

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СКАНИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ МАГНЕТРОННОГО ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ

М.А. Нечаев

Томский политехнический университет

E-mail: mianec@yandex.ru

Показано построение системы управления движением сканирования установки магнетронного вакуумного напыления с учетом особенностей кинематической схемы. На основании математической модели процесса роста толщины пленки и анализа особенностей технологического процесса сформулированы требования к электроприводу сканирования данных установок.

Ключевые слова:

Электропривод сканирования, автоматизированная система управления, установка вакуумного напыления.

Key words:

Electric drive, scanning, automated control system, magnetron sputtering device.

Введение

Одним из перспективных направлений развития современной техники является создание новых промышленных технологий ионно-плазменной обработки материалов и оборудования для их реализации. Расширение области применения установок и стремление к повышению конкурентоспособности ставят перед разработчиками новые задачи по обеспечению все более высокого качества работы установок и их составных частей.

Неотъемлемой частью большинства установок магнетронного вакуумного напыления является электропривод движения сканирования, обеспечивающий относительное перемещение магнетронной распылительной системы (в дальнейшем — магнетрона) и обрабатываемого изделия. Разработка системы управления движением сканирования при проектировании очередной такой установки [1] выявила необходимость предварительного проведения исследований влияния качества работы электропривода на качество выпускаемой комплексом продукции.

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 структур построения электропривода сканирования;
- разработка имитационных моделей электроприводов с учетом особенностей кинематики установок и их исследование;
- разработка практических рекомендаций для выбора или проектирования электроприводов сканирования, а также для выбора структуры управления комплекса с движением сканирования в целом.

Установки магнетронного вакуумного напыления являются сложным высокотехнологичным оборудованием. Получение тонких (нано-) пленок и покрытий в них осуществляется осаждением на

обрабатываемой поверхности атомов вещества, поток которых создается с помощью распыления атомов исходного материала бомбардировкой его поверхности ускоренными ионами или нейтральными атомами. Конструкция большинства установок такова, что требуется обеспечивать относительное перемещение источника исходного материала (магнетрона) и обрабатываемой детали.

Обзор литературных источников показал также, что в существующих установках применяются несколько типов кинематических схем: с двигателем звездочка-цепь, роликовым приводом, тросовым приводом. В первых двух случаях возможно построение схемы как с одним приводом, так и по принципу многодвигательной установки. Использование нескольких приводов упрощает кинематическую схему установки и облегчает построение больших модульных установок, но при этом появляется задача согласования скоростей вращения. Использование двигателя 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 предполагает значительно более высокую стоимость по сравнению с другими вариантами.

Формирование требований к электроприводу

Важной задачей при проектировании электропривода является оценка его влияния на качество технологического процесса, т. е. предварительно необходимо сформулировать требования технологического процесса к электроприводу. Для решения задачи на основании имеющихся экспериментальных индикатрис скорости роста толщины пленки в зависимости от расстояния от центра магнетрона в поперечном направлении подобрана аналитическая функция, описывающая индикатрисы:

$$I_V(l) = I_{V1} e^{-\frac{\Delta l^2}{2\sigma_1^2}} \text{ при } |\Delta l| = \{0, l_c\};$$

$$I_V(l) = I_{V2} e^{-\frac{\Delta l^2}{2\sigma_2^2}} \text{ при } |\Delta l| = \{l_c, \infty\}, \quad (1)$$

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 $l+l_0/2$ от точки отсчета, рис. 1, процесс роста толщины пленки при нулевых начальных условиях можно представить как:

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

Если для упрощения принять индикатрису как

$I_V(\Delta l) = I_{V1} e^{-\frac{\Delta l^2}{2\sigma_1^2}}$, то из выражения (2) можно получить профиль напыленной пленки:

$$h(l_0) = \int_0^{t_k} I_{V1} e^{-\frac{(l(t)-l_0)^2}{2\sigma_1^2}} dt,$$

$$l(t) = \int v(t) dt, \quad (3)$$

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

Для исследования процесса напыления в среде Simulink пакета Matlab разработана модель по выражению (3) с учетом (1). При другом законе распределения выражение (1) изменится, а, значит, изменится и выражение (3). Подставляя в (3) типовые (периодические и аperiodические) законы отклонения скорости от заданной, можно исследовать влияние этих отклонений на конечный профиль напыленной пленки.

