

Нечаев Михаил Анатольевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
СКАНИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ МАГНЕТРОННОГО ВАКУУМНОГО
НАПЫЛЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Бекишев Рудольф Фридрихович

Научный консультант: кандидат технических наук,
доцент Дементьев Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Завьялов Валерий Михайлович

кандидат технических наук,
доцент Филипас Александр Александрович

Ведущая организация: Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники, г. Томск

Защита диссертации состоится «29» декабря 2010 г. в 17.00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.11 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в ауд. 217 учебного корпуса 8 по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 или на сайте: www.lib.tpu.ru

Автореферат разослан «29» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент

_____ Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы

Инновационное развитие экономики предполагает непрерывную работу в области создания новых специализированных технологических комплексов в самых разных областях науки и техники. Такие комплексы могут быть построены обладателями новой технологии как в единичном экземпляре под требования конкретного заказчика или для собственных исследовательских целей, так и в виде небольших серий. Во многих из них важным элементом, обеспечивающим качество технологического процесса, является электропривод.

Примером таких технологических комплексов являются установки магнетронного вакуумного (ионно-плазменного) напыления. Расширение области их применения и стремление к повышению конкурентоспособности ставят перед разработчиками новые задачи по обеспечению все более высокого качества работы установок и их составных частей.

Конструкция многих установок такова, что требуется обеспечивать относительное перемещение источника исходного материала (магнетрона) и обрабатываемой детали, особенно при обработке больших поверхностей, например, архитектурного стекла. В связи с этим электропривод сканирования является частью большинства установок магнетронного вакуумного напыления.

Разработка системы управления движением сканированием при проектировании очередной установки выявила необходимость предварительного проведения комплекса научных исследований, в частности, влияния электропривода на качество выпускаемой технологическим комплексом продукции.

Ведущими разработчиками установок магнетронного вакуумного напыления являются компании Sun Coating Company (США), Oerlikon Balzers AG, VON ARDENNE Anlagentechnik GmbH (Германия). В России разработкой таких установок занимаются лаборатория 23 НИТПУ, ООО "Прикладная Электроника" и другие.

Анализ публикаций показал, что вопросу научного обоснования разработки систем управления движением сканирования установок магнетронного вакуумного напыления в целом не уделялось достаточного внимания. В известных установках электропривод выбирался по инженерным методикам, исходя из требуемого диапазона регулирования и момента нагрузки, без оценки влияния кинематических цепей электропривода и необходимых постоянства и равномерности движения сканирования.

При разработке новых комплексов возникает также задача оптимизации структуры управления электроприводами с целью получения высоких технико-экономических характеристик и повышения качества продукции. Поэтому тему диссертационной работы можно признать актуальной.

Сделанные в работе выводы могут быть применимы и для других установок, обладающих следующими основными особенностями:

- наличие движения сканирования пучком с широкой диаграммой направленности;

- наличие в системе нескольких электроприводов, работающих независимо, но требующих координации.

Цель работы и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке и исследовании систем управления движением сканирования установок магнетронного вакуумного напыления.

Для достижения цели работы были поставлены следующие основные задачи:

- исследование объекта управления – магнетронных вакуумных установок для определения требований технологического процесса к электроприводу сканирования;
- анализ возможных вариантов построения систем управления электроприводами сканирования; разработка их имитационных моделей с учетом особенностей кинематики установок и их исследование;
- разработка практических рекомендаций для выбора или проектирования систем управления электроприводами сканирования, а также для выбора структуры управления комплексом с движением сканирования в целом;
- внедрение системы управления электроприводами сканирования установки магнетронного вакуумного напыления.

Методы исследования

Для решения поставленных задач в работе использованы методы теории управления и теории электропривода, численные методы решения дифференциальных уравнений и математического моделирования. Исследования проводились в ходе экспериментов на физических установках и с помощью методов имитационного моделирования в среде Simulink пакета Matlab.

Научная новизна

1. Разработана имитационная модель электропривода с червячным редуктором, учитывающая различные коэффициенты постоянных и переменных потерь редуктора в прямом и обратном направлении, что позволяет учитывать их влияние на динамику электропривода.
2. Предложен способ передачи кассеты от одного привода к другому при использовании движителя звездочка-цепь путем формирования оптимальной траектории движения электроприводов, повышающей равномерность движения кассеты.
3. Разработана математическая модель процесса роста толщины пленки, напыляемой магнетроном с заданным законом распределения зоны напыления, учитывающая параметры относительного движения магнетрона и обрабатываемой поверхности и позволяющая сформулировать требования к электроприводу.

Практическая ценность

1. Разработана структура системы управления электроприводами сканирования установки магнетронного вакуумного напыления «Опал-3-Про».

2. Сформулированы требования к электроприводам сканирования установок магнетронного вакуумного напыления.
3. Даны рекомендации по разработке систем управления движением сканирования установок магнетронного вакуумного напыления.
4. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение системы управления движением сканирования установки магнетронного вакуумного напыления.

Основные положения, выносимые на защиту

- математическая модель процесса роста толщины пленки, напыляемой магнетроном с заданным законом распределения зоны напыления, учитывающая параметры относительного движения магнетрона и обрабатываемой поверхности;
- имитационная модель электропривода с червячным редуктором, учитывающая различные коэффициенты постоянных и переменных потерь редуктора при передаче момента в прямом и обратном направлении;
- рекомендации по разработке систем управления движением сканирования установок магнетронного вакуумного напыления;
- разработанная система управления электроприводами сканирования установки магнетронного вакуумного напыления «Опал-3-Про».

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятых методик анализа и синтеза систем управления, применением широко известной среды моделирования Simulink пакета Matlab, а также проверкой результатов на экспериментальной и промышленной установках.

Реализация результатов работы

Результаты представленной работы использованы при разработке в ФТИ ГОУ ВПО НИТПУ установки магнетронного напыления «Опал-3-Про» для фирмы «Platech», Республика Корея, в ООО «НПФ Мехатроника Про», а также в учебном процессе на кафедре электропривода и электрооборудования ЭНИН ГОУ ВПО НИТПУ при подготовке студентов направления 140600, что подтверждено актами о внедрении.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», г. Томск, 2001–2003 гг.; на 8-ом международном корейско-русском симпозиуме (The 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology), г. Томск, 2004 г.; на международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2005 г.; на научно-технических семинарах кафедры электропривода и электрооборудования НИТПУ, на семинарах научно-технического совета ЭЛТИ НИТПУ, на научном семинаре лаборатории 23 НИТПУ в 2002–2010 гг.

Публикации

По результатам работы и выполненным исследованиям опубликованы 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 135 страниц машинописного текста. Работа содержит 77 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 70 наименований и одно приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определен объект исследования, сформулированы цель и задачи, показаны научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе разработаны и сформулированы требования к электроприводу сканирования установок магнетронного вакуумного напыления.

Установки магнетронного вакуумного напыления являются сложным высокотехнологичным оборудованием. В результате бомбардировки в вакууме поверхности исходного материала ускоренными ионами или нейтральными атомами формируется поток атомов, который осаждается на обрабатываемой поверхности в виде тонких (нано-) пленок.

