

УДК 621.81

А.В. КОЗИНЕЦ

инженер¹

E-mail: Alex-2570@kbtcm.by

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук, проф.

начальник НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» – заведующий лабораторией «Приводные системы и технологическое оборудование»²

E-mail: vladbas@mail.ru

Р.Е. ВОЛКОТРУБ

научный сотрудник лаборатории приводных систем и технологического оборудования НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»²

E-mail: aug1961r@mail.ru

¹ОАО «Планар», г. Минск, Республика Беларусь²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 26.01.2023.

МЕТОДИКА ВЫБОРА РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИВОДА КАРЕТКИ ЗОНДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ. ЧАСТЬ 2

В статье приведены результаты исследований, анализ которых позволил установить особенности, влияющие на длительность основных периодов горизонтального перемещения приводом каретки с предметным столиком оборудования зондового контроля, к основным из которых можно отнести режим плавности (динамики) перемещения и связанные с ним ускорения при разгоне и торможении, обеспечиваемые настройкой контроллера управления электродвигателем, а также шаг перемещения. Показано, что для конкретизированных инерционно-жесткостных и демпфирующих характеристик оборудования зондового контроля определение ускорений для каждого режима плавности и длительности затухания механических колебаний после перемещений каретки с предметным столиком в заданную координату может быть осуществлено в режиме отладки оборудования зондового контроля или автоматизированно с использованием адаптивного управления. Предложена методика выбора рациональных режимов функционирования привода каретки с предметным столиком зондового оборудования при переходных процессах с использованием базы данных и шага перемещения (размера кристаллов), позволяющая для каждого режима плавности определить циклограмму его перемещения и суммарную длительность всего цикла, из которых выбирается и реализуется минимальный.

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-47-54>

Введение. Исследования эффективности функционирования, включая производительность оборудования микроэлектроники, являются одной из наиболее актуальных проблем точного электронного машиностроения [1–10]. При этом к наиболее трудоемким и ответственным операциям в этой сфере можно отнести зондовый контроль годности кристаллов, важность совершенствования которого постоянно возрастает по мере уменьшения размеров кристаллов и соответствующего увеличения их числа на полупроводниковой пластине, которое уже сегодня в ряде случаев достигает нескольких десятков тысяч.

В первой части статьи было показано, что длительность затухания механических колеба-

ний с собственной частотой, возникающих после достижения заданной координаты каретки с предметным столиком, может достигать ~87 % времени цикла горизонтального перемещения на шаг при зондовом контроле. Она существенно зависит от принятого ступенчатого регулируемого при настройке управляющего электродвигателем привода контроллера и шага перемещения каретки с предметным столиком, который определяется размером кристаллов. В совокупности это оказывает самое существенное влияние на длительность цикла зондирования и, как следствие, на производительность оборудования зондового контроля.

Минимизация времени реализации горизонтального перемещения каретки с предметным сто-

ликом на шаг может быть обеспечена путем выбора рациональных режимов функционирования ее привода.

Целью исследований являлась разработка методики выбора рациональных режимов функционирования привода каретки с предметным столиком зондового оборудования при переходных процессах, учитывающей совокупность особенностей влияния определяемого настройкой управляющего электродвигателем контролера режима плавности (динамики) перемещения на длительность разгона, движения с постоянной скоростью или его отсутствия, торможения и затухания механических колебаний после достижения каретки с предметным столиком заданной координаты.

Методика исследований. Цикл горизонтального перемещения каретки с предметным столиком с полупроводниковой пластиной с размещенными на ее поверхности кристаллами на шаг содержит периоды (рисунок 1):

- разгона из состояния покоя в течение времени t_1 до заданной оператором скорости или ее максимально достижимого для рассматриваемого шага перемещения значения с прохождением пути l_1

- (разгон сопровождается механическими колебаниями с собственной частотой, интенсивность и длительность которых зависит от режима настройки контроллера) по координате X ;

- движения в течение времени t_2 с заданной скоростью при шаге перемещения $\Delta > l_1 + l_3$ с прохождением пути l_2 , которое может отсутствовать;

- торможения в течение времени t_3 с прохождением пути l_3 (торможение сопровождается механическими колебаниями с собственной частотой, интенсивность и длительность которых зависит от режима настройки контроллера);

- нахождения предметного столика в заданной координате на расстоянии Δ от исходной точки в течение времени t_4 , за которое происходит затухание механических колебаний с собственной частотой.

