



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.757;8;9

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук; Е.И. МАРДОСЕВИЧ, канд. техн. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

С.С. ПАПИНА; В.Г. ЛОМАКО
УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «Планар», г. Минск, Республика Беларусь

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРИВОД ЛИНЕЙНОЙ КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УПРАВЛЯЕМЫМ ТЯГОВЫМ УСИЛИЕМ

Рассмотрены вопросы конструирования линейных приводов с традиционными зубчато-ременными передачами для координатных систем технологического оборудования, используемого при резке алмазным кругом полупроводниковых пластин. Показаны возможности существенного улучшения их динамических качеств путем создания комбинированного привода, в котором дополнительно к основному электродвигателю в конструкцию введен еще один относительно маломощный программно-управляемый линейный электродвигатель. Его якорь связан непосредственно с подвижным столом. С помощью линейного электродвигателя создается дополнительное программно-управляемое тяговое усилие при его разгоне или торможении стола, что позволяет исключить возникновение собственных колебаний при достижении им рабочей скорости подачи или его остановке.

Ключевые слова: колебания, резание полупроводниковых пластин, программно-управляемый привод, управляемое тяговое усилие

Введение. К традиционному и наиболее широко используемому технологическому оборудованию при резке пластин из полупроводниковых материалов алмазным кругом можно отнести установки с программно-управляемыми приводами, состоящими, как это показано на рисунке 1, из мотор-редуктора с поворотным электродвигателем постоянного тока, зубчато-ременной передачей и подвижного стола на линейных направляющих [1]. Широкое использование приводов этого типа связано с их относительно невысокой стоимостью и простотой в обслуживании. При этом постоянно проводятся исследования по совершенствованию их основных компонентов и алгоритмов функционирования [2–5]. Ведутся также работы по созданию оборудования на базе применения более современных, но существенно более дорогих и более сложных в обслуживании линейных приводов прямого действия [6, 7].

При относительно невысокой цене приводов с зубчато-ременными передачами им присущ ряд недостатков, обусловленных возникновением собственных колебаний стола при его разгоне до требуемой в соответствии с технологией резания ско-

рости подачи. Вследствие этих колебаний при высоких скоростях подачи и относительно небольшой длине холостого хода в начальный момент взаимодействия алмазного круга с обрабатываемой полупроводниковой пластиной, в ряде случаев, на ней появляются сколы, что приводит к выбраковке части пластин. При этом снижается стойкость алмазного режущего диска.

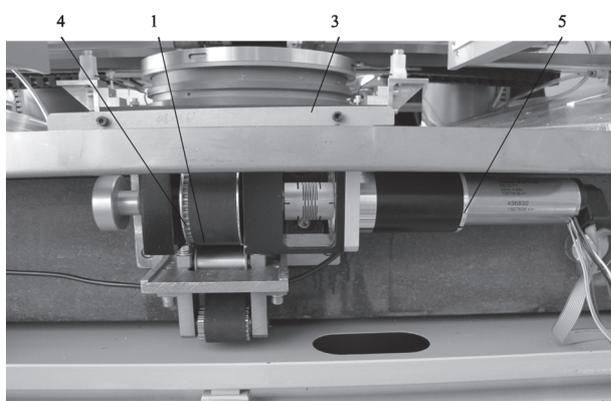
Для исключения сколов снижаются скорости и увеличивается длина холостого хода стола, однако это приводит к снижению производительности процесса резания.

Одним из путей решения этой проблемы может быть введение в конструкцию установки для резания полупроводниковых пластин алмазным кругом дополнительного линейного двигателя, имеющего относительно небольшую мощность, непосредственно связанного со столом и обеспечивающего создание дополнительного программно-управляемого тягового усилия [8].

Конструкция комбинированного привода с дополнительным программно-управляемым линейным электродвигателем. Условная схема комбинированного привода с традиционной зубчато-ременной передачей и



а



б

Рисунок 1 — Серийная установка для дисковой резки М-2085В (а) и ее программно-управляемый привод (б):

- 1 — зубчатый ремень; 2 — продольная направляющая;
 3 — подвижный стол, жестко связанный с зубчатым ремнем 1;
 4 — ведущий шкив, связанный с программно-управляемым мотор-редуктором; 5 — мотор-редуктор с программно-управляемой частотой вращения

дополнительным программно-управляемым линейным электродвигателем показана на рисунке 2.