Электропривод сканирования является частью большинства установок магнетронного вакуумного напыления. Обзор литературных источников показал, что в существующих установках применяются несколько типов кинематических схем: с движителем звездочка-цепь, роликовым приводом, тросовым приводом. В первых двух случаях возможно построение схемы как с одним приводом, так и по принципу многодвигательной установки.

Выбор конкретной кинематической схемы определяется особенностями установки и технического задания. Использование нескольких приводов упрощает кинематическую схему установки и облегчает построение больших модульных установок, но при этом появляется задача согласования скоростей вращения. Использование движителя звездочка-цепь при нескольких электроприводах требует решения задачи передачи рабочего органа от одной звездочки к другой. Использование линейных двигателей является перспективным, однако накладывает более высокие требования к точности изготовления конструктивных элементов вакуумной камеры и дороже других вариантов.

Важной задачей при проектировании электропривода является оценка его влияния на качество технологического процесса, которая дает требования технологического процесса к электроприводу. Для решения этой задачи на основании имеющихся экспериментальных индикатрис скорости роста толщины пленки в зависимости от расстояния от центра магнетрона в поперечном направлении найдена аналитическая функция, состоящая из участков кривых нормального распределения, описывающая эти индикатрисы:

$$I_V(\Delta l) = I_{V1} \cdot e^{-\frac{\Delta l^2}{2\sigma_1^2}} \text{ при } |\Delta l| = \{0, l_C\}; \quad I_V(\Delta l) = I_{V2} \cdot e^{-\frac{\Delta l^2}{2\sigma_2^2}} \text{ при } |\Delta l| = \{l_C, \infty\}, \quad (1)$$

где Δl – расстояние от продольной оси магнетрона до точки на обрабатываемой поверхности; σ_1, σ_2 – дисперсии распределения индикатрис; I_{V1}, I_{V2} – максимумы индикатрис; l_C – расстояние от продольной оси магнетрона до границы индикатрис.

Для точки обрабатываемой поверхности, расположенной на расстоянии l_0 от точки отсчета (рис. 1) процесс роста толщины пленки при нулевых начальных условиях можно представить следующим образом

$$h(t, l_0) = \int I_V(l(t), l_0) dt. \quad (2)$$

С помощью выражения (2) можно получить математическую модель роста толщины пленки, напыленной при заданной функции скорости сканирования $v(t)$. Если для упрощения принять индикатрису как $I_V(l) = I_{V1} \cdot e^{-\frac{l^2}{2\sigma_1^2}}$, то модель может быть представлена следующим образом

$$h(l_0) = \int_0^{t_K} I_{V1} \cdot e^{-\frac{(l(t)-l_0)^2}{2\sigma_1^2}} dt; \quad l(t) = \int v(t) dt, \quad (3)$$

где $l(t)$, $v(t)$ – перемещение и скорость магнетрона относительно обрабатываемой поверхности, а t_K – время окончания напыления поверхности.

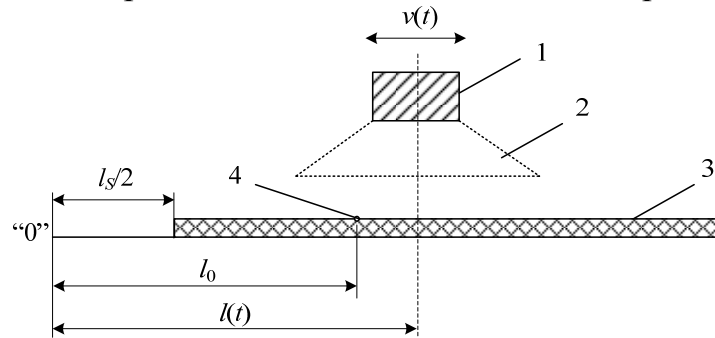


Рис. 1. Схема напыления: 1) магнетрон; 2) зона напыления; 3) обрабатываемая поверхность; 4) положение исследуемой точки на поверхности на расстоянии l_0 от края; $l(t)$ – относительное перемещение магнетрона и поверхности

Для исследования влияния типовых периодических и аperiodических законов отклонения скорости от заданной (функция $v(t)$ в выражении (3)) на конечный профиль напыления пленки в среде Simulink пакета MATLAB разработана имитационная модель по выражению (3) с учетом (1).

Результаты исследований на модели для случая неравномерности скорости движения магнетрона, выраженной в наличии гармонической составляющей с постоянной амплитудой δv_{MAKC} и угловой частотой ω показали, что чем больше частота колебания, тем в меньшей степени колебание скорости перемещения оказывает влияние на неравномерность покрытия. На рис. 2 показаны пример профиля пленки для данного случая (а) и зависимости отношения максимального относительного отклонения толщины пленки от среднего значения к амплитуде гармонической составляющей в функции частоты $\delta h_{MAKC} / \delta v_{MAKC} = f(\omega)$ при разных средних скоростях v_0 (б).

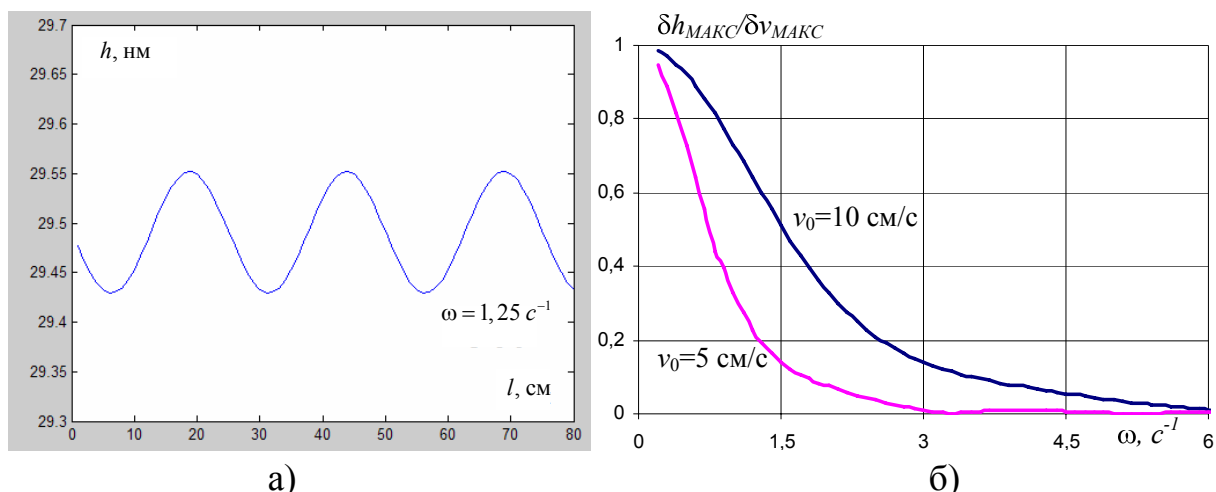


Рис. 2. Профиль пленки при наличии гармонической составляющей с частотой ω (а) и зависимости отношения $\delta h_{MAKC} / \delta v_{MAKC}$ от частоты ω (б)

Исследования показали, что оценку степени влияния колебаний скорости перемещения на неравномерность покрытия удобнее проводить с помощью предложенных специальных параметров L_V и K_V . Физический смысл параметра $L_V = v_0 T$ – расстояние, которое проходит кассета за период T одного колебания гармонической составляющей скорости при средней скорости v_0 . Если же используются магнетроны с разной шириной луча, то удобнее использовать параметр $K_V = L_V / l_S$, который характеризует соотношение между расстоянием L_V и шириной зоны напыления l_S .