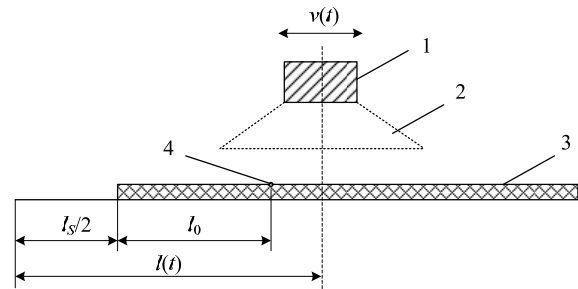


Рис. 1 Схема напыления: 1) магнетрон; 2) зона напыления; 3) обрабатываемая поверхность; 4) положение исследуемой точки на поверхности на расстоянии l_0 от края; $l(t)$ и $v(t)$ – относительные перемещение и скорость магнетрона и поверхности во времени

Предположим, что неравномерность скорости движения магнетрона выражается в наличии гармонической составляющей с постоянной амплитудой и частотой. Исследования на имитационной модели для данного случая показали, что чем меньше период колебания, тем в меньшей степени колебание скорости перемещения оказывает влияние на неравномерность покрытия. На рис. 2 показаны зависимости максимального относительного отклонения толщины пленки от среднего значения в функции периода гармонической составляющей скорости $\delta h_{\text{МАКС}} = f(T)$ при разных средних скоростях v_0 и 10 % максимальном отклонении скорости от среднего значения для одного магнетрона.

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 . Для колебаний скорости, вызванных периодическими изменениями параметров механики, данный параметр – это не зависящая от скорости вращения двигателя приведенная к линейному перемещению длина колебания.

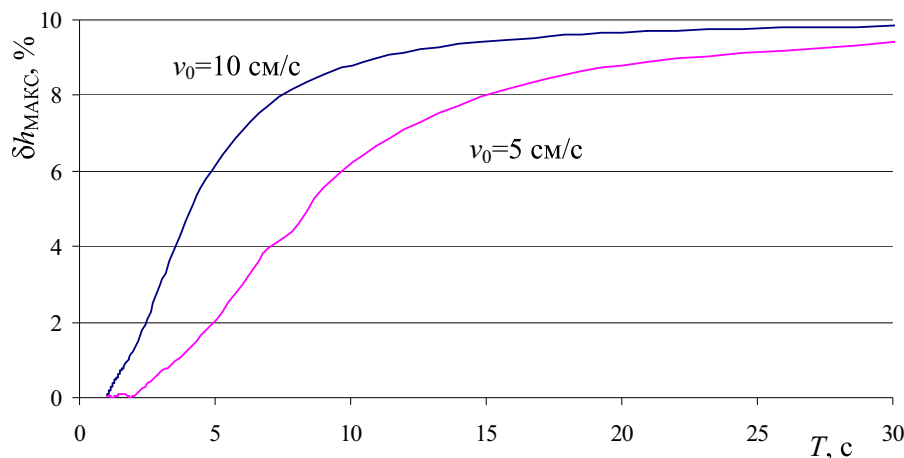


Рис. 2 Зависимости максимального относительного отклонения толщины пленки от периода гармонической составляющей скорости сканирования

Если 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 .

Проведенный анализ показал, что с точки зрения проектирования электропривода главные особенности технологического процесса магнетронного вакуумного напыления следующие:

- обрабатываемое изделие движется в вакуумной камере, 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, например, тросовый привод, требуют решения задачи формирования траектории разгона и торможения с целью ограничения динамических нагрузок на отдельные элементы кинематических схем;
- 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.