К основным отличиям этой конструкции от традиционно используемых можно отнести введение в нее относительно маломощного линейного программно-управляемого электродвигателя, якорь которого непосредственно связан с подвижным рабочим столом. Это позволяет решить две основные задачи:

- обеспечить плавный разгон рабочего стола до рабочей скорости подачи S_p за требуемый период времени t_p на минимизированном расстоянии L_p , выход без ускорения и собственных колебаний стола на участок холостого хода, длина которого при отсутствии колебаний может быть сокращена до технологического минимума, и подвод плавно движущегося рабочего стола с разрезаемой полупроводниковой пластиной к инструменту;

- исключить или минимизировать демпфированием внутренней электромагнитной системой дополнительного линейного электродвигателя собственные колебания рабочего стола в процессе его врезания в полупроводниковую пластину и выхода алмазного круга из разрезаемой пластины.

При работе комбинированного привода с дополнительным программно-управляемым линейным электродвигателем, показанного на рисунке 2, основной электродвигатель постоянного тока через редуктор и зубчато-ременную передачу в течение определенного времени создает плавно увеличивающуюся составляющую тягового усилия F_{dc} , соответствующую тяговому усилию холостого хода F_{xx} . При этом скорость подачи стола возрастает до величины S_p и дальнейшее перемещение рабочего стола на направляющей осуществляется без ускорений с постоянной скоростью.

Дополнительный линейный электродвигатель, якорь которого непосредственно связан с рабочим столом, создает тяговое усилие, обеспечивающее при разгоне стола требуемый характер изменения ускорения, компенсирующий возникновение при разгоне стола инерционных нагрузок и снижение ускорения до нуля при достижении скорости подачи S_p .

Величина усилия F_{xx} определяется потерями на трение в трущихся сопряжениях направляющей и рабочего стола и сопротивлением обратимым деформациям траков для подвода электроэнергии: к размещенному на подвижном столе сервисным устройствам; якорию линейного электродвигателя модуля для создания дополнительного тягового усилия; системе съема диагностической информации с датчика ускорения, установленного на подвижном столе.

Увеличением от нулевой величины мгновенных значений составляющей тягового усилия $F_{dc}(t)$ до величины F_{xx} за период времени t_p обеспечивается плавное увеличение упругой деформации элементов кинематической цепи (преимущественно зубчатого ремня). Эта деформация соответствует деформированию элементов кинематической цепи при движении рабочего стола в режиме холостого хода.

В совокупности приведенная выше схема формирования основного и дополнительного тяговых усилий позволяет после разгона подвижного стола до скорости подачи S_p и снятия в этот момент дополнительного тягового усилия F_{da} минимизировать собственные колебания рабочего стола или их полностью устранить.

При постоянном напряжении электропитания величины тяговых усилий практически пропорциональны токам и мощности, потребляемой основным и дополнительным линейными двигателями. Поэтому реализация процесса управления тяговым усилием осуществляется следующим образом:

- предварительно определяются значения тяговых усилий F_{xx} холостого хода стола в диапазоне его рабочих подач S_p и соответствующих им значений