На рис. 3 показана зависимость отношения $\delta h_{MAKC} / \delta v_{MAKC}$ от времени провала скорости dt при однократном отклонении скорости сканирования от средней $v_0 = 10$ см/с на величину δv_{MAKC} для магнетрона шириной 12 см.

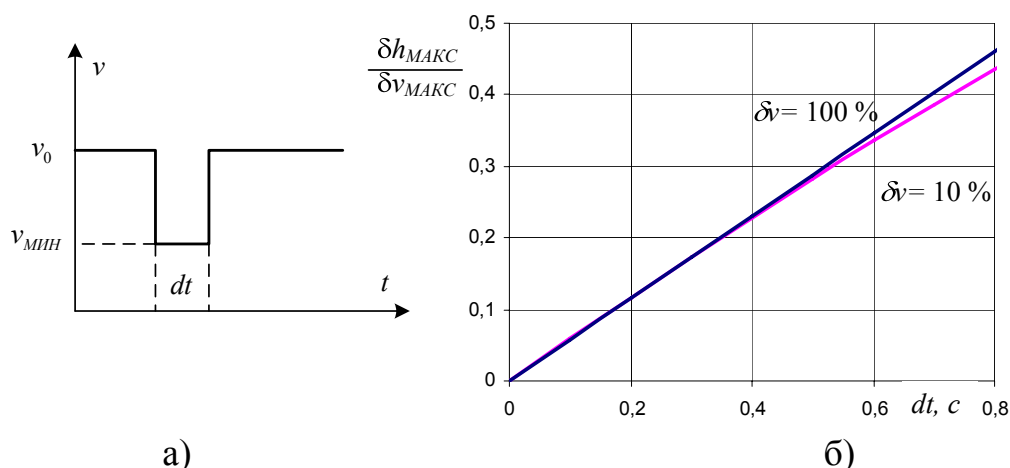


Рис. 3. Зависимость отношения $\delta h_{MAKC} / \delta v_{MAKC}$ от времени провала скорости dt (б) при заданной форме кривой скорости (а)

Проведенный анализ показал, что главные особенности технологического процесса магнетронного вакуумного напыления следующие:

- обрабатываемое изделие движется в вакуумной камере, а на пути следования обрабатываемого изделия или магнетрона, как правило, находятся вакуумные затворы;

- в большинстве случаев требуется реверсивное возвратно-поступательное движение обрабатываемого изделия; процессы разгона и торможения рабочего органа осуществляется вне зоны напыления, однако инерционность рабочего органа и особенности кинематики требуют решения задачи формирования оптимальной траектории движения;

- требуемый диапазон регулирования скорости не менее 1:5... 1:10;

- общей для всех типов установок задач для электропривода является обеспечение точности поддержания средней скорости перемещения рабочего органа, равной требуемой точности толщины напыляемой пленки при равномерности перемещения, определяемой параметрами магнетрона, скоростью перемещения и временем (периодом) отклонения скорости от среднего значения.

С учетом этих особенностей основные задачи управления движением сканирования можно разделить на две группы: задачи технологические и собственно задачи управления движением сканирования.

К задачам управления движением можно отнести задачи обеспечения равномерности движения и согласования скоростей приводов, если их несколько.

К технологическим задачам можно отнести следующие задачи: формирование заданной траектории движения с учетом особенностей кинематики, согласование работы электроприводов с другим технологическим оборудованием, включая связь с верхним уровнем управления, интеграцию измерительного процесса с задачами управления движением; сбор информации с датчиков.

Вторая глава посвящена технологическим задачам построения систем управления движением сканирования.

Обобщенную схему управления технологическим процессом можно представить в виде, показанном на рис. 3.

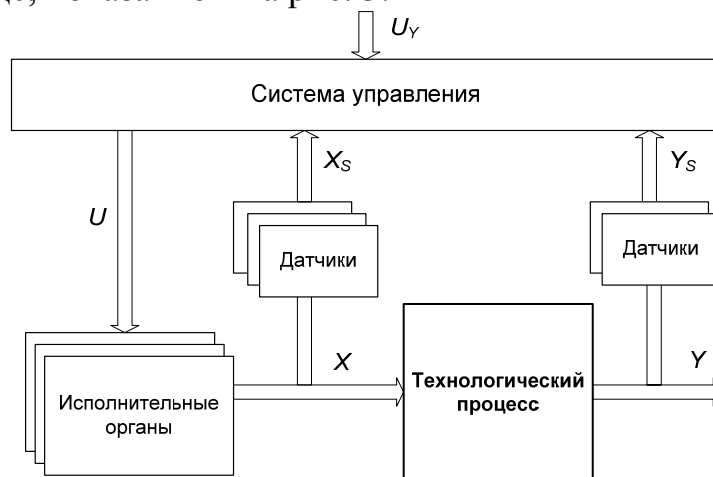


Рис. 3. Обобщенная схема управления технологическим процессом

Результат выполнения технологического процесса можно представить функционалом от вектора входных координат самого технологического процесса X и вектора параметров процесса $C_{ТП}$:

$$Y = F(X, C_{ТП}),$$

а с учетом системы управления технологическим процессом в следующем виде

$$Y = F(U_y, C),$$

где U_Y – задание на ТП; C – вектор параметров всей системы, включая ТП, СУ, датчики, исполнительные органы и связи между ними. Таким образом, одной из составляющих, обеспечивающих качество выполнения ТП, является электропривод.

Система управления, показанная на рис. 3, технически может быть реализована разными способами. Значительная часть производственных комплексов реализует ряд типовых технологических процессов с помощью типовых технических средств. Типовые средства построения систем автоматизации в промышленности, как правило, обладают универсальностью и создаются для удовлетворения требований наиболее распространенных задач.

Реализация вновь разрабатываемых высокотехнологичных комплексов часто не может быть осуществлена с помощью стандартных типовых средств автоматизации, или же построение комплекса на их основе может оказаться неоправданно дорогим, или оборудование может быть слишком большим по размерам.

В этом случае элементы комплекса могут быть разработаны специально для решения имеющейся задачи. В диссертационной работе рассмотрены следующие варианты реализации комплексов со сканирующим движением: на основе типовых средств автоматизации; с разработкой специализированных контроллеров при использовании комплектных электроприводов (ЭП); на основе полностью специализированного решения, включая разработку ЭП; на основе преобразователя частоты с функцией программируемого логического контроллера. При выборе вариантов необходимо учитывать технико-экономические и массогабаритные показатели, срок выполнения проекта, наличие требуемых технических средств в номенклатуре выпускаемой продукции.

