

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫХ ЛИНЕЙНЫХ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ ПОДАЧ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ**

*Рассмотрены кинематические схемы двухдвигательных линейных исполнительных устройств и структурные схемы соответствующих двухканальных электроприводов механизмов подач высокой точности. Приведены динамические и точностные характеристики, позволяющие оценить эффективность предлагаемых двухдвигательных электроприводов.*

*Розглянуті кінематичні схеми дводвигунних лінійних виконавчих пристроїв та структурні схеми відповідних двоканальних електроприводів механізмів подач високої точності. Наведені динамічні та точносні характеристики, які дозволяють оцінити ефективність запропонованих дводвигунних електроприводів.*

*The kinematical charts of two-motor progressive final-control-device and corresponding structures of high precision two-channel linear synchronous feeds electric drives are considered. Dynamic characteristics for proposed two-motor servosystems efficiency estimation are given.*

К станкам с числовым программным управлением (ЧПУ) и промышленным роботам многих технологических операций предъявляются все более возрастающие требования по точности управления и величине развиваемых усилий. При определенном диапазоне соотношений этих противоречащих друг другу показателей в ряде случаев становится практически невозможным и экономически нецелесообразным обеспечение требуемых качественных характеристик промышленных модулей с помощью одноканальных электроприводов (ЭП) с чрезмерно большими коэффициентами усиления и предельно широкими полками пропускания. Это относится, в первую очередь, к механизмам подач (МП) механообрабатывающих станков, к позиционирующим манипуляторам и промышленным роботам сборочных линий, где наряду со значительными усилиями требуются высокая динамическая точность управления и микронная точность позиционирования (иногда до долей микрона) [2,4].

Эффективным средством повышения точности управления, особенно в динамических режимах, при сохранении требуемых силовых воздействий на объект может служить применение многоканальных следящих приводов, построенных по принципу грубого и точного управления. В таких многоканальных приводах существенное повышение качества управления в широком частотном диапазоне достигается за счет итерационной структуры системы управления без значительного усложнения усилительных и корректирующих устройств [1,3].

В связи с этим особое значение приобретают вопросы разработки многодвигательных исполнительных устройств (ИУ), обеспечивающих функционирование многоканальных высокоточных следящих ЭП.

Механическая часть двухдвигательного линейного ИУ ЭП механизма подачи по отдельной координате состоит из активных инерционных тел – подвижных частей (якорей) синхронных линейных

двигателей (СЛД): основного (грубого) СЛД1 и симметрично расположенного на нем дополнительного (уточняющего) СЛД2, перемещающихся по относительно неподвижным магнитопроводам (индукторам). Для передачи усилий от СЛД1 к СЛД2 подвижные части двигателей связаны между собой силовой упругой передачей (СУП) с требуемой (регулируемой) суммарной жесткостью. При этом уточняющий двигатель СЛД2 работает в пределах жесткости СУП, непрерывно повышая точность отработки заданного закона движения по координате грубым линейным двигателем СЛД1. Применение системы аэростатических опор позволяет практически полностью компенсировать влияние сил трения на работу ЭП механизма подачи [2].

Схема конструкции с жесткой механической связью (ЖМС) между основным и дополнительным каналами может включать в качестве уточняющего привода асинхронный двигатель, жестко связанный с подвижной частью СЛД1. Для передачи усилий на рабочий орган используется шарико-винтовая пара.

Кинематические схемы МП, составленные с учетом особенностей конструкции двухдвигательного линейного ИУ с СУП и ЖМС, приведены на рис.1.

Система уравнений поступательного движения активной двухмассовой системы, соответствующей двухдвигательному линейному ИУ с СУП,

$$\begin{aligned}
 m_1 a_1 &= F_1 - F_2 - F_y - F_{c1}, \\
 m_2 a_2 &= F_2 + F_y - F_{c2}, \\
 F_y &= F_{y1} - F_{y2} = c_{12}(x_1 - x_2) + \beta_{12}(v_1 - v_2), \\
 F_{y1} &= F_{\pi 1} - F_{\Delta 1} = c_{12}(x_{11} - x_{21}) + \beta_{12}(v_{11} - v_{21}), \\
 F_{y2} &= F_{\pi 2} - F_{\Delta 2} = -c_{12}(x_{12} - x_{22}) - \beta_{12}(v_{12} - v_{22}), \\
 a_1 &= \dot{v}_1, \quad a_2 = \dot{v}_2, \\
 x_1 &= x_{11} + x_{12}, \quad x_2 = x_{21} + x_{22}, \\
 v_1 &= v_{11} + v_{12}, \quad v_2 = v_{21} + v_{22}, \\
 c_{12} &= c' + c'' = 4c, \quad \beta_{12} = \beta' + \beta'' = 4\beta.
 \end{aligned} \quad (1)$$