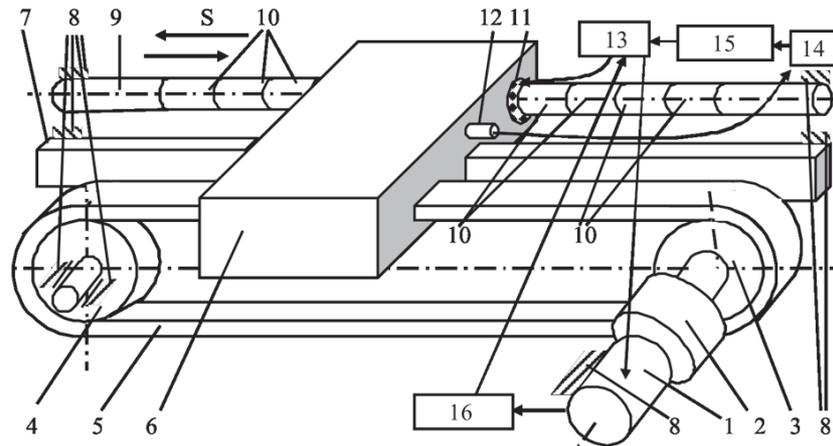


Рисунок 2 — Условная схема комбинированного привода с дополнительным программно-управляемым линейным электродвигателем: 1 — основной электродвигатель постоянного тока; 2 — редуктор; 3 — ведущий шкив; 4 — ведомый шкив; 5 — зубчатый ремень; 6 — подвижный стол, связанный с зубчатым ремнем 5; 7 — направляющая; 8 — основание; 9 — вал статора линейного электродвигателя; 10 — постоянные магниты статора, выполненные в виде втулок и входящие с зазором в сквозное отверстие, выполненное в подвижном столе 6; 11 — якорь линейного электродвигателя, выполненный в виде коаксиально установленных по отношению к постоянным магнитам 10 кольцевых катушек индуктивности, размещенных последовательно вдоль оси вала 9 в отверстии подвижного стола 6 и жестко связанных с ним; 12 — датчик ускорения, ориентированный в направлении движения подвижного стола 6 вдоль направляющей 7; 13 — программируемый модуль управления приводом; 14 — узкополосный фильтр, вход которого связан с выходом датчика ускорения 12; 15 — блок определения амплитуды собственных колебаний стола 6, вход которого связан с выходом узкополосного фильтра; 16 — блок контроля параметров функционирования электродвигателя 1

мощности N_{xx} , потребляемой электродвигателем постоянного тока;

- в соответствии с конкретизированным согласно технологии резания значением S_p и приведенными ниже зависимостями изменений тяговых усилий при постоянном напряжении электропитания ШИМ-модулированием тока (тяговые усилия пропорциональны величинам тока) формируются алгоритмы управления тяговыми усилиями основного и дополнительного электродвигателей, обеспечивающие увеличение скорости подачи рабочего стола до величины S_p и начала его подвода с постоянной скоростью к инструменту.

Для повышения эффективности управления электродвигателем постоянного тока используется блок контроля параметров и система обратной связи с модулем управления приводом.

При необходимости дополнительный линейный двигатель может быть эффективно использован для гашения колебаний, в ряде случаев возникающих после разгона рабочего стола до требуемой скорости подачи S_p при врезании алмазного круга в обрабатываемую пластину. В этом случае с выхода датчика ускорения снимается сигнал, который передается в узкополосный фильтр, где из него выделяются составляющая сигнала, соответствующая частоте собственных колебаний стола. Эта составляющая передается в блок определения амплитуды собственных колебаний, где преобразуется в цифровой вид. По цифровым данным оценивается градиент изменения сигнала, посредством аппроксимирования которого определяется амплитуда возникающих собственных колебаний подвижного стола, и значение этой амплитуды передается в программируемый модуль управления программно-управляемым линейным электродвигателем.

В модуле управления приводом формируется команда на создание периодически изменяющегося с частотой собственных колебаний тягового усилия, имеющего противоположную собственным колебаниям фазу. Эта команда передается на две кольцевые катушки индуктивности линейного электродвигателя и обеспечивает эффективное гашение колебаний.

Управление тяговым усилием. При реализации предлагаемого подхода мотор-редуктором создается изменяющееся по линейному закону тяговое усилие $F_{dc}(t)$

$$F_{dc}(t) = k_a F_{xx}(t + t_1), \quad (1)$$

а линейным программно-управляемым приводом, якорь которого связан со столом, — дополнительное тяговое усилие F_{da} , изменяющееся, как это показано на рисунке 3, по параболическому закону

$$F_{da}(t) = k_{da} F_{xx} - k_a F_{xx}(t - 0,5t_p - 0,5t_1)^2, \quad (2)$$

где k_a — коэффициент пропорциональности изменения величины F_{dc} времени t , c^{-1} ; F_0 — тяговое усилие, при котором начинается движение стола с состояния покоя, Н; k_{da} — безразмерное отношение максимального значения дополнительного тягового усилия к тяговому усилию холостого хода; k_a — коэффициент, характеризующий отношение максимального значения F_{da} к тяговому усилию F_0 и имеющий размерность c^{-1} ; t — текущее время, с; t_p — время, за которое скорость подачи подвижного стола достигнет требуемой величины рабочей подачи S_p , с; t_1 — время, в момент которого начинают работать основной и дополнительный двигатели привода, с.