Задача снижения динамических нагрузок механической системы решается формированием заданной траектории движения электропривода на участках разгона и торможения с необходимым ограничением ускорения. При необходимости может быть сформирована и S -образная траектория разгона/торможения с ограничением второй производной скорости. Это же позволяет снизить динамические нагрузки на кинематику за счет выбора зазора на малой скорости на начальном участке траектории движения.

Еще одной из задач, потребовавших решения при проектировании системы, стала задача обеспечения безостановочной передачи при использовании многодвигательной схемы с двигателями типа звездочка-цепь. Кинематическая схема устройства показана на рис. 4.

Использование этой схемы приводит к изменениям скорости рабочего органа в процессе передачи кассеты с последующим механическим ударом, т. к. в кинематической цепи вал двигателя–кассета есть зазор $\varphi_3 = \varphi_1 \pm \varphi_{3B}/2$, где φ_1 – постоянная, а $\pm \varphi_{3B}/2$ – случайная составляющие. Исследования показали, что приведенный к линейному перемещению зазор в 1 см при скорости сканирования 10 см/с может дать остановку кассеты до 0,09 с, что в соответствии с рис. 3 даст отклонение толщины пленки в 6 %, а это в случае напыления интерференционной пленки уже воспринимается как другой цвет.

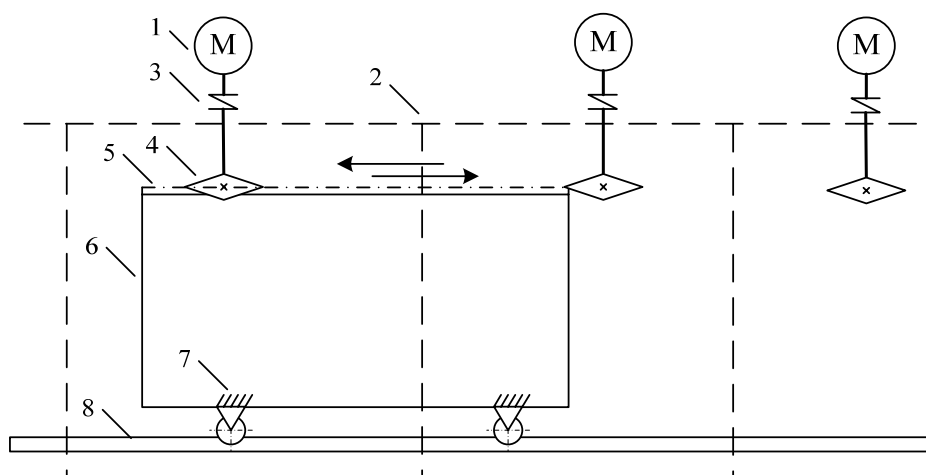


Рис. 4. Кинематическая схема перемещения кассеты несколькими приводами с движителем звездочка-цепь: 1) приводы звездочек, 2) границы вакуумных камер, 3) муфты, 4) звездочки, 5) цепь, 6) кассета со стеклом, 7) ролики кассеты, 8) направляющие

Предложены способы согласованного управления электроприводами, которые существенно уменьшают колебания скорости и снижают возможность механических ударов (рис. 5). Задача решается за счет разности скоростей звездочек на этапе передачи, которая позволяет заранее выбирать зазор принимающей звездочки.

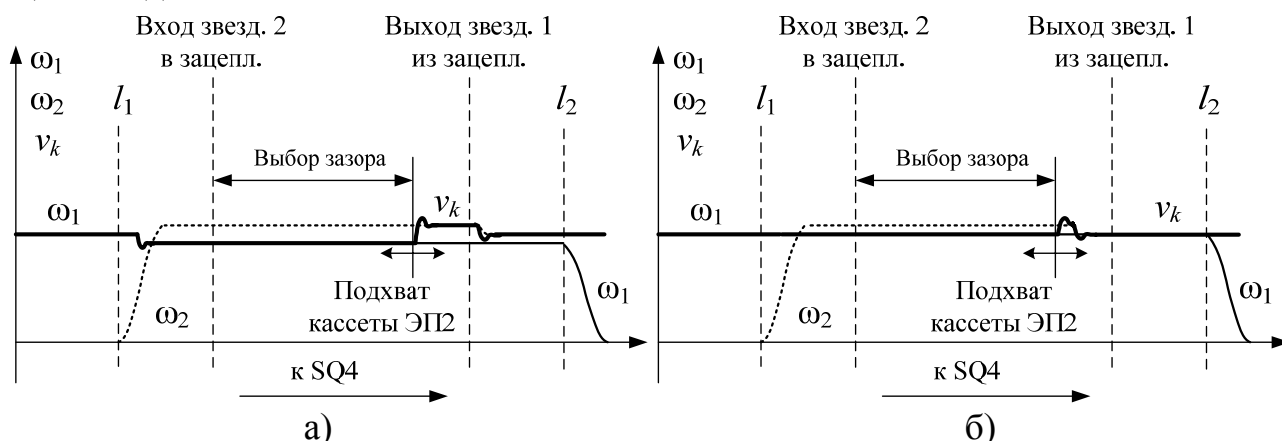


Рис. 5. Алгоритмы управления ЭП на этапе передачи кассеты

Предложено три алгоритма работы, требующих различной организации схемы. Наиболее простой вариант пояснен рис. 5, а. При достижении кассетой положения l_1 включается электропривод ЭП2, при этом скорость вращения второй звездочки ω_2 задается несколько большей, а первой несколько меньше заданной. Разность скоростей звездочек приводит к тому, что через некоторое время осуществится подхват кассеты второй звездочкой до выхода отдающей звездочки из зацепления, а значит нет условий для снижения скорости кассеты (или даже остановки) на время выбора зазора с последующим ударом. Недостатком данного метода можно признать необходимость оценки величины зазора в кинематической цепи.

Если в системе управления электроприводом есть информация о нагрузке электродвигателя, то алгоритм можно усовершенствовать (рис. 5, б) – скорость электропривода ЭП1 можно не снижать, а момент зацепления отслеживать по

величине нагрузке, снижая скорость ЭП2 до заданной сразу после зацепления. В этом случае при времени работы на скорости, большей заданной на 10 %, в течении 0,1 с (времени реакции) даст отклонение толщины пленки около 0,6 %.

Устранить случайную составляющую $\pm \varphi_{зв}/2$ можно согласованием углового положения звездочек так, чтобы звездочка входила в зацепление безударно. Этого возможно при наличии датчиков положения на выходных валах редукторов и при соответствующем формировании траектории движения.

Третья глава посвящена вопросам разработки систем управления электроприводами сканирования и их имитационному моделированию.

Как показано в первой главе одно из главных требований к электроприводам сканирования – обеспечение равномерности движения. Для случая регулируемого электропривода основные причины, вызывающие отклонение скорости рабочего органа от заданной, следующие:

1. Особенности кинематической цепи электропривода. Недостатки кинематической цепи (люфты, неточность изготовления деталей) и упругие деформации могут приводить к колебаниям скорости рабочего органа даже при равномерном вращении вала двигателя. Необходимо учитывать и резонансные частоты механизма, колебания на которых могут быть усилены системой автоматического управления;
2. Ошибка датчика скорости (перемещения) и измерительной схемы;
3. Температурная и временная нестабильность аналоговых элементов системы управления;
4. Моментная ошибка, вызванная наличием момента нагрузки на валу электропривода;
5. Ошибки, связанные с особенностями работы системы автоматического управления.