Таким образом, продолжительность горизонтального перемещения каретки с предметным столиком в заданную координату определяется суммарным временем приведенных выше этапов. К наиболее важным особенностям этого процесса можно отнести значительную длительность затухания механических колебаний с собственной частотой после достижения заданной координаты, которая зависит от четырех факторов:

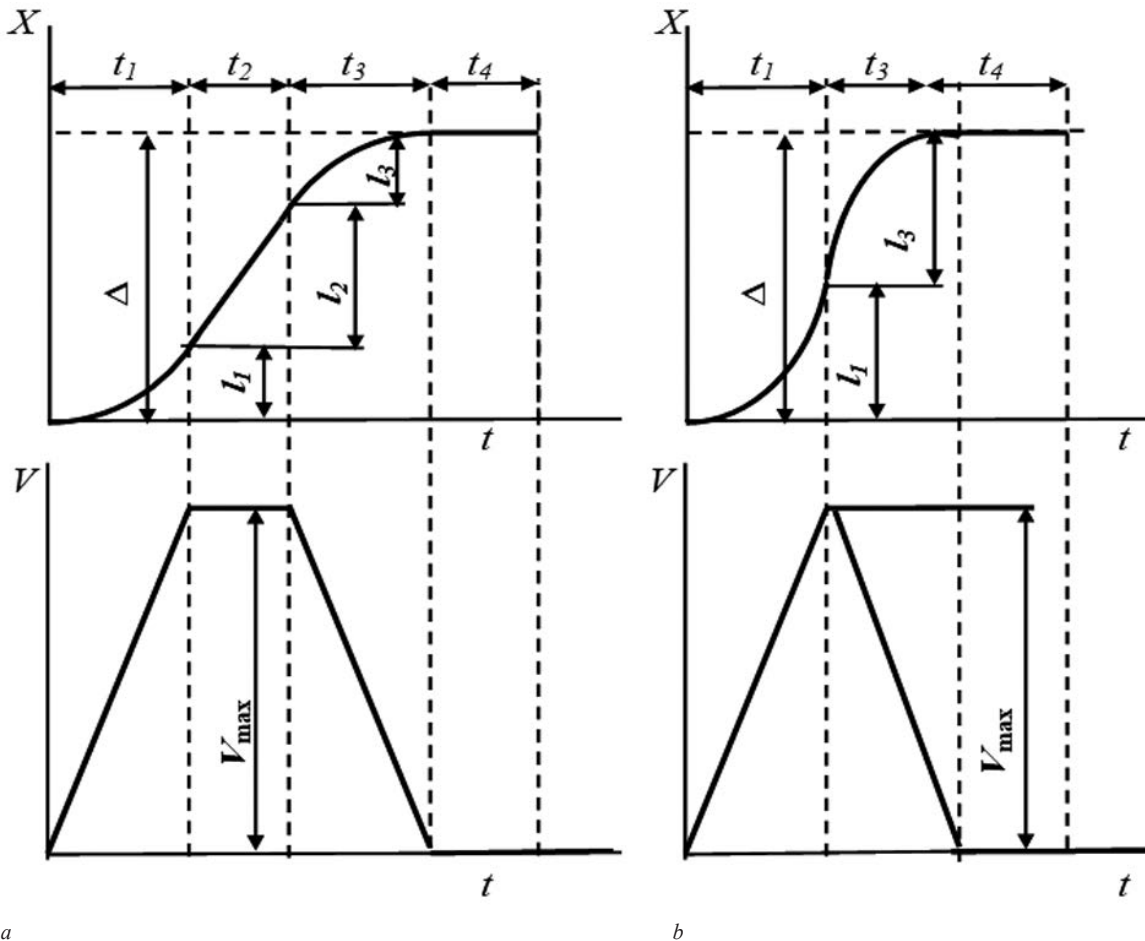


Рисунок 1 — Циклограммы изменения координатного положения каретки с предметным столиком и скорости ее перемещения в течение цикла зондирования: $\Delta > l_1 + l_3$ (a); $\Delta \leq l_1 + l_3$ (b)

