

## СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ЛИНЕЙНОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА С ПОВЫШЕННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТЬЮ

**Квасников В.П., Осмоловський А.И.**

Институт информационно-диагностических систем НАУ, г. Киев

E-mail: iids@nau.edu.ua

### *Abstract*

*Kvasnikov V.P., Osmolovsky A.I. Structure synthesis of linear control drives with advanced dynamic precision. The article presents a systemic approach to the analysis of features of travel drives used in precision machines and measuring robots. Advantages of drives based on linear engines are demonstrated. The work provides an analysis of factors affecting the precision and dynamic parameters of control drives based on linear engines. A method is offered for the development of an advanced-precision digital electric drive. The effectiveness of the method is tested and confirmed by a mathematical model simulating dynamic processes in the drive.*

### **Введение**

При изготовлении и контроле геометрических размеров деталей на современных автоматизированных станках важная роль отводится приводам, обеспечивающим перемещение рабочего органа с заданной точностью. Необходимость повышения статических и динамических характеристик приводов обусловлена предъявляемыми к ним требованиями: обеспечение высокой точности позиционирования рабочего органа, реализация качественных переходных процессов, устойчивость к воздействию на рабочий орган внешних возмущений.

Появление станков и измерительных роботов нового поколения потребовало принятия новых технических решений при конструировании их приводов. Применение безлюфтовых механических передач, линейных двигателей, гидравлических и аэростатических опор обеспечило высокую плавность изменения и стабильность скорости, в том числе при малых скоростях и в моменты старта и останова рабочего органа [1, 2].

Необходимость решения различных по характеру задач определяет использование соответствующих математических моделей. При теоретических расчетах точности и динамических характеристик приводов чаще используются детерминированные модели, в экспериментальных исследованиях — вероятностные соотношения. Основные направления исследований приводов сводятся к их оценке по таким характеристикам, как точность позиционирования, быстродействие, жесткость привода, развиваемое усилие, равномерность перемещения рабочего органа. При этом сочетание теоретических и экспериментальных методов исследования, учет практического опыта эксплуатации прецизионных приводов обеспечивают разработку и эффективную реализацию методов повышения их надежности.

Точность следящих систем характеризуется статической и динамической ошибками. Статическая ошибка обуславливается дискретностью датчика обратной связи, погрешностью механической передачи, влиянием возмущающих воздействий на исполнительное звено привода. Динамическая ошибка связана с переходными процессами при изменении скорости движения и останове рабочего органа.

В современных точных технологических установках широко применяются линейные прецизионные электроприводы. В них отсутствует кинематическое преобразование, вносящее нелинейные и упругие погрешности в канал передачи движения к рабочему органу, а в качестве исполнительных устройств используются линейные двигатели.

Такие электроприводы отличаются высокой точностью позиционирования в доли микрона и широким диапазоном регулирования скорости. При этом на стабильности малых

скоростей сказывается нелинейная зависимость усилия двигателя от управляющего тока и координаты подвижной части, вызванная свойствами электромагнитной системы двигателя и силовой электрической части. На высоких скоростях существенную роль в снижении усилия начинают играть потери в стали и насыщение инвертора. Нелинейное математическое описание электропривода снижает эффективность традиционного подхода к управлению на базе векторных алгоритмов с преобразованием координат [3]. Большой эффект дает управление в реальных координатах с учетом нелинейных эффектов. Для его реализации применяются сложные алгоритмы управления, которые реализуемы только высокопроизводительными сигнальными процессорами [4].

**Постановка задачи**

Особенности построения прецизионной цифровой системы управления линейными двигателями рассмотрим на примере решения конкретной задачи. Пусть требуется обеспечить такие характеристики привода перемещения рабочего органа координатного измерительного робота, выполненного на линейных двигателях:

- диапазон скоростей — от 0,2 мм/с до 500 мм/с;
- отклонения от среднего значения при скорости 1 мм/с — не более 0,05 мм/с;
- точность в режиме позиционирования — не хуже  $\pm 0,5$  мкм;
- число фаз двигателя  $m=2$ ;
- номинальное статическое усилие  $T_n=100$  Н;
- пульсации усилия  $\Delta T/T=10$  %;
- размер зубцового деления  $X_z=2,5$  мм;
- масса подвижной части  $m_i=1,0$  кг;

Тип двигателя — линейный двухфазный синхронный двигатель с обмоткой на подвижной части и неподвижной системой возбуждения на постоянных магнитах.