Некоторые из этих ошибок могут быть компенсированы системой автоматического управления, в частности, в значительной мере ошибки 3 и 4. Ошибки, вызванные особенностями кинематической цепи, с помощью системы управления могут быть компенсированы лишь частично. При этом наиболее важно обеспечить точность датчика регулируемой величины и измерительной схемы.

В работе рассмотрены вопросы выбора датчика скорости и места его установки. Экспериментально было установлено, что при частотах квантования более чем на порядок превышающих полосу пропускания электропривода по скорости минимальная скорость, на которой импульсный характер сигнала с датчика скорости не оказывает существенного влияния на работу системы определяется ситуацией, когда на один такт расчета от датчика приходит в среднем один импульс.

Источниками неравномерности могут стать любые элементы кинематической системы. Это явление может быть обусловлено как неточностью изготовления деталей, так и причинами, внутренне присущими этим элементам. Например, дисбаланс вращающихся деталей, удары в зубчатых передачах могут

вызывать вынужденные колебания элементов системы. Параметрические колебания возникают при наличии какого-либо переменного параметра, например, переменной жесткости.

В работе проанализирована работа червячного редуктора с точки зрения обмена энергией между массами двухмассовой механической системы (ДМС).

На рис. 6 представлена механическая часть электропривода в виде ДМС с упругим звеном. Редуктор находится непосредственно за первой массой.

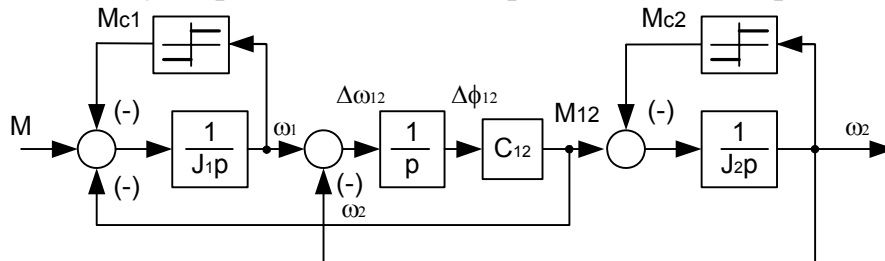


Рис. 6. Механическая часть электропривода в виде ДМС

Данная схема предполагает, что моменты между массами передаются без потерь в редукторе, либо потери представляются в виде постоянной величины и учитываются как составляющие статической нагрузки массы M_{C1} . Момент инерции редуктора учтен в первой массе J_1 . Передаточное число редуктора i учитывается при приведении параметров элементов схемы к скорости одной из масс по известным формулам.

Обмен осуществляется через упругий элемент, а передаваемый им момент M_{12} пропорционален углу закручивания $\Delta\phi_{12}$:

$$M_{12} = C_{12} \cdot \Delta\phi_{12} = C_{12} \cdot \int (\omega_1 - \omega_2) dt,$$

где ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения первой и второй масс; C_{12} – жесткость упругой связи между массами.

Этот момент прикладывается к колесу червячного редуктора. В зависимости от условий работы упругий момент M_{12} может быть как положительным, так и отрицательным. В динамике знак момента может меняться постоянно. Передаваемую через редуктор мощность можно представить как $P_{12} = M_{12} \cdot \omega_1$.

Тогда направление передачи энергии через редуктор определяется знаками упругого момента M_{12} и скорости первой массы ω_1 . Если знаки одинаковы, то энергия передается от первой массы ко второй. Если разные – то от второй к первой. Структурные схемы механической части электропривода будут различны для прямого и обратного направления передачи энергии через редуктор.

При передаче момента в прямом направлении от первой массы ко второй упругий момент является выходным моментом редуктора и движущим для второй массы, т. е. $M_{12} = M_{C2} + M_{д2}$, где $M_{д2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}$ – динамический момент второй массы. Входной момент редуктора (момент на валу червяка) является моментом нагрузки для первой массы

$$M_{ex1} = M_{12} + M_{нос.пр} + M_{пер.пр} = M_{12} + a_{пр} \cdot M_{ред.н} + b_{пр} \cdot M_{12},$$

где $M_{\text{пос.пр}}$, $M_{\text{пер.пр}}$, $a_{\text{пр}}$, $b_{\text{пр}}$ – постоянные и переменные потери в редукторе в прямом направлении и соответствующие им коэффициенты потерь, $M_{\text{ред.н}}$ – номинальный момент редуктора.

В соответствии с этим уравнением и на основе рис. 6 представим структурную схему ДМС при передаче момента через редуктор в прямом направлении в виде схемы рис. 7, а.

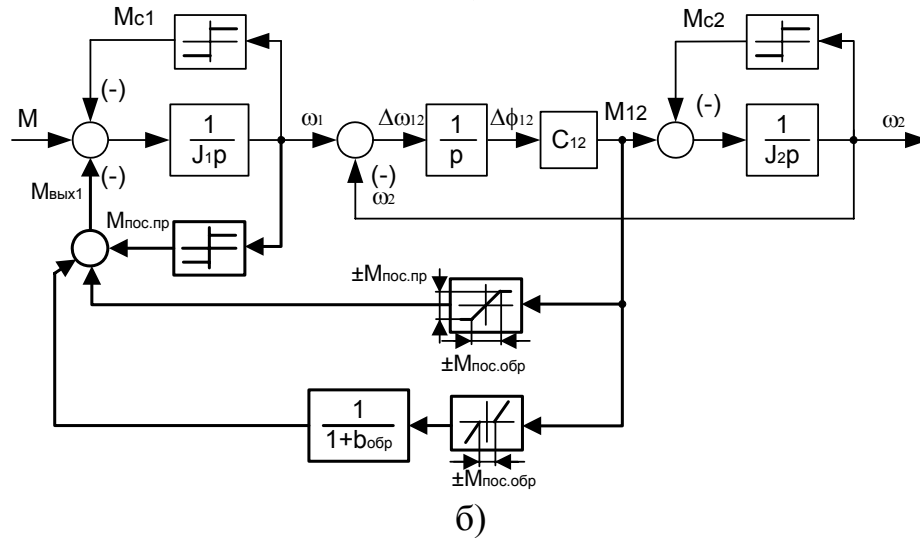
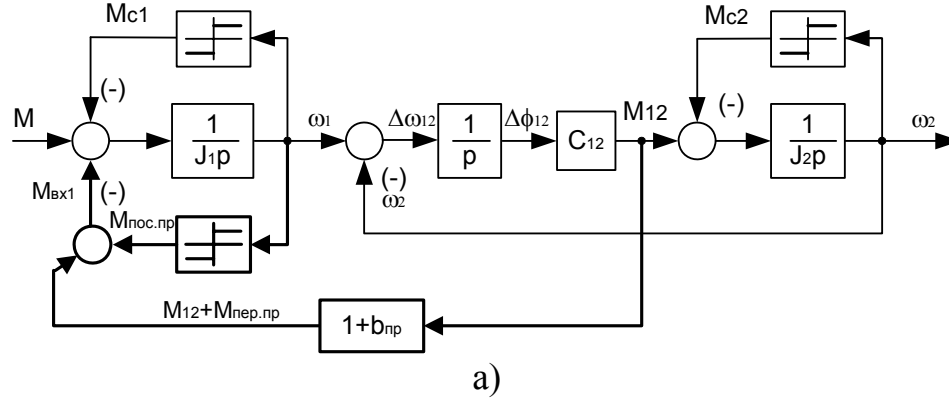


