the displacement step (e)

реходных процессах, обеспечивающих минимизацию длительности цикла зондирования.

Заключение. В результате анализа проведенных предварительных исследований показано, что длительность затухания механических колебаний с собственной частотой предметного столика зондового оборудования, до затухания которых не может быть осуществлен контроль годности

кристаллов, существенно зависит от режима динамики разгона и торможения и составляет $\sim 87\%$ времени цикла зондирования. При этом при определенных режимах динамики разгона и торможения предметного столика оно имеет минимум, позволяющий без использования систем активного гашения колебаний на 25–36 % уменьшить длительность процесса затухания колебаний с соот-

ветствующим повышением производительности процесса зондирования. Установлено, что диапазон варьирования шага перемещения предметного столика с позиций его влияния на время затухания механических колебаний условно может быть разбит на два диапазона: перемещение с шагом менее 2–3,5 мм, наиболее перспективное с позиций стабильно существующей тенденции минимизации размеров кристаллов, при котором время затухания колебаний существенно и нелинейно зависит от величины этого шага; и перемещение с шагом более 2–3,5 мм, для которого время затухания колебаний практически не зависит от шага перемещения. Определены наиболее перспективные для последующих исследований и рассматриваемой установки ЭМ-6710 режимы динамики разгона и торможения $q(1, 2)$, имеющие минимальное время реализации цикла зондирования. Предложены методические подходы к разработке методики выбора рациональных режимов функционирования привода каретки зондового оборудования при переходных процессах, обеспечивающих минимизацию длительности цикла зондирования.

Окончание следует.

Список литературы

1. Карпович, С.Е. Прецизионные системы перемещений для оборудования производства изделий электронной техники / С.Е. Карпович, В.В. Жарский, И.В. Дайняк // Докл. БГУИР. — 2014. — № 2(80). — С. 60–72.
2. Лосев, В.В. Развитие методов зондовой микроскопии для исследования и контроля поверхностей материалов и изделий микроэлектроники: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / В.В. Лосев. — М., 2002. — 175 л.
3. Смирнов, К.К. Автоматизация операций прослеживаемости качества интегральных структур при производстве сверхбольших интегральных схем [Электронный ресурс] / К.К. Смирнов // Тр. МАИ. — 2015. — № 95. — Режим доступа: http://trudymai.ru/upload/iblock/bda/Smimov_rus.pdf. — Дата доступа: 17.05.2018.
4. Hudec, J. Methodology of functional test synthesis and verification for VLSI Systems / J. Hudec // ITI 2000. Proc. of the 22nd International Conference on Information Technology Interfaces. — 2000. — Pp. 61–66.
5. Минченко, В.А. Принципы построения и структурные схемы зондовых автоматических систем контроля параметров изделий микро- и нанозлектроники на пластине / В.А. Минченко, Г.Ф. Ковальчук, С.Б. Школьник // Приборы и методы измерений. — 2012. — № 2(5). — С. 67–75.
6. Дайняк, И.В. Интегрированная система многокоординатных перемещений для сборочного оборудования микроэлектроники / И.В. Дайняк, Д.Г. Бегун, В.В. Поляковский // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. — 2014. — № 11. — С. 59–64.
7. Лосев, В.В. Развитие методов зондовой микроскопии для исследования и контроля поверхностей материалов и изделий микроэлектроники: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / В.В. Лосев. — М., 2002. — 175 с.
8. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / В.В. Жарский [и др.]. — Минск, 2013. — 208 с.
9. Михайлов, М.А. Система прецизионного механического перемещения для повышения пространственного разрешения и точности измерений линейных размеров в сканирующем зондовом микроскопе: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01 / М.А. Михайлов. — СПб., 2015. — 128 л.
10. Ващенко, П.А. Моделирование i -координатных виброзащитных устройств оборудования электронной техники : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18, 05.13.12 / П.А. Ващенко. — Воронеж, 2009. — 16 л.

KOZINETS Alexei V.

Engineer¹

E-mail: _Alex-2570@kbtm.by

BASINIUK Vladimir L., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment” – Head of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment²

E-mail: vladbas@mail.ru

VOLKOTRUB Rita E.

Researcher²

E-mail: aug1961r@mail.ru

¹Planar JSC, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 24 August 2022.