**Решение задачи**

При разработке концепции реализации привода с заданными параметрами решению подлежат такие принципиальные задачи:

- для обеспечения высокой плавности движения в широком диапазоне скоростей привод должен обладать высокой граничной частотой полосы пропускания как по управляющему воздействию, так и к внешним возмущениям;
- динамические характеристики привода должны сохраняться во всем диапазоне скоростей;
- заданная точность позиционирования должна быть обеспечена применением высокочувствительного датчика положения.

Вариант реализации данных положений представлен в виде структурной схемы, изображенной на рис. 1.

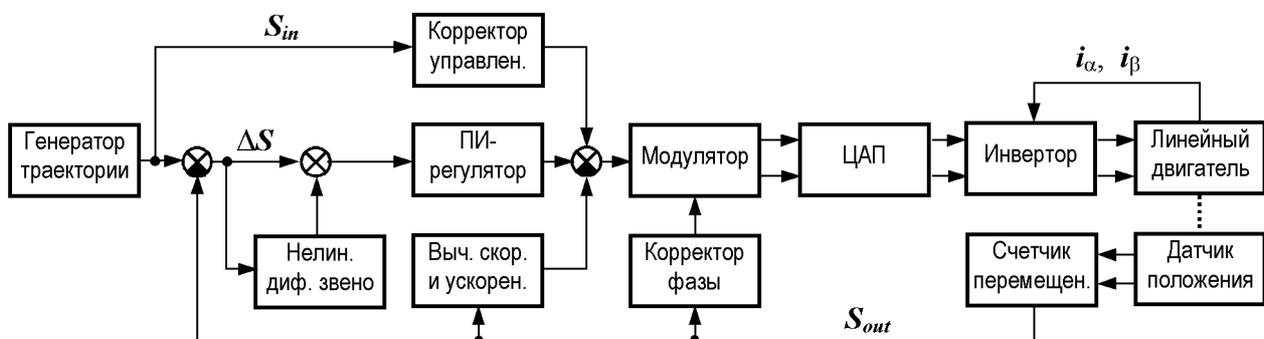


Рисунок 1 — Структурная схема цифрового следящего привода

Основу цифровой системы управления составляет сигнальный процессор, с использованием которого выполнены следующие функциональные узлы:

- генератор траектории, формирующий плавно изменяющиеся задания положения с учетом ограничения на ускорение двигателя, что позволяет уменьшить ошибки управления;
- вычислитель скорости и ускорения перемещения подвижной части двигателя по сигналам с датчика положения;
- пропорционально-интегральный регулятор положения в режиме позиционирования (ПИ-регулятор);
- корректор управления, учитывающий динамику замкнутого привода и вносящий поправку в сигнал управления по скорости, что уменьшает ошибку при изменении входного задания;
- коммутируемое нелинейное дифференцирующее звено, улучшающее качество переходных процессов при подводе рабочего органа к месту позиционирования;
- корректор задания токов обмоток двигателя, компенсирующий пульсации создаваемого усилия, обусловленные конструкцией магнитной системы и проявляющиеся в виде паразитного фиксирующего усилия как знакопеременное возмущающее воздействие;
- формирователь сигналов управления токами обмоток двигателя.

Входным сигналом следящего привода является сигнал  $S_{in}$ , выходным —  $S_{out}$ , сигналом рассогласования —  $\Delta S$ . Сформированный сигнальным процессором цифровой сигнал управления преобразуется цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) в аналоговую форму и далее поступает на двухканальный инвертор, работающий в вентильном режиме и формирующий заданные токи в обмотках двигателя в функции от положения подвижной части.