Рис. 7. Структурная схема ДМС с червячным редуктором:

а) при передаче момента в прямом направлении; б) при передаче момента в обратном направлении

При обратном направлении передачи момента упругий момент M_{12} является входным редуктора на валу колеса. Выходной момент редуктора на валу червяка для этого режима определяется уравнением

$$M_{\text{вых1}} = (M_{12} - M_{\text{пос.обр}}) - M_{\text{пер.обр}} = (M_{12} - a_{\text{обр}} \cdot M_{\text{ред.н}}) - b_{\text{обр}} \cdot M_{\text{вых1}},$$

где $M_{\text{пос.обр}}$, $M_{\text{пер.обр}}$, $a_{\text{обр}}$, $b_{\text{обр}}$ – постоянные и переменные потери в редукторе в обратном направлении и соответствующие им коэффициенты потерь.

Тогда

$$M_{\text{вых1}} = \frac{(M_{12} - a_{\text{обр}} \cdot M_{\text{ред.н}})}{1 + b_{\text{обр}}}.$$

Передача момента через редуктор в обратном направлении становится возможной, если упругий момент превысит постоянные потери в редукторе

$$(M_{12} - M_{\text{пос.обр}}) > 0.$$

Если это условие не выполняется, то постоянные потери в редукторе в общем случае преодолеваются моментами и со стороны червяка, и со стороны колеса. Структурная схема, соответствующая режиму обратной передачи энергии показана на рис. 7, б.

Данные структурные схемы смоделированы в среде Simulink пакета Matlab. Исследования показали, что при использовании червячного редуктора в электроприводе с большим моментом инерции механизма необходимо учитывать различные коэффициенты постоянных и переменных потерь редуктора в прямом и обратном направлении.

В случае, если J_2 и J_1 соизмеримы, и особенно при $J_2 \geq J_1$, отсутствие канала возврата запасенной энергии может оказывать существенное влияние на процессы в приводе, особенно при торможении. Чем меньше КПД обратной передачи, тем больше динамические нагрузки на механику электропривода. Кроме того, учет неединичного КПД прямой передачи червячного редуктора введением звена в канале упругого момента позволяет учесть редуцирование не только момента статической нагрузки на валу второй массы, но и динамического момента.

Что касается обеспечения постоянства скорости движения, то в литературе показано, что добиться высокой точности стабилизации скорости (порядка 0,1...0,01 %) в широком диапазоне скоростей и температур с помощью аналоговых методов затруднительно. В качестве наиболее распространенных способов обеспечения стабилизации скорости в цифровых и цифро-аналоговых системах используют системы с периодическим отсчетом, когда счет импульсов ведется за единицу времени или за угол поворота (с обратной связью по скорости), и с непрерывным отсчетом на основе принципа интегрального управления (следающая в режиме равномерной заводки).

Для привода сканирования более удобной может быть признана система управления следающим электроприводом, реализованная по трехконтурной схеме подчиненного регулирования и работающая в режиме равномерной заводки, т. к. она обеспечивает не только высокое качество поддержания скорости вращения, но и дает возможность достаточно просто реализовать синхронное движение двух и более механически несвязанных между собой валов путем слежения за одной виртуальной осью, а также дает удобный интегральный показатель при отслеживании нештатных ситуаций – ошибку слежения. Информация о положении рабочего органа дает и полезную технологическую информацию.

Разработаны и исследованы в среде Simulink пакета MATLAB ряд имитационных моделей электроприводов, в том числе на основе РЭП «ППП-5», с червячным редуктором, с учетом дискретности элементов системы управления. На основании исследований даны рекомендации по построению систем управления движением сканирования.

В четвертой главе рассмотрены вопросы разработки и исследования системы управления движением сканирования установки магнетронного напыления типа «Опал-3-Про».

Основаниями при проектировании системы управления электроприводами установки «Опал-3-Про» были требования технологического процесса к электроприводу; особенности кинематической цепи; требуемые функции для интеграции электропривода в систему автоматизации установкой (интерфейсные, концевые выключатели и т. п.).

Разработанная функциональная схема системы управления движением сканирования для установки «Опал-3-Про» показана на рис. 8. Система перемещения построена на базе двух СЭП, работающих в режиме равномерной заправки. Формирователь траектории дает задание на электроприводы на основе требуемой технологическим процессом скорости и на основании информации о положении рабочего органа, получаемой от путевых выключателей и датчиков положения, расположенных на валах электродвигателей.

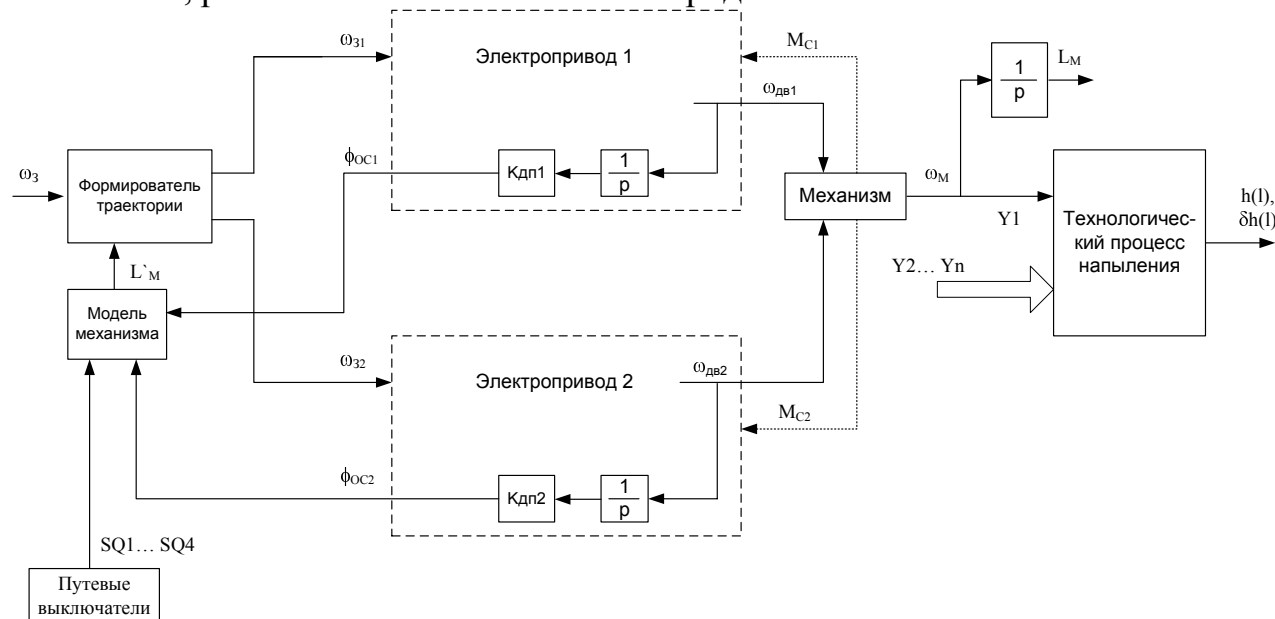


Рис. 8. Разработанная функциональная схема системы управления движением сканирования установки «Опал-3-Про»