METHOD FOR SELECTING THE FUNCTIONING MODES OF THE CARRIAGE DRIVE OF PROBE EQUIPMENT DURING TRANSIENT PROCESSES PROVIDING MINIMIZATION OF PROBING CYCLE DURATION. PART 1. METHOD FOR STUDYING MECHANICAL OSCILLATIONS OF THE OBJECT STAGE DRIVE

The article presents the results of the analysis of preliminary studies of mechanical vibrations with a natural frequency of the object stage of the probe equipment. They made it possible to establish that the duration of their attenuation, until the completion of which the crystals' validity cannot be controlled, significantly

depends on the mode of motion dynamics during acceleration and braking. At the same time their duration is up to ~87 % of time of the probing cycle and under certain modes of drive operation, it has a minimum that allows, without the use of active vibration damping systems, to reduce the duration of the vibration damping process by 25–36 % with a corresponding increase in the productivity of the probing process. It is shown that the range of variation of the step of the object stage displacement from the standpoint of its influence on the damping time of mechanical vibrations can conditionally be divided into two ranges: 1) displacement with a step of less than 2–3.5 mm, the most promising from the standpoint of a stably existing trend of minimizing the size of crystals, at which the damping time of oscillations is significant and depends nonlinearly on the value of this step, and 2) displacement with a step of more than 2–3.5 mm, for which the damping time of oscillations does not practically depend on the displacement step. Algorithm of further studies is proposed that makes it possible, after their implementation, to develop a method for choosing rational modes of operation of the probe equipment carriage drive during transient processes that ensure minimization of the duration of the probing cycle.

Keywords: probe equipment, method, microelectronics, transient processes, performance

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-38-45>

References

1. Karpovich S.E., Jarski V.V., Dainiak I.V. *Pretsizionnyye sistemy peremeshcheniy dlya oborudovaniya proizvodstva izdeliy elektronnoy tekhniki* [Precision motion systems for equipment of electronic technics manufacturing]. *Doklady BGUIR*, 2014, no. 2(80), pp. 60–72 (in Russ.).
2. Losev V.V. *Razvitie metodov zondovoy mikroskopii dlya issledovaniya i kontrolya poverkhnostey materialov i izdeliy mikroelektroniki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of probe microscopy methods for research and control of surfaces of materials and products of microelectronics. Ph. D. Thesis]. Moscow, 2002. 174 p. (in Russ.).
3. Smirnov K.K. *Avtomatizatsiya operatsiy proslezhivaemosti kachestva integralnykh struktur pri proizvodstve sverkhbolshikh integralnykh skhem* [Automation of traceability operations for the quality of integrated structures in the production of super-large-scale integrated circuits]. *Trudy MAI*, 2015, no. 95. Available at: http://trudymai.ru/upload/iblock/bda/Smirnov_rus.pdf (accessed 17 May 2018) (in Russ.).
4. Hudec J. *Methodology of functional test synthesis and verification for VLSI Systems*. *ITI 2000. Proc. 22nd International conference on information technology interfaces*, 2000, pp. 61–66.
5. Minchenko V.A., Kovalchuk G.F., Shkolyk S.B. *Printsipy postroeniya i strukturnye skhemy zondovykh avtomaticheskikh sistem kontrolya parametrov izdeliy mikro- i nanoelektroniki na plastine* [Design principles and block schemes of the probe automatic inspection systems for microand nanoelectronics on a wafer]. *Devices and methods of measurements*, 2012, no. 2, pp. 67–75 (in Russ.).
6. Dainiak I.V., Begun D.G., Poliakovski V.V. *Integrirovannaya sistema mnogokoordinatnykh peremeshcheniy dlya sboroch-nogo oborudovaniya mikroelektroniki* [Integrated system of multicoordinate movements for assembly equipment of microelectronics]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost. Prikladnye nauki*, 2014, no. 11, pp. 59–64 (in Russ.).
7. Losev V.V. *Razvitie metodov zondovoy mikroskopii dlya issledovaniya i kontrolya poverkhnostey materialov i izdeliy mikroelektroniki*. *Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Development of probe microscopy methods for the study and control of surfaces of materials and products of microelectronics. Extended abstract of Ph. D. Thesis]. Moscow, 2002. 175 p. (in Russ.).
8. Zharskiy V.V., et al. *Sistemy mnogokoordinatnykh peremeshcheniy i ispolnitelnye mekhanizmy dlya pretzionnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Systems of multicoordinate movements and actuators for precision technological equipment]. Minsk, 2013. 208 p. (in Russ.).
9. Mikhaylov M.A. *Sistema pretzionnogo mekhanicheskogo peremeshcheniya dlya povysheniya prostranstvennogo razresheniya i tochnosti izmereniy lineynykh razmerov v skaniruyushchem zondovom mikroskope*. Diss. kand. tekhn. nauk [Precision mechanical displacement system for increasing the spatial resolution and accuracy of measurements of linear dimensions in a scanning probe microscope. Ph. D. Thesis]. Saint Petersburg, 2015. 128 p. (in Russ.).
10. Vashchenko P.A. *Modelirovanie i-koordinatnykh vibrozashchitnykh ustroystv oborudovaniya elektronnoy tekhniki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Modeling of i-coordinate vibration protection devices for electronic equipment. Ph. D. Thesis]. Voronezh, 2009. 16 p. (in Russ.).