Инвертор тока выполнен по принципу широтно-импульсного модулятора (ШИМ) напряжения, питающего преобразователь. Закон электронной коммутации токов обмоток синхронного двигателя записывается так:

$$i_{\alpha} = i_m \sin \theta, \quad i_{\beta} = i_m \cos \theta, \quad (1)$$

где  $i_{\alpha}$ ,  $i_{\beta}$  — токи фаз двигателя,  $i_m$  — суммарная амплитуда тока;  $\theta$  — электрическая координата подвижной части. Закон управления (1) в общем виде не учитывает пульсации фиксирующего усилия. Компенсация данного возмущения производится процессором путем коррекции задаваемых токов  $i_{\alpha}$  и  $i_{\beta}$ .

Амплитуда переменного напряжения питания  $U_m$ , необходимая для достижения граничной скорости  $S_m$  в режиме источника усилия без учета падения напряжения в обмотках и ключевых элементах может быть оценена при помощи уравнения синхронной машины

$$U_m \geq S_m \frac{2\pi}{T_z} \sqrt{(L_{ph} I_{mn})^2 + (T_n T_z / 2\pi I_{mn})^2} \quad (2)$$

где  $X_z$  — зубцовое деление,  $L_{ph}$  — средняя индуктивность фазы,  $T_n$  — номинальное статическое усилие,  $I_{mn}$  — номинальная амплитуда тока.

К инвертору тока предъявляются наиболее высокие требования по быстродействию формирования создаваемого двигателем момента с целью обеспечения широкой полосы пропускания всего привода. Задача решается посредством введения обратной связи по току [3]. Передаточная функция такого инвертора записывается в виде:

$$K_i(s) = k_c \frac{1 + s/2\zeta\omega_0}{1 + 2\zeta s/\omega_0 + s^2/\omega_0^2} \quad (3)$$

где  $k_c$  — статический коэффициент передачи токового контура,  $\omega_0$  — резонансная частота,  $\zeta$  — коэффициент затухания.

Наименьшая полоса пропускания инвертора определяется требованием реализации всего диапазона скоростей в режиме источника тока без насыщения инвертора. При максимальной скорости привода  $X_m = 0,5$  м/с частота синусно-косинусных токов  $f_{max} = X_m/T_z$  составит около 200 Гц. Запас по полосе пропускания инвертора должен быть не менее, чем дву-

кратным. Частота ШИМ выбирается на порядок выше, чем предотвращается влияние квантования сигнала во времени.

В качестве датчика положения используется оптический инкрементальный энкодер с периодом раstra 0,2 мкм и цифровым выходом, что обеспечивает заданную точность позиционирования, а также обновление сигнала скорости при минимальной скорости движения с достаточной частотой в пределах полосы пропускания привода.

При выборе процессора учитывается требование реализации сложных алгоритмов управления с большим диапазоном изменения компонент вектора состояния. Программное обеспечение системы управления состоит из подпрограммы управления приводом, интерпретатора команд управляющего компьютера и подпрограммы аварийных состояний.

Регулирование осуществляется в пространстве состояний с использованием вектора состояния. Координатами вектора состояния являются ошибка положения, скоростная ошибка, возмущающее воздействие и его производная. Непосредственно измеряемой величиной является ошибка положения. Остальные координаты вектора состояния вычисляются.

Синтез параметров регулятора системы управления с учетом периода квантования и времени преобразований был проведен аналитически для линеаризованного описания привода в пространстве состояний. Дополнительные исследования проведены путем математического моделирования работы привода в различных режимах.

В структуре привода предусмотрен ряд узлов и компенсирующих связей, позволяющих улучшить качество регулирования — генератор траектории, корректор управления, корректор фазы. Повысить устойчивость следящей системы, как при наличии перечисленных компенсирующих связей, так и при их условном отключении или неэффективной работе, позволяет дополнительно введенное нелинейное звено, детально описанное в [5]. Данное звено представляет собой коммутируемый дифференциатор сигнала рассогласования по положению, управляемый в зависимости от текущей комбинации знаков сигнала рассогласования и его производной. Исследованию влияния данного звена, на характеристики привода уделено отдельное внимание.

На диаграммах рис. 2–5 представлены сравнительные результаты математического моделирования реакции привода на различные входные воздействия без применения упомянутого нелинейного корректирующего звена и с его использованием.