Основные задачи системы управления

При построении систем управления движением сканирования основные задачи управления можно разделить на две группы: собственно задачи управления движением и технологические задачи.

К первой группе можно отнести следующие задачи: обеспечение равномерности движения; согласование скоростей приводов, если их несколько; формирование траектории движения с учетом особенностей кинематики, например, на участках передачи кассеты от привода к приводу (обеспечение безостановочной передачи); формирования траектории движения на участках разгона, торможения для снижения динамических нагрузок.

К технологическим задачам (более общим задачам управления комплексом) можно отнести следующее: согласование работы электроприводов с технологическим оборудованием; интеграция измерительного процесса с задачами управления движением; связь с верхним уровнем управления, включая обеспечение необходимого времени реакции на управляющее воздействие (команды) и учет времени реакции на изменение состояния технологического процесса; обеспечение взаимосвязи между подсистемами (построение системы распределенной или централизованной); управление

вспомогательными электроприводами; конечные и нулевые выключатели.

Что касается обеспечения постоянства скорости движения, то в литературе [3] показано, что обеспечение высокой точности стабилизации скорости (порядка 0,1...0,01 %) в широком диапазоне скоростей и температур с помощью аналоговых методов труднодостижимо. 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);
- с непрерывным отсчетом на основе принципа интегрального управления (следящая в режиме равномерной заводки).

Для реализации была выбрана система управления следящим 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.

При решении задачи обеспечения равномерности движения необходимо учитывать основные причины, вызывающие отклонение скорости рабочего органа регулируемого электропривода от заданной:

- 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;
- ошибка датчика скорости (перемещения) и измерительной схемы;
- моментная ошибка, вызванная наличием момента нагрузки на валу электропривода.

Некоторые из этих ошибок могут быть существенно компенсированы системой автоматического управления. 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.

Учет особенностей кинематики

Источниками неравномерности скорости могут стать любые элементы кинематической системы. Это явление может быть обусловлено как неточно-

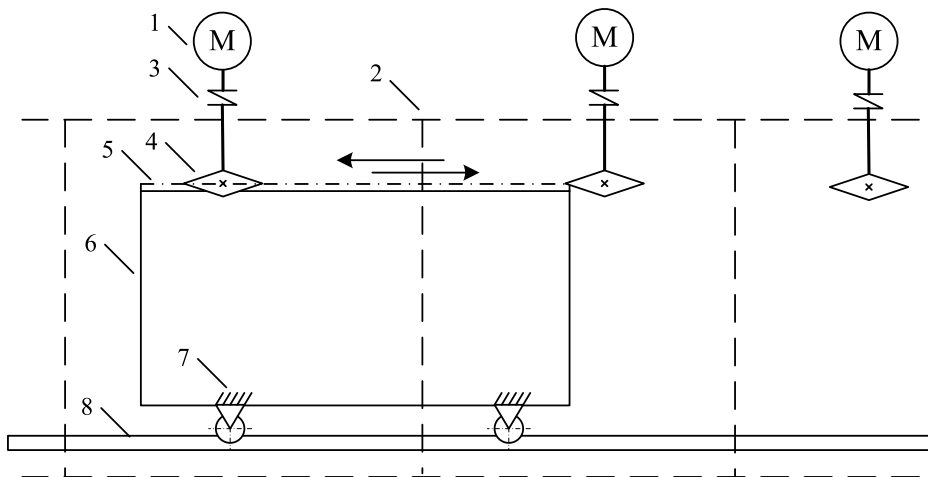


Рис. 3. Кинематическая схема перемещения кассеты несколькими приводами с движителем звездочка-цепь: 1) приводы звездочек; 2) границы вакуумных камер; 3) муфты; 4) звездочки; 5) цепь; 6) кассета со стеклом; 7) ролики кассеты; 8) направляющие

стью 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 ходе работы проанализирована работа червячного редуктора с точки зрения обмена энергией между массами двухмассовой механической системы [2]. Исследования, проведенные на модели, учитывающей разный КПД червячного редуктора при передаче момента в прямом и обратном направлении, позволили сделать ряд выводов относительно особенностей применения редуктора этого типа. В частности, в случае, если момент инерции второй массы соизмерим с первой или больше ее, отсутствие канала возврата запасенной энергии может оказывать существенное влияние на процессы в приводе, особенно при торможении. Чем меньше КПД обратной передачи редуктора, тем

больше динамические нагрузки на механику электропривода. Кроме того, учет неединичного КПД прямой передачи введением звена в канале упругого момента позволяет учесть редуцирование не только момента статической нагрузки на валу второй массы, но и динамического момента.