В момент времени t_p зубчатый ремень упруго деформируется на величину δ_0 и скорость подачи стола достигает рабочего значения S_p . В этот мо-

мент величина основного тягового усилия имеет значение F_{xx} , откуда

$$k_d = 1/[t_p(1+t_1/t_p)]. \quad (3)$$

Отсюда:

$$F_{dc}(t) = F_{xx} \frac{t/t_p + t_1/t_p}{1+t_1/t_p}. \quad (4)$$

Так как в соответствии с принятой на рисунке 3 схемой при $t = 0$ суммарное тяговое усилие привода F равно тяговому усилию F_0 , при котором начинается движение стола с ускорением, обеспечивающим его разгон до рабочей подачи S_p , а при $t = t_p$ его ускорение $F_{da} = 0$, то

$$F_{da}(t) = F_{xx} \left(\frac{k_s}{t_1/t_p} - \frac{1}{1+t_1/t_p} \right) (t/t_p + t_1/t_p)(1-t/t_p), \quad (5)$$

где $k_s = F_0/F_{xx}$.

Условно для рассматриваемого случая примем увеличение силы F_0 до силы F_{xx} в процессе разгона рабочего стола до рабочей скорости подачи S_p пропорциональным времени разгона (в действительности это увеличение пропорционально изменению скорости подачи стола)

$$F_x(t) = F_{xx}[k_s + (1-k_s)(t/t_p)]. \quad (6)$$

При использовании привода без дополнительного линейного электродвигателя в процессе разгона подвижного стола массой m поддерживается постоянная сила тяги F_{dc}^* , обеспечивающая за период времени t_p на заданном расстоянии L_p увеличение скорости подачи S_p . Таким образом

$$F_{dc}^* = m \frac{S_p^2}{2L_p}. \quad (7)$$

Для удобства последующих исследований введем коэффициент k_f безразмерного отношения F_{dc}^* к F_{xx}

$$k_f = \frac{F_{dc}^*}{F_{xx}} = \frac{mS_p^2}{2F_{xx}L_p}. \quad (8)$$

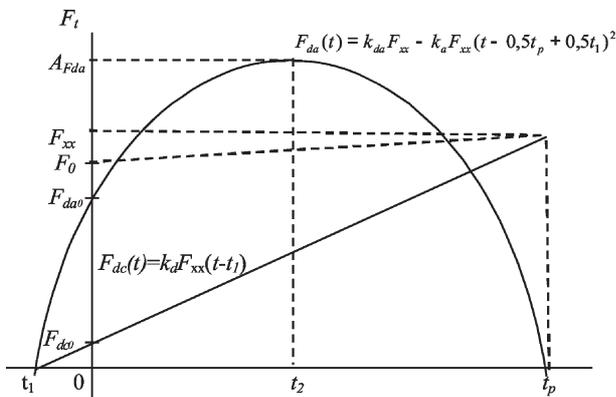


Рисунок 3 — Схема изменения основного и дополнительного тяговых усилий

Тогда с учетом выражений (4)–(8) и схемы на рисунке 3 относительные величины изменений в процессе разгона перемещения L_x и скорости подачи S_x рабочего стола, его ускорения a до рабочей скорости подачи S_p и реализуемая при этом суммарная мощность и мощность дополнительного линейного двигателя могут быть определены из зависимостей, приведенных к более удобному для исследований безразмерному виду:

$$\bar{a} = \frac{a}{a_{dc}} = \frac{a \cdot m}{F_{dc}^*} = \frac{1}{k_f} \left[\frac{A_{da} \left(\frac{t}{t_p} + \frac{t_1}{t_p} \right) \left(1 - \frac{t}{t_p} \right) + \frac{t/t_p + t_1/t_p}{1+t_1/t_p} - k_s - (1-k_s) \frac{t}{2t_p} \right]; \quad (9)$$

$$\bar{S}_x = \frac{S_x}{S_p} = \frac{t}{k_f t_p} \left\{ \frac{A_{da} \left[-\frac{t^2}{3t_p^2} + \frac{t}{2t_p} \left(1 - \frac{t_1}{t_p} \right) + \frac{t_1}{t_p} \right] + \frac{0,5t/t_p + t_1/t_p}{1+t_1/t_p} - k_s - (1-k_s) \frac{t}{2t_p} \right\}; \quad (10)$$

$$L_x = \frac{L_x}{L_p} = \frac{t^2}{k_f t_p^2} \left\{ \frac{A_{da} \left[-\frac{t^2}{6t_p^2} + \frac{t}{3t_p} \left(1 - \frac{t_1}{t_p} \right) + \frac{t_1}{t_p} \right] + \frac{t/(3t_p) + t_1/t_p}{1+t_1/t_p} - k_s - (1-k_s) \frac{t}{3t_p} \right\}; \quad (11)$$