Figure 1 — Cyclograms of changing the coordinate position of the carriage with the object stage and the speed of its displacement during the probing cycle: $\Delta > l_1 + l_3$ (a); $\Delta \leq l_1 + l_3$ (b)

- амплитуды колебаний, определяемой преимущественно режимом торможения, зависящего от настройки контроллера, управляющего параметрами функционирования электропривода;
- характера изменения координатного положения каретки с предметным столиком и его скорости, циклограммы которого схематично показаны на рисунке 1;
- частоты собственных механических колебаний, с увеличением которой их общая длительность уменьшается;
- величины коэффициента затухания механических колебаний, увеличение которого приводит к уменьшению их длительности.

Частота собственных механических колебаний определяется инерционно-жесткостными параметрами механической системы, которые закладываются при проектировании оборудования, а их затухание, в какой-то мере, зависит от натяга шарико-винтовой передачи и трения в подвижных соединениях привода, однако эффективное управление этим параметром может быть достигнуто только путем использования системы активного гашения механических колебаний.

Настройка управляющего электродвигателем контроллера на определенный режим разгона и торможения каретки с предметным столиком определяет величину создаваемого тягового усилия и характер его изменения при разгоне до заданной скорости и торможении до остановки после перемещения на шаг. Выше этот настраиваемый контроллером режим назван режимом плавности (q).

Поскольку обеспечиваемое тяговым усилием ускорение каретки с предметным столиком зависит от перемещаемой массы, а оно, в свою очередь, в сочетании с шагом перемещения определяет вид циклограммы и время цикла перемещения, то величина ускорения для каждого режима плавности должна быть определена предварительно или автоматизированно с использованием адаптивной системы управления и внесена в базу данных числового программного управления (ЧПУ) установки зондового контроля.

Таким образом, исходными данными для разработки методики выбора рациональных режимов функционирования привода каретки с предметным столиком зондового оборудования являются предварительно определенные:

- величина ускорения разгона a_p и торможения a_t при горизонтальных перемещениях каретки с предметным столиком при различных настройках режима плавности контроллера;
- длительность механических колебаний каретки с предметным столиком с собственной частотой при его достижении заданной координаты после перемещения на величину шага Δ .

Результаты исследований и их обсуждение.