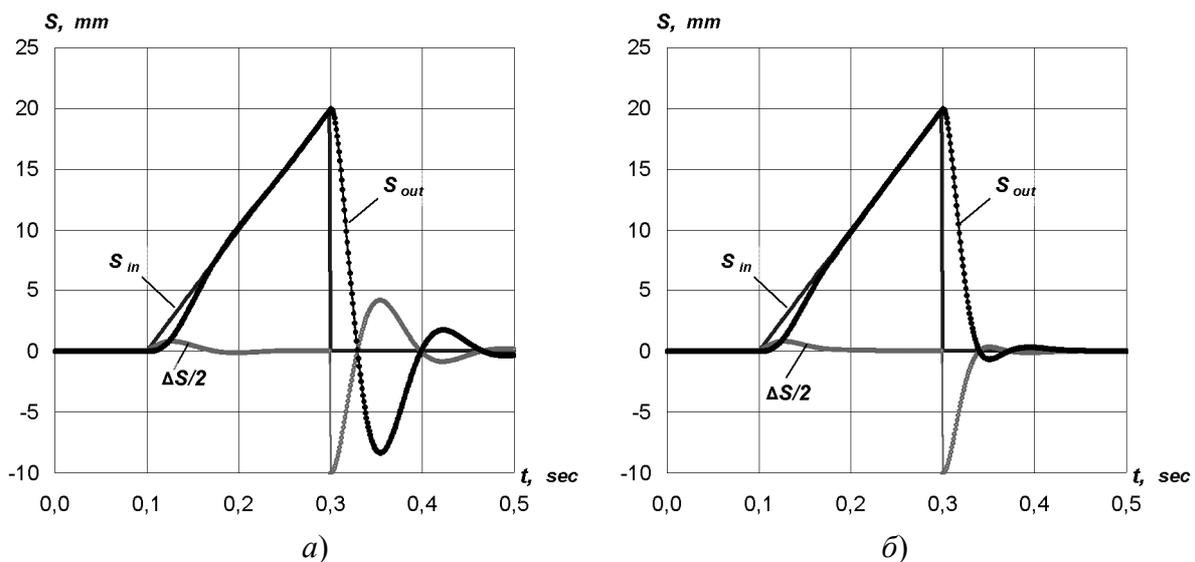


Рисунок 2 — Сравнение переходных характеристик привода обычной структуры (а) и с коммутируемым дифференцирующим звеном (б)

Наиболее легкий режим входного воздействия представлен на рис. 2 — старт с постоянной скоростью с последующим возвратом в исходное положение. Влияние введения нели-

нейного корректора проявляется в существенном уменьшении колебательности системы, наиболее ощутимом в скачкообразной части воздействия.

Более тяжелое входное воздействие — движение из удаленной позиции в направлении увеличения расстояния от исходного положения. Преимущества привода с коммутируемым звеном (рис. 3, б) в сравнении с обычным приводом (рис. 3, а) очевидны.