$$\bar{N}_\Sigma = \frac{N_\Sigma}{N_{F_{dc}^*(\max)}} =$$

$$= \frac{A_{da}}{k_s^2} \frac{t}{t_p} \left\{ \frac{A_{da} \left[-\frac{t^2}{3t_p^2} + \frac{t}{2t_p} \left(1 - \frac{t_1}{t_p} \right) + \frac{t_1}{t_p} \right] + \frac{0,5t/t_p + t_1/t_p}{1+t_1/t_p} - k_s - (1-k_s) \frac{t}{2t_p} \right\} \times \quad (12)$$

$$\times \left\{ \frac{A_{da} \left[-\frac{t^2}{3t_p^2} + \frac{t}{2t_p} \left(1 - \frac{t_1}{t_p} \right) + \frac{t_1}{t_p} \right] + \frac{0,5t/t_p + t_1/t_p}{1+t_1/t_p} - k_s - (1-k_s) \frac{t}{2t_p} \right\};$$

$$\bar{N}_{da} = \frac{N_{da}}{N_{F_{dc}^*(\max)}} = \frac{A_{da}}{k_s^2} \frac{t}{t_p} \left(\frac{t}{t_p} + \frac{t_1}{t_p} \right) \left(1 - \frac{t}{t_p} \right) \times \left\{ \frac{A_{da} \left[-\frac{t^2}{3t_p^2} + \frac{t}{2t_p} \left(1 - \frac{t_1}{t_p} \right) + \frac{t_1}{t_p} \right] + \frac{0,5t/t_p + t_1/t_p}{1+t_1/t_p} - k_s - (1-k_s) \frac{t}{2t_p} \right\}; \quad (13)$$

где $A_{da} = \frac{k_s}{t_1/t_p} - \frac{1}{1+t_1/t_p}$, a_{dc} — ускорение, создаваемое основным электродвигателем при отсутствии дополнительного, м/с².

Результаты и их обсуждение. Характер изменений тяговых усилий, создаваемых основным и дополнительным электродвигателями, от отношения t_1/t_p и k_s показан рисунке 4.

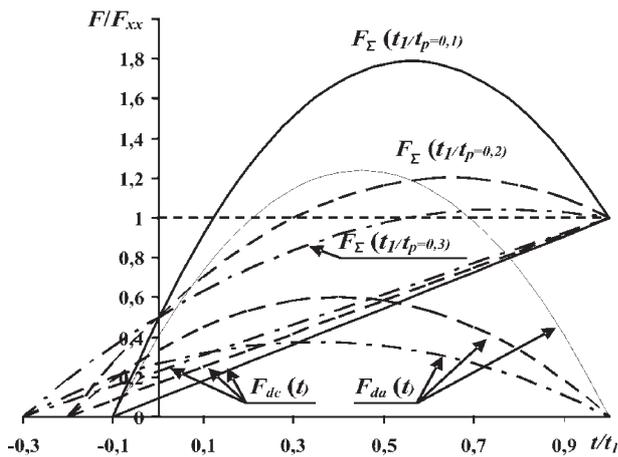
Анализ характера изменений параметров тяговых усилий показывает следующее. Величина тягового усилия, необходимого для обеспечения увеличения скорости подачи рабочего стола до S_p за требуемый период времени t_p существенно зависит от отношения t_1/t_p , причем эта зависимость нелинейна. Это отношение определяет характер упругого растяжения зубчатого ремня до начала движения рабочего стола (см. рисунок 4 а, б). При этом, с увеличением отношения t_1/t_p максимальное значение тягового усилия дополнительного линейного двигателя может быть снижено, однако одновременно с этим увеличивается «непроизводительный» период «подготовки» рабочего стола к движению. Этим периодом в ряде случаев можно пренебречь, поскольку величина t_p в современных технологических процессах, как правило, незначительна и не должна превышать $0,1 \div 0,2$ с.

Значительное нелинейное влияние на тяговое усилие дополнительного электродвигателя оказывает отношение интегрального сопротивления сил трения при холостом ходе со скоростью подачи S_p к сопротивлению сил трения в момент начала движения рабочего стола (см. рисунок 4 в, г). Уменьшение последних позволяет снизить максимальное тяговое усилие и требуемую мощность дополнительного линейного электродвигателя.