На рисунке 2 показан пример осциллограмм изме-

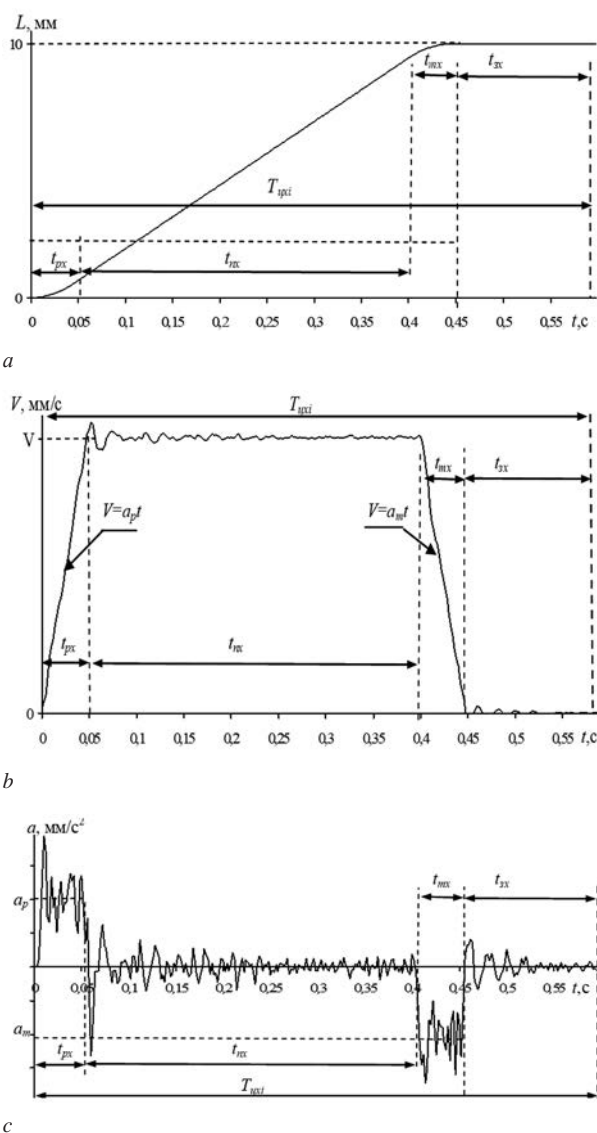


Рисунок 2 — Пример осциллограммы изменения координаты (а), скорости (b) и виброускорения (с) при перемещении каретки с предметным столиком по координате X на шаг $\Delta = 10$ мм ($T_{\text{цикл}}$, t_{px} , t_{mx} , t_{tx} , t_{xx} — время цикла перемещения полное, разгона, движения с постоянной скоростью, торможения и затухания колебаний соответственно)
Figure 2 — Example of an oscillogram of changing the coordinate (a), speed (b) and vibration acceleration (c) when displacing the carriage with the object stage along the X coordinate by one step $\Delta = 10$ mm (T_{cycle} , t_{px} , t_{mx} , t_{tx} , t_{xx} — cycle time of displacement total, acceleration, movement at a constant speed, braking and damping of vibrations, respectively)

нения координаты перемещения (а), скорости (b) и виброускорения (с) каретки с предметным столиком при его перемещении на шаг $\Delta = 10$ мм при режиме плавности $q = 3$.

Анализ рисунка 2 показывает ряд важных особенностей:

- время затухания механических колебаний каретки с предметным столиком больше суммарного времени его разгона и торможения;
- максимальная величина амплитуды колебаний ускорения при торможении каретки с предметным столиком почти вдвое превышает максимальную величину колебаний и амплитуду при разгоне;

- ускорения каретки с предметным столиком могут быть зафиксированы соответствующим модулем контроля виброускорения как в ручном (при наладке), так и в автоматизированном режиме при мониторинге;

- выделение участков ускорений каретки с предметным столиком при ее разгоне и торможении позволяет определить средние значения этих параметров, частоту механических колебаний и длительность затухания колебаний после перемещения на шаг Δ .

Методика выбора рациональных режимов функционирования привода каретки с предметным столиком зондового оборудования при его наладке и в автоматизированном режиме с использованием адаптивной системы управления включает следующее:

- формируются базы данных для каждого из наиболее рациональных для рассматриваемой модели оборудования зондового контроля режима плавности, включающие ускорения разгона и торможения и длительность периода затухания колебаний после достижения каретки с предметным столиком заданной координаты (для рассматриваемой установки зондового контроля целесообразно использование 1, 2 и 3 режимов плавности как имеющих, согласно первой части статьи, наименьший цикл реализации и шага перемещения при формировании баз данных $\Delta \geq 3$ мм, например $\Delta = 10$ мм);
- определяется максимально возможная скорость V_{imax} перемещения каретки с предметным столиком после ее разгона при наличии участка движения с постоянной скоростью и при его отсутствии, причем в этом случае заданная контролером скорость может быть не достигнута;
- рассчитывается время перемещения на шаг Δ каретки с предметным столиком для каждого из

режимов плавности с соответствующими ему ускорениями разгона и торможения при наличии и отсутствии участка движения с постоянной скоростью:

- при наличии участка движения с постоянной скоростью

$$T_{цвi} = t_{px} + t_{ix} + t_{tx} + t_{zx} = \frac{V_{ix}}{a_{pxj}} + \frac{\Delta_x}{V_{ix}} - 0,5V_{ix}^2 \left(\frac{1}{a_{pxj}} + \frac{k_{PTX}^2}{a_{mxj}} \right) + k_{PTX} \frac{V_{ix}}{a_{mxj}} + t_{zx}; \quad (1)$$