Рассмотрены несколько вариантов технической реализации данной системы, описанных в главе 2. Обосновано построение системы со стандартным контроллером с разработанной специализированной дополнительной платой дискретного ввода/вывода, ЦАП и счетчиков с функцией цифрового управления контуром положения; в качестве РЭП выбраны комплектные электроприводы постоянного тока типа «ПРП5». На двигатели необходимо было установить датчики перемещения.

Контроллер приводов получает задание на скорость от программируемого логического контроллера (ПЛК) верхнего уровня. Протокол обмена разработан для этой системы специально. В отладочном режиме возможно управление от ПК, для чего разработана программа в среде LabView.

Внешний вид контроллера управления движением сканирования (а), электродвигателя с редуктором (б), а также расположение контроллера и блоков управления ЭП типа «ПРП5» в стойке управления установкой магнетронного вакуумного напыления «Опал-3-Про» (в) показаны на рис. 9.

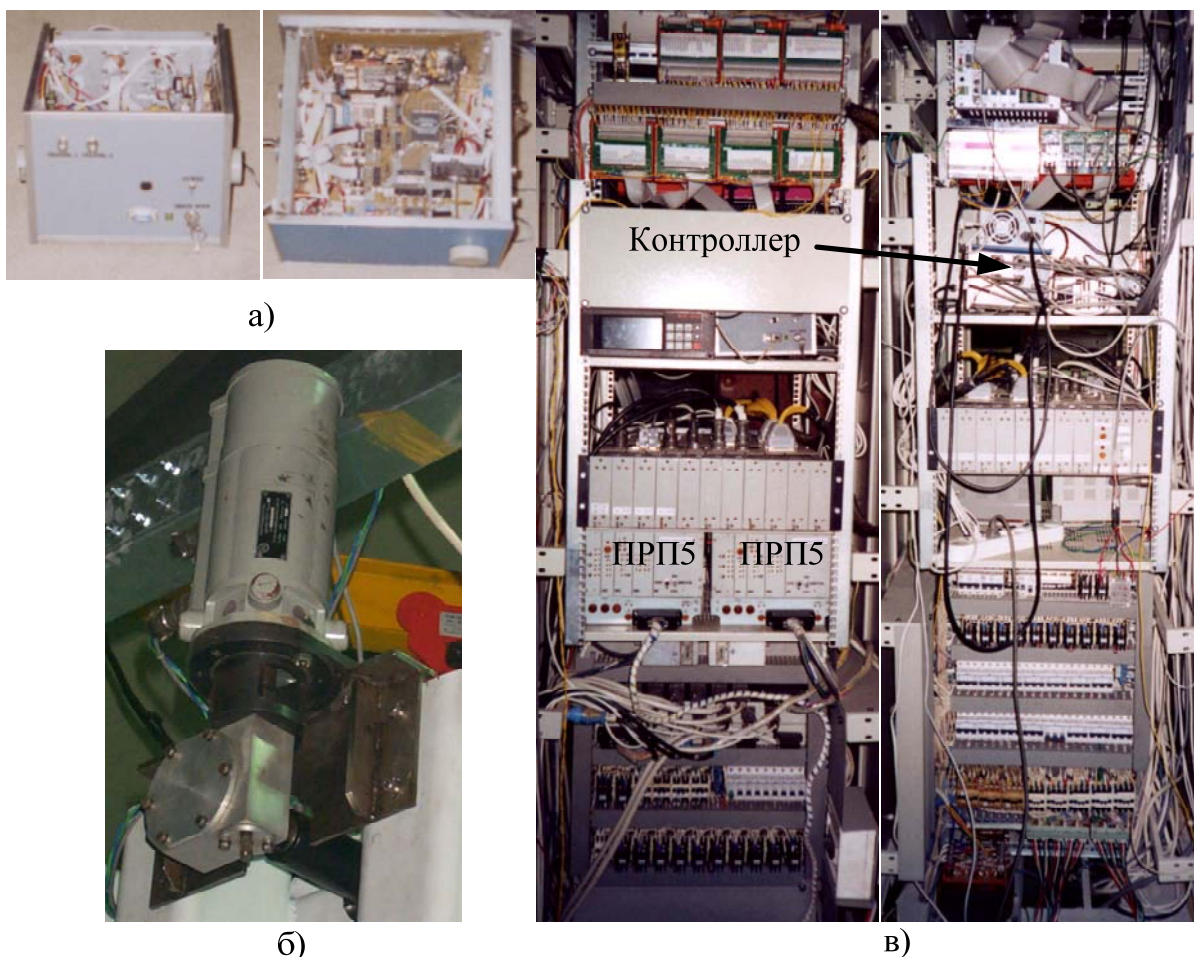


Рис. 9

Контроллер с разработанной автором программой управления движением выполняет следующие функции и задачи:

1) функции автоматизации: обработка сигналов путевых и конечных выключателей (формирование привязки положения кассеты к абсолютному значению, избежание наезда на вакуумный затвор и на стенку камеры кармана); управление блокировкой ЭП в функции положения кассеты по четырем путевым датчикам положения или в функции положения кассеты по импульсным датчикам положения на электродвигателях; формирование заданной траектории движения ЭП при разгоне/торможении и при передаче кассеты от одного электропривода другому;

2) функции цифрового управления контурами слежения электроприводов: расчет регуляторов положения; расчет значения скоростной компенсации; обработка сигналов ИД перемещения;

3) интерфейсные функции: прием и обработка управляющих команд из ПЛК в основном режиме; выдача в ПЛК текущего состояния системы перемещения и результатов фотометрии в основном режиме; обмен с ПК в отладочном режиме;

4) измерительные функции: прием, оцифровка и предварительная обработка сигналов с двух каналов фотометрической приставки в нужный момент времени после остановки рабочего органа;

5) защитные функции: формирование интегрального сигнала неисправности электроприводов с программируемым порогом срабатывания по ошибке контура положения.

На промышленной установке с разработанным электроприводом были проведены эксперименты, подтвердившие соответствие полученных характеристик электропривода поставленным в задании требованиям. На рис. 10, б приведены графики переходных процессов задания на скорость ω_3 и скорости двигателя ω_1 при наличии задатчика интенсивности, скоростной компенсации и ПИ регулятора положения. При усреднении в установившемся режиме скорости за 0,5 с погрешность скорости не превышает 0,03 %. Для сравнения на рис. 10, а приведены графики скоростей первой ω_1 и второй массы ω_2 , полученные на модели при тех же условиях. Максимальное отличие не превышает 3 %.