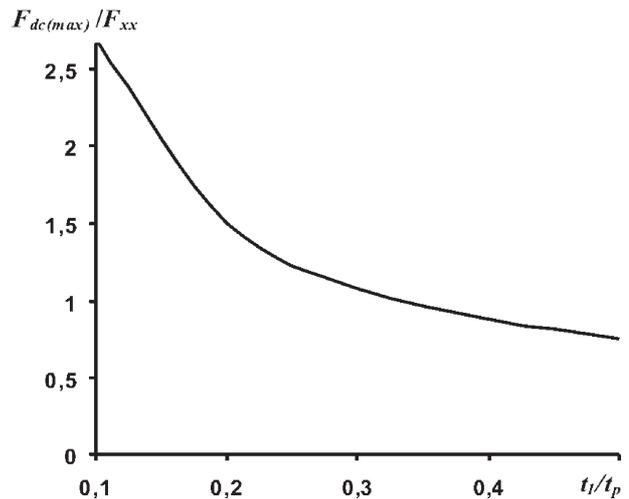
Характер изменения ускорения, скорости подачи, перемещения рабочего стола при его разгоне до рабочей скорости S_p при приложении к нему основного и дополнительного тяговых усилий в соответствии с рисунком 4 и необходимых для этого мощностей показан на рисунке 5.

Анализ графических зависимостей, приведенных на рисунке 5, показывает следующее.

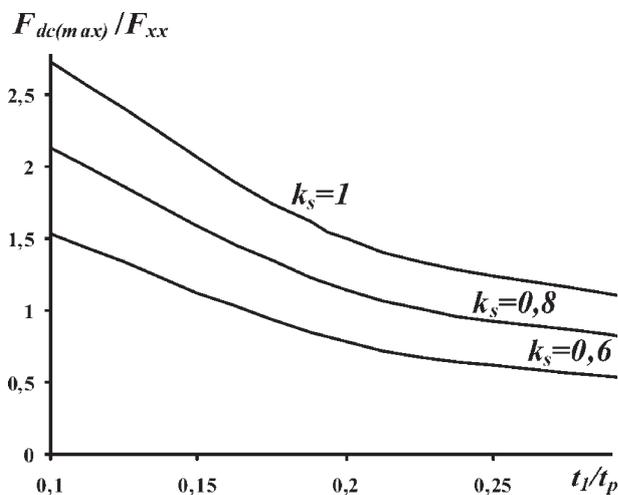
Ускорение подвижного стола, как и максимальное значение тягового усилия дополнительного линейного электродвигателя, существенно и нелинейно зависит от отношения t_1/t_p (см. рисунок 5 а). При этом характер изменения скорости подачи и переме-



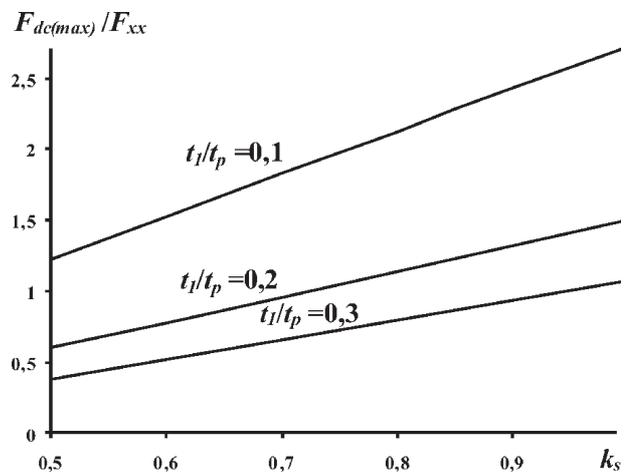
а



б



в



г

Рисунок 4 — Характер изменений параметров тяговых усилий (а) и их максимальных значений (б) при различных значения t_1/t_p (в) и k_s (г)