- при отсутствии участка движения с постоянной скоростью

$$T_{цвi} = t_{px} + t_{tx} + t_{zx} = \frac{V_{ix}}{a_{pxj}} + k_{PTX} \frac{V_{ix}}{a_{mxj}} + t_{zx}, \quad (2)$$

где t_{px} , t_{ix} , t_{tx} , t_{zx} — длительность разгона, движения с постоянной скоростью, торможения и затухания механических колебаний каретки с предметным столиком после достижения заданной координаты соответственно; k_{PTX} — безразмерный коэффициент, представляющий собой отношение времени разгона ко времени торможения каретки с предметным столиком, величина которого может быть различной для разных режимов плавности и определяется на основе анализа осциллограмм колебаний, а при отсутствии соответствующих данных может быть принята равной 1;

- по результатам расчетов значений $T_{цвi}$ формируется массив данных значений этого параметра, из которого выбирается и в последующем реализуется $T_{цвi}$ с минимальным значением.

Необходимо отметить, что наиболее проблематичен выбор рациональных режимов функционирования привода каретки с предметным столиком при размерах кристаллов менее 2,5–3 мм и соот-

Таблица — Изменение скорости каретки с предметным столиком при ее разгоне и торможении
Table — Changing the speed of the carriage with the object stage during its acceleration and braking

Разгон				Торможение			
t , с	V , мм/с	t , с	V , мм/с	t , с	V , мм/с	t , с	V , мм/с
0	0	0,028	12,886	0	25,143	0,028	12,104
0,004	1,96	0,03	13,843	0,004	25,077	0,03	11,209
0,006	3,032	0,032	14,799	0,006	24,467	0,032	10,316
0,008	2,971	0,034	16,011	0,008	23,386	0,034	9,2099
0,01	4,666	0,036	17,384	0,01	21,939	0,036	7,9845
0,012	5,406	0,038	18,659	0,012	20,639	0,038	7,1037
0,014	6,066	0,04	20,009	0,014	18,919	0,04	5,7126
0,016	7,405	0,042	20,694	0,016	17,369	0,042	4,9168
0,018	8,273	0,044	21,183	0,018	16,58	0,044	4,2615
0,020	9,296	0,046	22,47	0,020	15,719	0,046	2,6665
0,022	9,807	0,048	23,828	0,022	15,215	0,048	1,9941
0,024	10,815	0,05	24,698	0,024	14,19	0,05	1,127
0,026	12,724			0,026	12,892		