Еще одной из задач, потребовавших решения при проектировании системы, стала задача обеспечения безостановочной передачи при использовании многодвигательной схемы с движителями типа звездочка-цепь. Кинематическая схема устройства показана на рис. 3.

Использование этой схемы приводит к колебаниям скорости рабочего органа в процессе передачи кассеты с последующим механическим ударом. Предложен алгоритм согласованного управления электроприводами, который существенно уменьшает колебания скорости и снижает вероятность механических ударов, рис. 4. Задача может быть решена за счет разности скоростей звездочек на этапе передачи.

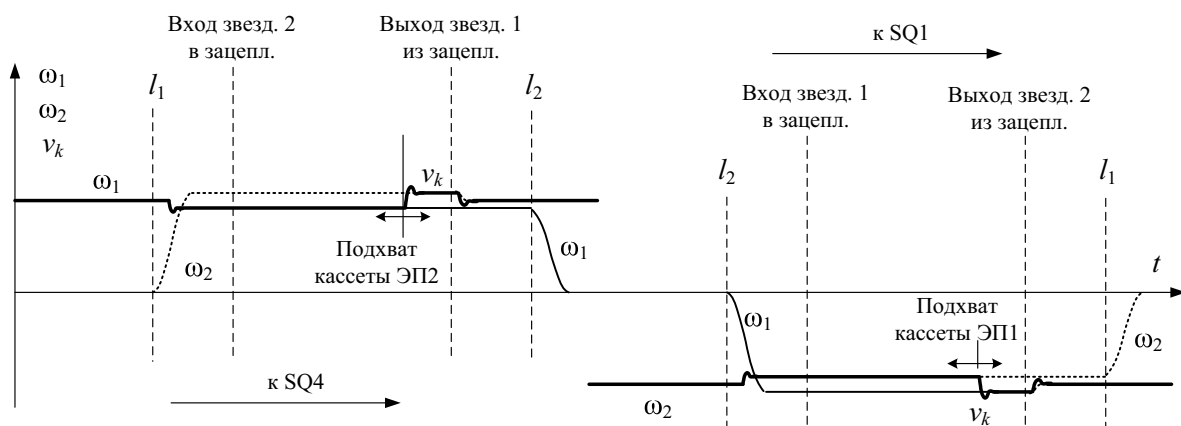


Рис. 4. Временная диаграмма работы электроприводов и движения кассеты: ω_1 , ω_2 , v_k – скорости движения первой и второй звездочек и кассеты; l_1 , l_2 – положение путевого выключателя; SQ1, SQ4 – направление движения к соответствующим конечным выключателям