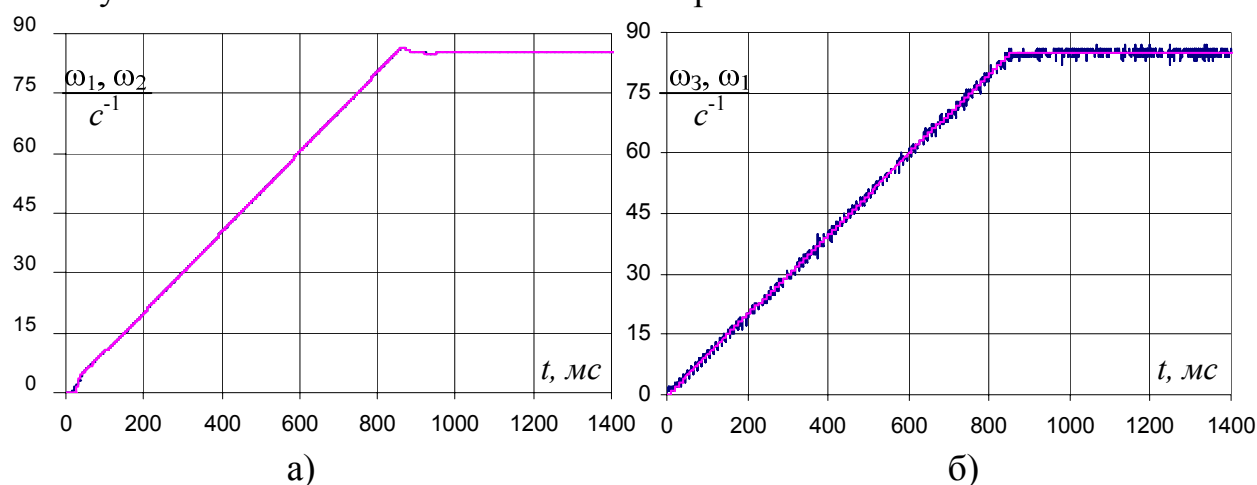


Рис. 10. Графики зависимостей скоростей от времени на имитационной модели (а) и на разработанной установке (б)

Проведен и описан эксперимент, подтвердивший синхронность работы двух приводов. Кроме того, проведен эксперимент, позволяющий оценить работу электропривода в целом, а также для сравнения с работой системы управления электроприводами предыдущего поколения (аналоговой). В ходе эксперимента производилось напыление тонкой интерференционной пленки большого листового стекла при использовании стальной мишени магнетрона (цвет напыления – желтый). Группа экспертов подтвердила равномерность цвета по всей поверхности стекла. Тогда как при использовании системы управления электроприводами предыдущего поколения наблюдалось изменение цвета покрытия по длине стекла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель процесса роста толщины пленки, напыляемой магнетроном, учитывающая параметры относительного движения магнетрона и обрабатываемой поверхности. Модель позволила сформулировать требования к электроприводам установок магнетронного напыления.

2. Разработаны и исследованы имитационные модели регулируемого и следящего электропривода с червячным редуктором, учитывающие различные постоянные и переменные потери в редукторе в прямом и обратном направле-

нии. По результатам исследований даны рекомендации по применению червячного редуктора.

3. Предложен способ передачи кассеты от одного привода к другому при использовании движителя звездочка-цепь путем формирования оптимальной траектории движения электроприводов, которая существенно уменьшает колебания скорости рабочего органа в процессе передачи, снижает возможность механических ударов, существенно уменьшая неравномерность толщины напыленной пленки на этапе передачи.

4. Даны рекомендации по разработке систем управления движением сканирования установок вакуумного магнетронного напыления.

5. Разработана и внедрена система управления электроприводами сканирования установки магнетронного напыления «Опал-3-Про». Приведены разработанные автором структурные схемы и описание программно-алгоритмического обеспечения системы управления движением сканирования.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. **Нечаев М.А.** Разработка системы управления движением сканирования установки магнетронного вакуумного напыления // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 115–120.

2. Ананьин П.С., Асаинов О.Х., **Нечаев М.А.**, Носкова Т.Г. и др. Плазменная установка для нанесения теплосберегающих покрытий // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 53–59.

3. Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Ланграф С.В., **Нечаев М.А.** Опыт разработки преобразователя частоты для асинхронного электропривода общепромышленного применения // Электротехника. – 2005. – № 9. – С. 23–26.

4. **Нечаев М.А.**, Удут Л.С. Особенности использования червячных передач в следящих электроприводах // Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 3–5 сент. 2003. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 50–53.

5. **Нечаев М.А.**, Удут Л.С. Автоматизированная система управления многодвигательным электроприводом // Измерение, контроль, информатизация: Материалы четвертой международной научно-технической конференции – Барнаул, 19–21 мая 2003. – Барнаул, 2003. – С. 108–112.

6. **Нечаев М.А.**, Удут Л.С., Меркулов С.В. Система управления перемещением кассеты установки ионно-плазменного напыления «ОПАЛ-3» // Современная техника и технологии: Труды IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 7–11 апреля 2003. – Т. 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 305–306.

7. **Nechaev M.A.** Defining of requirements to substrate drive for magnetron thin film deposition plants // Science and Technology, 2004. KORUS 2004. Proceedings. The 8th Korea-Russia International Symposium on – Tomsk, June 26–July 3, 2004. – Vol. 1. – P. 270–272.

8. **Нечаев М.А.**, Удут Л.С. Разработка электропривода вакуумной установки для нанесения покрытий на листовое стекло // Электромеханика, электротехника, электроника. – 2004. – № 1. – С. 10–13.

тротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: Труды XI международной конференции – Алушта, 18–23 сентября 2006. – Алушта, 2006. – С. 45–46.

9. **Нечаев М.А.**, Тимченко С.В., Коваленко М.В. Цифро-аналоговый следящий электропривод на базе микроконтроллера INTEL 80C196КС // Современные техника и технологии: Труды седьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – Т. 2. – С. 32–34.

10. **Нечаев М.А.** Система управления электроприводами программно-аппаратного комплекса для диагностики деталей машин // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной научно-технической конференции – Томск, 20–22 октября 2005. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – С. 256–259.

Личный вклад автора

Три работы [1, 7, 10] написаны автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: в публикации [2] – система управления движением сканирования (7 %); в [3] – концепция электропривода (30 %); в [4] – имитационная модель червячного редуктора (50 %); [5, 6, 8] – формулирование требований к электроприводу, схема организации электропривода, программное обеспечение (60 %); в [9] – структура электропривода, аппаратная и программная реализация.

Автор выражает благодарность к.т.н., доценту кафедры электропривода и электрооборудования Удугу Леониду Степановичу за помощь в работе над диссертацией, д.ф.-м.н., профессору Кривобокову Валерию Павловичу за предоставленную возможность выполнения работы в лаборатории 23, профессорам кафедры электропривода и электрооборудования Букрееву Виктору Григорьевичу и Аристову Анатолию Владимировичу за ценные замечания и помощь при оформлении диссертационной работы.