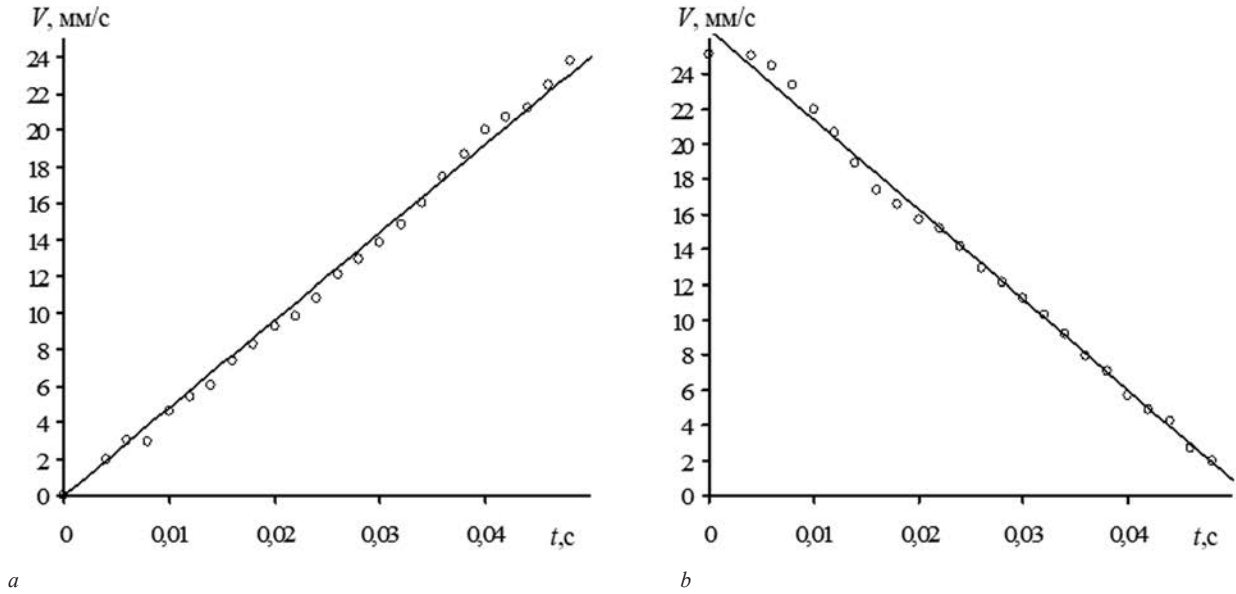


Рисунок 3 — Графики изменения скорости разгона (а) и торможения (b) каретки с предметным столиком
 Figure 3 — Graphs of changing the speed of acceleration (a) and braking (b) of the carriage with the object stage

ветствующих шагах перемещения, у которых при его разгоне не может быть достигнута рабочая скорость движения.

Пример использования методики выбора рациональных режимов функционирования привода каретки с предметным столиком зондового оборудования при его наладке. Результаты контроля изменения скорости разгона и торможения каретки с предметным столиком (см. рисунок 2 б) приведены в таблице.

Обработку приведенных в таблице данных осуществляем с использованием метода наименьших квадратов. Тогда величины ускорения:

- при разгоне в режиме плавности $q = 3$:

$$a_p = \frac{n_i \sum t_i V_i - \sum t_i \sum V_i}{n_i \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} = 518 \text{ мм/с}^2; \quad (3)$$

- при торможении в режиме плавности $q = 3$:

$$a_r = \frac{n_i \sum t_i V_i - \sum t_i \sum V_i}{n_i \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} = -510 \text{ мм/с}^2, \quad (4)$$

где n_i — количество зарегистрированных значений скорости.

Различия между значениями ускорений не существенны и связаны с погрешностью измерений. Изменение координаты каретки с пред-