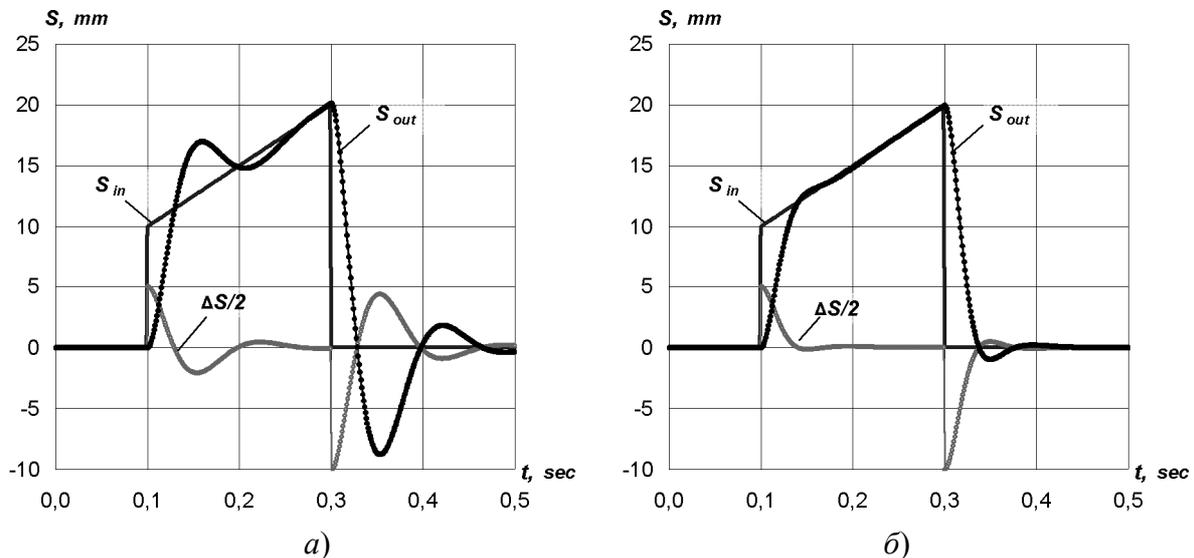


Рисунок 3 — Сравнение переходных характеристик привода

Дополняют картину сравнения результаты, представленные на рис. 4 и 5 — движение из удаленной позиции в направлении возврата в исходное положение со скачкообразным завершением процесса (рис. 4) и с остановкой в нулевом положении без скачка (рис. 5). В обоих случаях начало процесса характеризуется большим стартовым рассогласованием с последующим переходом на движение с постоянной скоростью в обратном направлении. Необходимость обрабатывать такие воздействия может возникать при контроле измерительными роботами геометрических размеров объектов сложной конфигурации, а также при управлении исполнительным элементом станка при изготовлении аналогичных деталей. Введение коммутируемого звена (рис. 4, б и 5, б) позволяет предотвратить возникновение значительного рассогласования на начальном скачкообразном участке траектории, проявляющемся в виде перерегулирования в работе привода обычной структуры (рис. 4, а и 5, а).