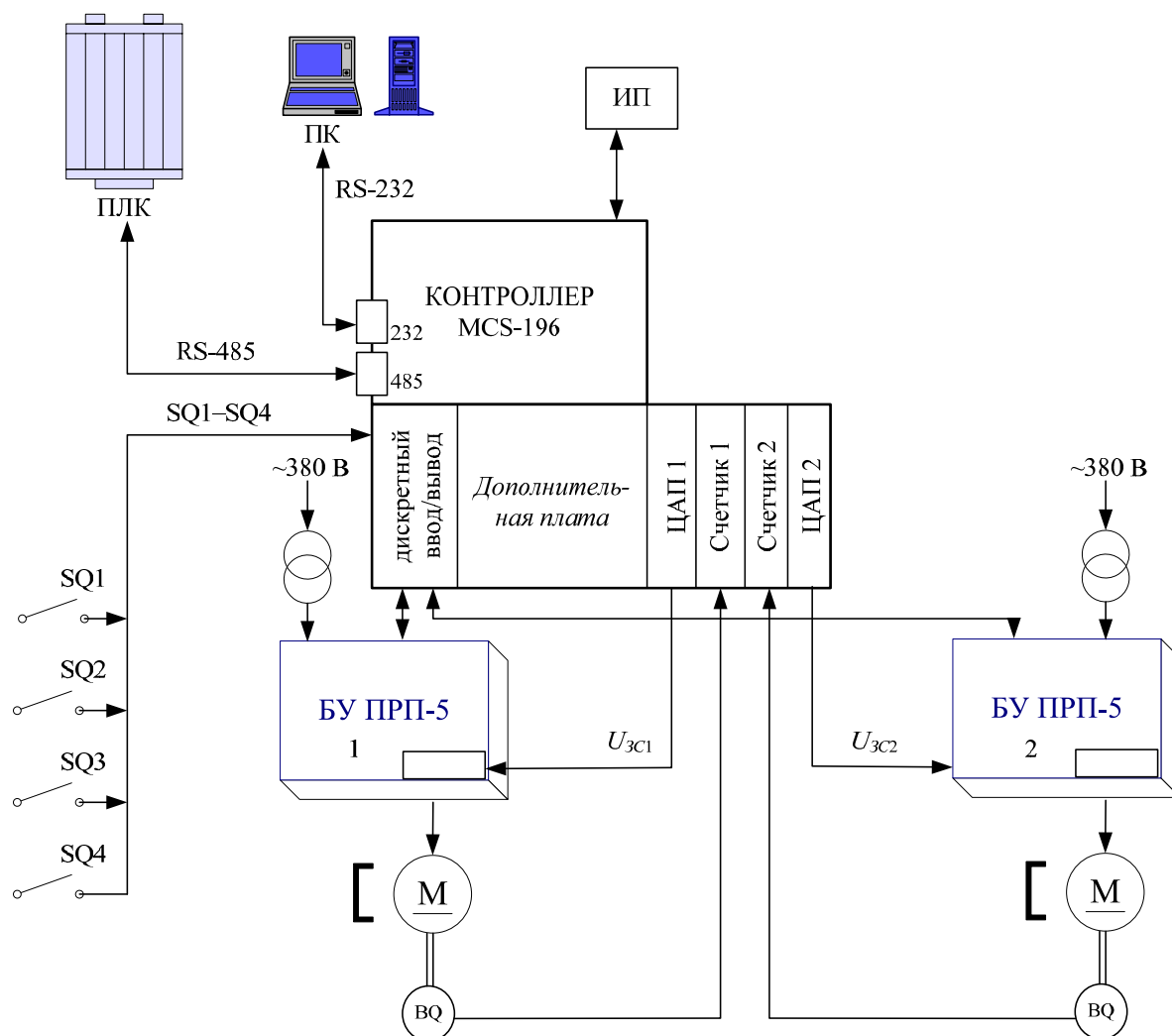


Рис. 5. Функциональная схема системы управления перемещением установки «Опал-3-Про»

Функциональная схема системы управления

На основании теоретических исследований разработана система управления электроприводами сканирования установки магнетронного напыления «Опал-3-Про». Функциональная схема системы показана на рис. 5.

Контроллер выполняет функции цифрового управления системой перемещения, получая задание на скорость $U_{зс}$ от программируемого логического контроллера (ПЛК) верхнего уровня через интерфейс RS-485. Персональный компьютер ПК используется в отладочном режиме. Управление осуществляется с учетом информации с технологических датчиков — путевых и конечных выключателей SQ1–SQ4, а также инкрементных датчиков перемещения ВК. Регулируемые электроприводы построены на базе блоков управления электроприводами БУ типа ПРП5.

На смонтированной установке был проведен ряд исследований, подтвердивших соответствие

разработанной системы перемещения заданным критериям качества. Эксплуатация установки заказчиком показала правильность принятых решений.