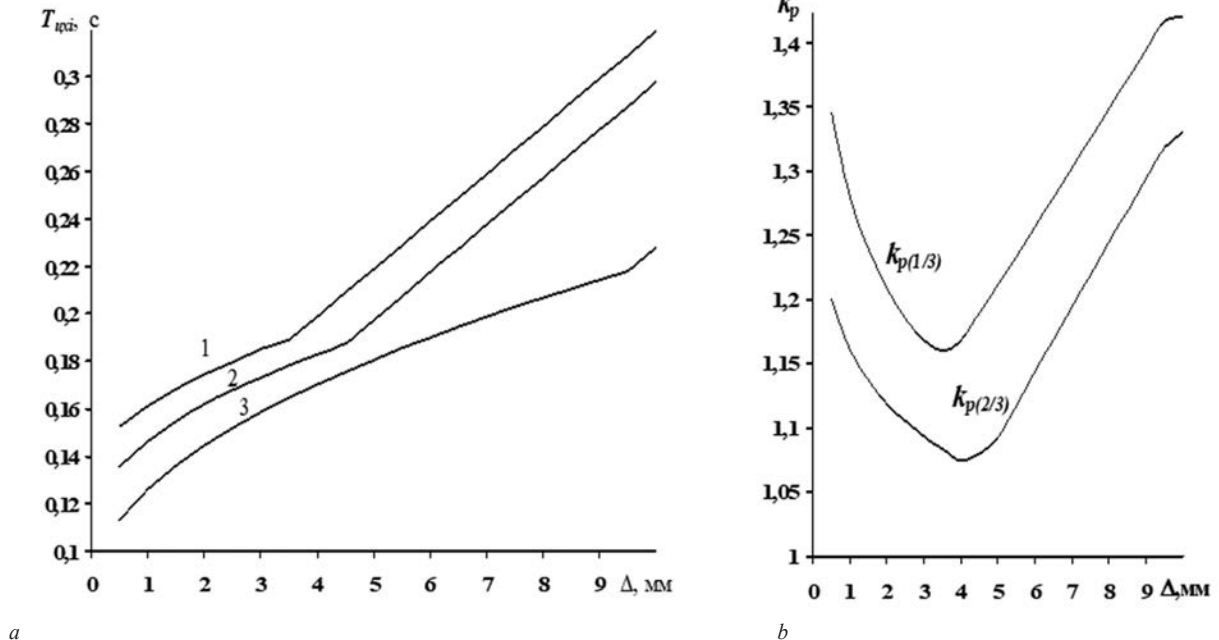


Рисунок 4 — Зависимость T_{wi} от режима плавности и шага перемещения (а) и отношение k_p длительности первого и второго режимов плавности к третьему (b): 1, 2, 3 — режимы плавности
 Figure 4 — Dependence of T_{wi} on the smoothness mode and the displacement step (a) and the ratio k_p of the duration of the first and second modes of smoothness to the third one (b): 1, 2, 3 — smoothness modes

метным столиком при ее разгоне (рисунок 3) в режиме плавности $q = 3$ с погрешностью менее 10 % может быть описано аналитической зависимостью

$$L(t) = k_L t^4, \text{ [мм]}, \quad (5)$$

где $k_L = 1,35 \cdot 10^9 \text{ мм/с}^4$.

При тестировании установки зондового контроля было установлено, что величина достигаемого ускорения и время затухания механических колебаний каретки с предметным столиком при достижении заданной координаты составляет при первом режиме плавности $a = 1011 \text{ мм/с}^2$ и $t_{\text{зх}} = 0,13 \text{ с}$, при втором — $a = 752 \text{ мм/с}^2$ и $t_{\text{зх}} = 0,11 \text{ с}$, при третьем — $a = 514 \text{ мм/с}^2$ и $t_{\text{зх}} = 0,084 \text{ с}$ соответственно. Скорость линейного перемещения, при его наличии, была принята 50 мм/с.

Таким образом, при изменении шага перемещения в диапазоне $\Delta = (0,5 \dots 10) \text{ мм}$ с использованием зависимостей (2) и (3) были получены графики, приведенные на рисунке 4.

Анализ рисунка 4 показывает следующее:

- время перемещения каретки с предметным столиком нелинейно зависит от режима плавности и шага перемещения Δ ;

- для рассматриваемой механической системы для всех трех режимов плавности суммарная длительность цикла перемещения на шаг Δ со временем затухания механических колебаний в основном определяется временем $t_{\text{зх}}$ этих затуханий, т. е. к наиболее эффективному можно отнести третий режим плавности, однако степень эффективности зависит от шага перемещения Δ и варьируется в диапазоне 1,098–1,420 (см. рисунок 4 а);

- к одному из наиболее эффективных путей сокращения длительности цикла перемещений каретки с предметным столиком на шаг Δ можно отнести введение активного гашения ее механических колебаний после достижения заданной координаты.

Заключение. Анализ результатов исследований позволил установить особенности, влияющие на длительность основных периодов горизонтального перемещения каретки с предметным столиком, обусловленные двумя факторами: режимом плавности перемещений и связанным с ним ускорением при разгоне и торможении, обеспечиваемыми настройкой контроллера управления электродвигателем, и шагом перемещения, соответствующего размеру кристалла.

Показано, что для конкретизированных инерционно-жесткостных и демпфирующих характеристик оборудования зондового контроля определение ускорений для каждого режима плавности и длительности затухания механических колебаний после перемещений каретки с предметным столиком в заданную координату может быть осуществлено в режиме отладки оборудования зондового контроля или автоматизировано с исполь-

зованием адаптивного управления, после чего эти данные заносятся в базу данных ЧПУ.

В разработанной методике выбора рациональных режимов функционирования привода каретки с предметным столиком зондового оборудования при переходных процессах с использованием базы данных и шага перемещения (размера кристаллов) для каждого режима плавности определяется циклограмма ее перемещения и суммарная длительность всего цикла, из которых выбирается и реализуется минимальный.