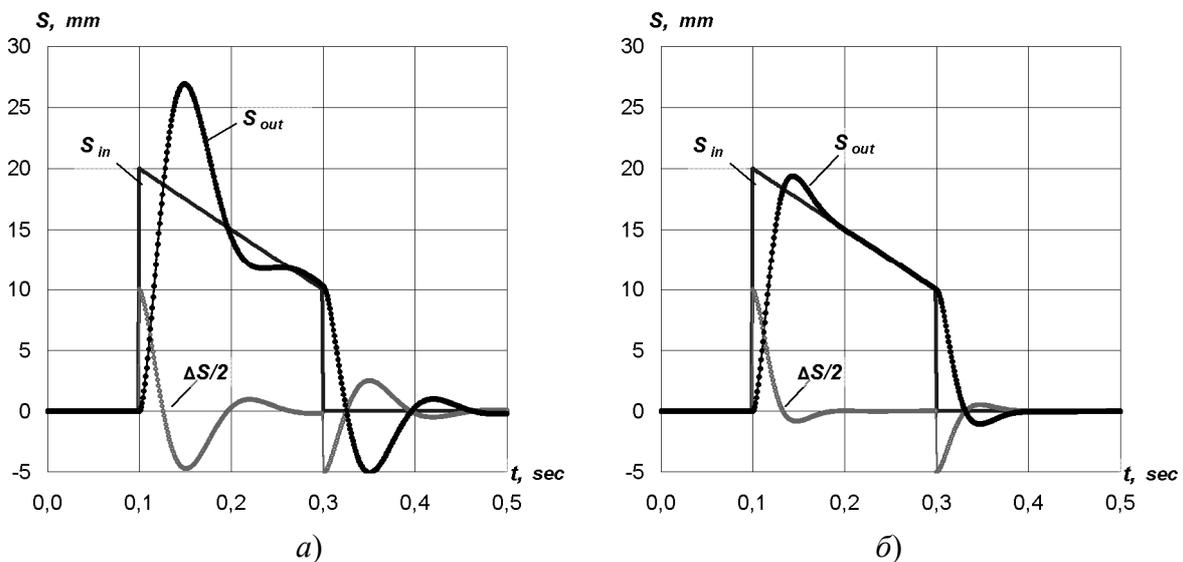


Рисунок 4 — Сравнение переходных характеристик привода

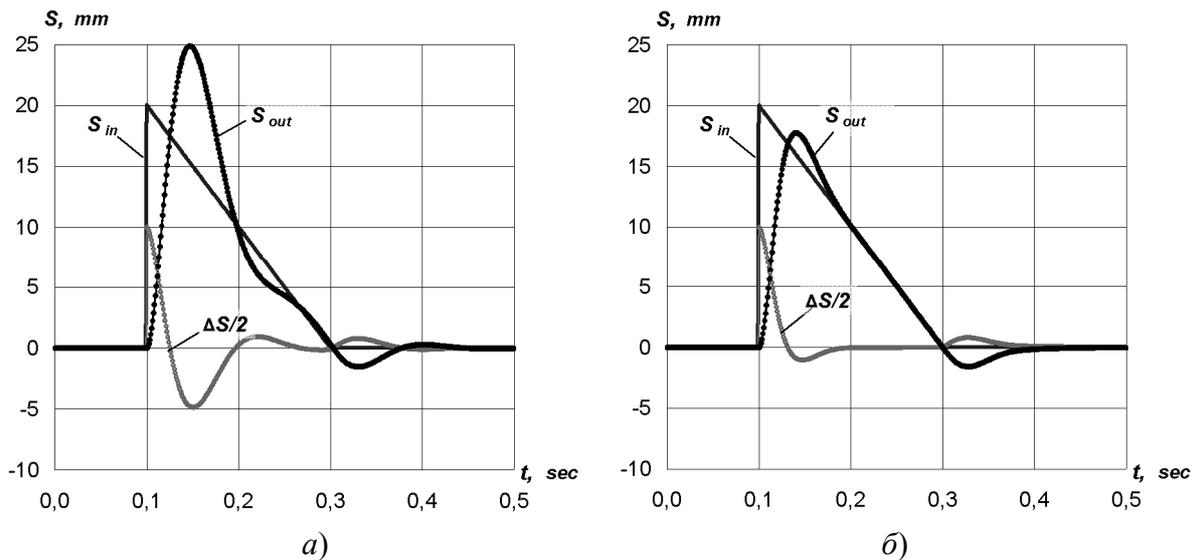


Рисунок 5 — Сравнение переходных характеристик привода

Комплексное применение всех технических решений, отраженных на структурной схеме привода рис. 1, позволяет получить цифровой следящий привод на основе применения линейных двигателей, характеризующийся высокой точностью и быстродействием. Наиболее эффективным с практической точки зрения является создание мультипроцессорной системы, управляющей идентичными приводами по трем и более координатам. Автоматизированные координатные станки и измерительные роботы, выполненные с применением таких приводов, позволяют создать интеллектуальные производственные комплексы, обеспечивающие высокое качество выпускаемой продукции при высокой производительности используемого оборудования.

### Выводы

Произведенный анализ факторов, влияющих на точность и динамические параметры следящих приводов прецизионных станков и измерительных роботов, показал преимущества применения приводов на линейных двигателях. Предложенный вариант реализации цифрового привода и результаты математического моделирования динамических процессов подтверждают эффективность комплексного подхода к решению задачи. Привода аналогичной структуры могут быть рекомендованы к применению в других устройствах, требующих воспроизведения движения по программе с высокой точностью и динамикой, в частности, в таких областях, как лазерные технологии, медицинское оборудование, микроэлектроника и др.

### Литература

1. Андреев С.Н., Ворошилов М.С., Петров Б.А. Проектирование приводов манипуляторов. — Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1975. — 312 с.
2. Тимофеев А.В. Адаптивные роботехнические комплексы. — Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. — 332 с.
3. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 136 с.
4. Корнеев В., Киселев А. Современные микропроцессоры. — М.: Нолидж, 2000.
5. Квасніков В.П., Осмоловський О.І. Підвищення динамічної точності систем автоматичного регулювання координатних вимірювальних машин // IX Міжнародна науково-практична конференція "ССПОИ-2005". — Черкаси: ЧГТУ, 2005. — С. 155–157.