Выводы

Разработана и внедрена система управления электроприводами сканирования установки магнетронного напыления «Опал-3-Про».

Предложен способ передачи кассеты от одного привода к другому при использовании движителя звездочка-цепь путем формирования траектории движения электроприводов, которая существенно уменьшает колебания скорости и снижает вероятность механических ударов.

Разработана математическая модель процесса роста толщины пленки, напыляемой магнетроном, учитывающая параметры относительного движения магнетрона и обрабатываемой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьин П.С., Аксаков 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.
2. Нечаев М.А., Удуд Л.С. Особенности 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.
3. Выскуб В.Г., Розов Б.С., Савельев В.И. Прецизионные цифровые системы автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1984. – 136 с.

Поступила 18.10.2010 г.

УДК 621.3.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РОБАСТНОСТИ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИДЕНТИФИКАТОРОМ КАЛМАНА

С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, Л.Е. Козлова

Томский политехнический университет

E-mail: epeo@elti.tpu.ru

Приведены результаты исследования параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана при изменении таких внутренних параметров электродвигателя, как активное сопротивление ротора, индуктивность цепи намагничивания, момент инерции. Установлены границы устойчивости работы электропривода при увеличении каждого из перечисленных параметров.

Ключевые слова:

Векторное управление, фильтр Калмана, переходная характеристика, бездатчиковый электропривод.

Key words:

Vector control, Kalman filter, unit-step response, sensorless drive.

Сегодня нельзя найти отрасль, где не применялись бы частотно-регулируемые электроприводы с приводными асинхронными двигателями (АД). Большинство производственных машин и механизмов общепромышленного применения (вентиляторы, насосы, конвейеры) требуют относительно небольшого диапазона и невысокой точности регулирования скорости, относительно низкого быстродействия. В этом случае используют электроприводы с системой скалярного управления асинхронными двигателями, то есть с взаимосвязанным регулированием частоты и значения питающего напряжения. Широкодиапазонные, высокочастотные и быстродействующие электроприводы станков, роботов и транспортных средств требуют применения более сложных систем векторного управления.

Главной проблемой построения систем векторного управления АД является получение текущей информации о векторе магнитного потокосцепления. Использование датчиков индукции магнитного поля в воздушном зазоре машины на базе элементов Холла или применение дополнительных статорных обмоток для измерения ЭДС позволяет системе управления получать достоверную информацию о векторе потокосцепления. Однако это влечет за собой изменения конструкции двигателя, его технологического усложнения, а, следовательно, удорожания. При этом разработчики асинхронных векторных электроприводов все чаще стремят-

ся отказаться от механического датчика скорости (тахогенератора), что увеличивает надежность и уменьшает стоимость электропривода.

Задачу бездатчикового управления решают при помощи методов динамической идентификации, то есть определения в реальном времени текущих значений вектора состояния. Более целесообразным является применение для идентификации методов оценивания, основанных на регистрации измеренных величин при действии случайных помех и дальнейшей их статистической обработке [1]. В случае АД с короткозамкнутым ротором измеряемыми величинами выступают напряжения и токи фаз статора.

На рис. 1 представлена структура бездатчикового векторного асинхронного электропривода, замкнутого по сигналу идентификатора состояния на основе фильтра Калмана. Измеряемые статорные напряжения U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} и токи I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} асинхронного двигателя АД трансформируются преобразователем координат (ПК) в напряжения U_{α}, U_{β} и токи I_{α}, I_{β} неподвижной системы координат $\alpha-\beta$, которые являются входными сигналами для фильтра Калмана (ФК). ФК на основе измеренных статорных напряжений и токов асинхронного двигателя АД рассчитывает текущие значения потокосцепления ротора $\hat{\psi}_r$ и скорости $\hat{\omega}$ вала двигателя. На систему управления электроприводом (СУЭП), включающую в себя ПИ-регуляторы скорости, потокосцепления ротора и токов статора, подаются