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. — 174 с.
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/Smirnov_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. Школык // Приборы и методы измерений. — 2012. — № 2. — С. 67–75.
6. Дайняк, И.В. Интегрированная система многокоординатных перемещений для сборочного оборудования микроскопии / 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. — 28 с.
8. Жарский, В.В. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / В.В. Жарский, С.Е. Карпович, И.В. Дайняк. — 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.М. Алексеевич. — СПб., 2015. — 127 с.
10. Ващенко, П.А. Моделирование ζ -координатных виброзащитных устройств оборудования электронной техники: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18, 05.13.12 / П.А. Ващенко. — Воронеж, 2009. — 213 с.
11. Козинец, А.В. 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 / А.В. Козинец, В.Л. Басинюк, Р.Е. Волкотруб // Механика машин, механизмов и материалов. — 2022. — № 4(61). — С. 38–45.
12. Ковенский, А.В. Мониторинг в эксплуатации параметров колебаний компонентов ответственных узлов мехатронных систем / А.В. Ковенский, А.В. Козинец, Е.А. Морозанов // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Обьединенный институт машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2022. — Вып. 11. — С. 61–65.

KOZINETS Alexei V.

Engineer¹

E-mail: Alex-2570@kbtcm.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.

Researcher of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”²

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 26 January 2023.

METHOD FOR SELECTING THE FUNCTIONING MODES OF THE CARRIAGE DRIVE OF PROBE EQUIPMENT DURING TRANSIENT PROCESSES. PART 2

The article presents the results of studies, the analysis of which made it possible to identify features that affect the duration of the main periods of horizontal movement by the carriage drive with the object stage of the probe control equipment, the main of which include the mode of smoothness (dynamics) of movement and the accelerations associated with it during acceleration and braking, provided by the setting of the motor controller, as well as the step of displacement. It is shown that for specific inertia-stiffness and damping characteristics of the probe control equipment, the determination of accelerations for each mode of smoothness and duration of damping of mechanical oscillations after the carriage with the object stage moves to a given coordinate can be carried out in the debug mode of the probe control equipment or automatically using adaptive control. A method is proposed for selecting rational operating modes for the carriage drive with an object stage of probe equipment during transient processes using a database and a displacement step (of crystal size), which makes it possible for each smoothness mode to determine the cyclogram of its displacement and the total duration of the entire cycle, from which the minimum cycle is selected and implemented.

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-47-54>

References

1. Karpovich S.E., Jarski V.V., Dainiak I.V. Pretsizionnye 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 proslezhivaniya 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 micro- and 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 sborochnogo 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. 28 p. (in Russ.).

8. Zharskiy V.V., Karpovich S.E., Daynyak I.V. *Sistemy mnogokoordinatnykh peremeshcheniy i ispolnitelnye mekhanizmy dlya pretsizionnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Systems of multicoordinate movements and actuators for precision technological equipment]. Minsk, 2013. 208 p. (in Russ.).
9. Mikhaylov M.A. *Sistema pretsizionnogo 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. 127 p. (in Russ.).
10. Vashchenko P.A. *Modelirovanie ℓ -koordinatnykh vibrozashchitnykh ustroystv oborudovaniya elektronnoy tekhniki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Modeling of ℓ -coordinate vibration protection devices for electronic equipment. Ph. D. Thesis]. Voronezh, 2009. 213 p. (in Russ.).
11. Kozinets A.V., Basiniuk V.L., Volkotrub R.E. Metodika vybora rezhimov funktsionirovaniya privoda karetki zondovogo oborudovaniya pri perekhodnykh protsessakh, obespechivayushchikh minimizatsiyu dlitelnosti tsikla zondirovaniya. Chast 1. Metodika issledovaniy mekhanicheskikh kolebaniy privoda predmetnogo stolika [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]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2022, no. 4(61), pp. 38–45 (in Russ.).
12. Kovensky A.V., Kozinets A.V., Morozhanov E.A. Monitoring v ekspluatatsii parametrov kolebaniy komponentov otvetstvennykh uzlov mekhatronnykh sistem [Monitoring in operation of vibration parameters of components of critical joints of mechatronic systems]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2022, iss. 11, pp. 61–65 (in Russ.).