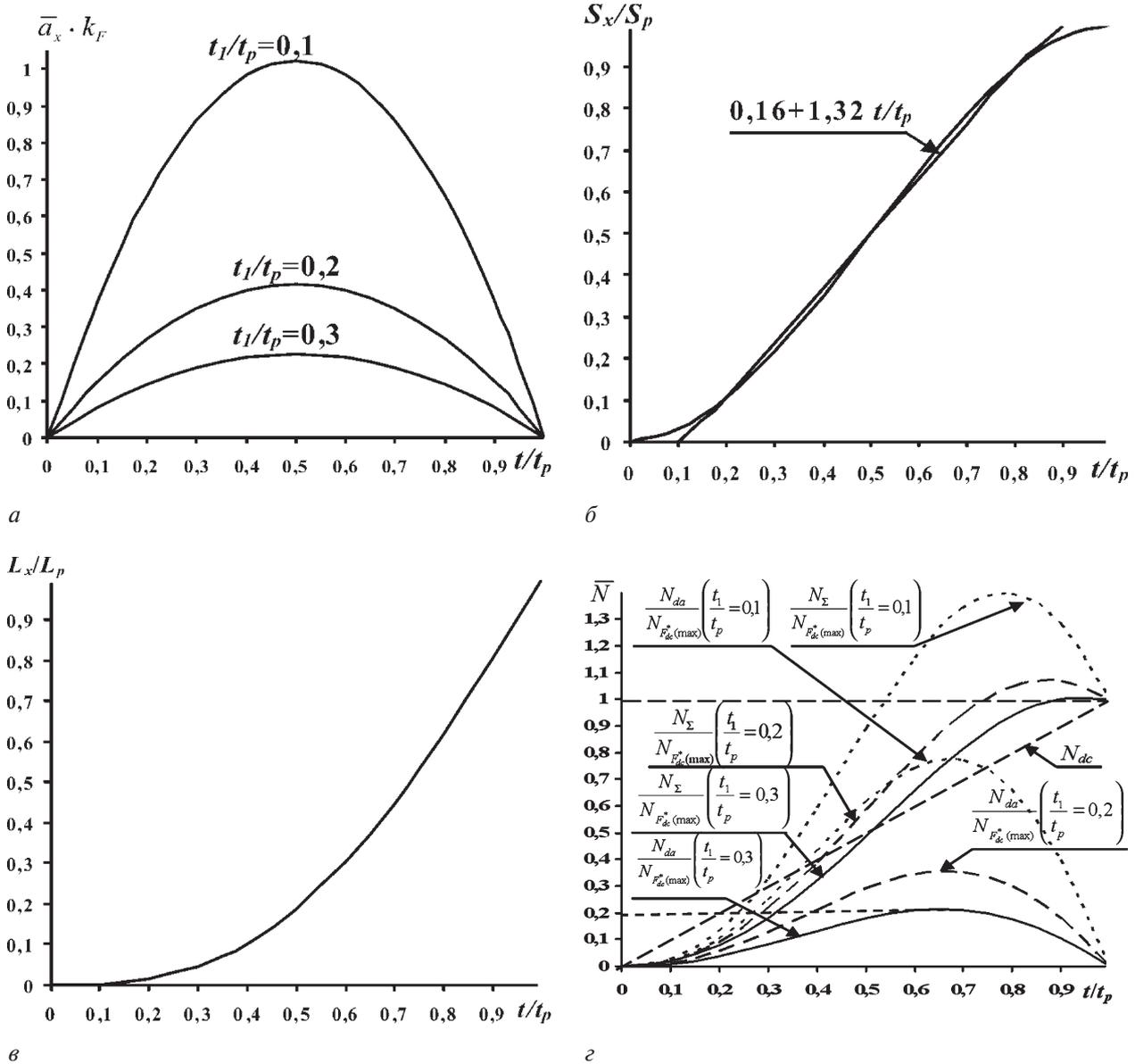


Рисунок 5 – Характер изменения ускорений (а), скорости подачи (б), перемещений (в) и мощностей (г) при разгоне стола до рабочей скорости подачи S_p

щений стола практически одинаков (см. рисунок 5 б, в) и для скорости подачи в диапазоне от $t_1/t_p = 0,1 \div 0,9$ и для перемещений в диапазоне $t_1/t_p = 0,4 \div 1$ он практически линейно зависит от времени.

Требуемая для управления тяговым усилием мощность дополнительного линейного электродвигателя в процессе разгона стола до рабочей скорости подачи S_p и привода с дополнительным линейным двигателем в целом существенно зависит от отношения t_1/t_p (см. рисунок 5 г). Однако уже при t_1/t_p суммарная мощность привода не превышает мощности исходного варианта его конструктивного исполнения, а при $t_1/t_p \geq 0,3$ мощность дополнительного линейного электродвигателя не превышает 20 % мощности основного привода при его работе на холостом ходу.

Как показывает анализ зависимостей (9–13), существенное влияние на приведенные выше па-

раметры оказывает величина коэффициента k_p , характеризующего инерционно-массовые и скоростные режимы функционирования привода. С его увеличением линейно возрастают требуемые для реализации технологического процесса мощности основного и дополнительного электродвигателей.

Приведенные выше закономерности характерны и для режима торможения стола.

Заключение. Создание комбинированного привода линейной координатной системы технологического оборудования с дополнительным линейным электродвигателем, якорь которого связан непосредственно с рабочим столом, позволяет исключить или существенно снизить собственные колебания стола, возникающие при изменении скорости подачи стола из-за размещения между основным приводом и подвижным столом упруго-податливого зубчатого ремня. Этот эффект достигается за счет

создания отдельных программно-управляемых тяговых усилий, одно из которых, создаваемое основным электродвигателем, обеспечивает плавную упругую деформацию зубчатого ремня до величины, соответствующей его упругой деформации при движении рабочего стола со скоростью подачи S_p ; другое, создаваемое дополнительным электродвигателем, обеспечивает увеличение скорости подачи стола до величины S_p таким образом, чтобы ускорение стола в момент достижения скорости подачи до S_p было равно нулю. При этом конструктивные параметры комбинированного привода и режимы его функционирования могут быть подобраны таким образом, чтобы его суммарная мощность не превышала исходной, а мощность дополнительного линейного электродвигателя составляла не более 20 % мощности холостого хода. При этом продолжительность работы линейного электродвигателя занимает крайне малую долю цикла обработки (не более 5 %) и конструктивно он может быть выполнен максимально просто.

Использование зависимостей (8–13) позволяет уже на стадии проектирования комбинированного привода линейной координатной системы технологического оборудования с управляемым тяговым усилием подобрать с учетом требуемого диапазона скоростей подачи рабочего стола и триботехнических характеристик взаимодействия трущихся сопряжений технически обоснованные конструктивные

параметры и мощности основного и дополнительного электродвигателей. При этом, использование данных зависимостей, преобразованных в алгоритмы системы управления приводами в процессе резки полупроводниковых пластин, позволяет оптимизировать процессы функционирования привода с позиций обеспечения гарантированного качества и минимизацию энергозатрат.

Список литературы

1. Оборудование для резки полупроводниковых пластин алмазными режущими дисками. — Режим доступа: www.planar.by/gu/about/kbtem-so/.
2. Автоматизированный электропривод / под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 542 с.
3. Башарин, А.В. Динамика нелинейных автоматических систем управления / А.В. Башарин, И.А. Башарин. — Л.: Энергия, 1974. — 199 с.
4. Борцов, Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 216 с.
5. Борцов, Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. — С-Пб.: Энергоатомиздат, 1992. — 287 с.
6. Прецизионные координатные системы на основе электропривода прямого действия / С.Е. Карпович [и др.]. — Минск: ГНПО «Планар», 2001. — 198 с.
7. Сервомоторы. Разработка и производство сервоприводов, бесколлекторных и вентильных двигателей. — Режим доступа: pravo.levonevsky.org/bazaby/org508/.../text0001.htm.
8. Привод перемещения координатного устройства и способ его управления / В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич, С.С. Папина, В.Г. Ломако. — Заявка на изобретение ЕФ 030/13; № 20130065; 03.05.13.

Basinyuk V.L., Mardosevich E.I., Papina S.S., Lomako V.G.

Combination actuator of the linear coordinate system of technological equipment with control propulsive force

The problems of constructing of linear drives with traditional toothed belt transmissions for coordinate systems of technological equipment, used for cutting semiconductor wafers with diamond wheel are discussed. The possibilities of a significant improvement in their dynamic qualities by creating a combination actuator wherein in addition to the main motor in the construction is entered another relatively low-powered program-controlled linear electromotor are shown. Its armature is directly connected with the movable table. With help of the linear electromotor additional program-controlled propulsive force is created under its acceleration or braking the table, it eliminates the occurrence of natural vibrations when it reaches cutting feed rate or stop.

Keywords: *wavering, cutting of the semiconductor wafers, program-controlled gear, control propulsive force*

Поступила в редакцию 15.08.2013.