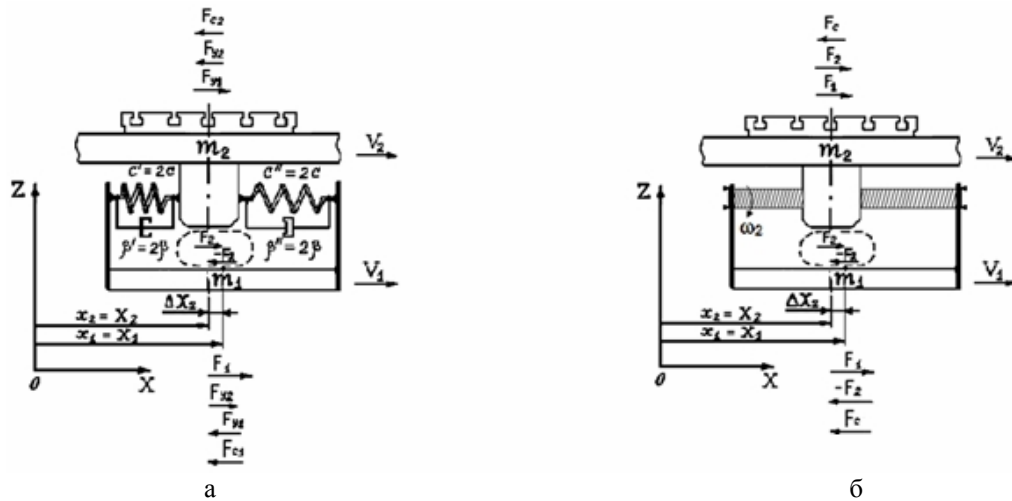


Рис.1. Кинематические схемы двухдвигательного линейного ИУ: а – с СУП; б – с ЖМС

Система уравнений поступательного движения активной двухмассовой системы, соответствующей двухдвигательному линейному ИУ с ЖМС,

$$\begin{aligned}
 m_1 a_1 &= F_1 - F_2 - F_c, \\
 m_2 a_2 &= F_2 + F_1 - F_c, \\
 a_1 &= \dot{v}_1, & a_2 &= \dot{v}_2, \\
 x_1 &= x_{11} + x_{12}, & x_2 &= x_{21} + x_{22}, \\
 v_1 &= v_{11} + v_{12}, & v_2 &= v_{21} + v_{22}.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Структуры приводов СЛД1 и СЛД2 двухдвигательного линейного ЭП аналогичны и построены на базе комплектного ЭП типа «МультиЛэд» (НПО «Ротор», г. Черкассы). В качестве преобразователя используется транзисторный инвертор тока. Сигнал задания скорости с выхода дискретного регулятора положения системы ЧПУ подается на вход СПР скорости.

Обобщенная структурная схема итерационного по контуру положения двухдвигательного ЭП приведена на рис.3.

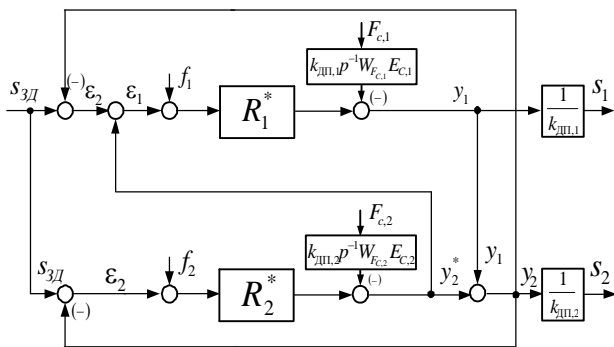


Рис.3. Обобщенная структурная схема итерационного двухдвигательного ЭП с учетом усилий нагрузки, внесенных за контуры скорости каналов управления

Структурная схема двухдвигательного линейного ЭП с СУП приведена на рис.4.

На основании разработанных математических моделей и структурных схем проведено сравнительное имитационное компьютерное моделирование

двухдвигательных линейных ЭП с СУП и ЖМС. Результаты моделирования приведены на рис. 5÷8. Полученные показатели качества ЭП сведены в табл.1÷3.

### 1. Быстродействие двухдвигательного ЭП с СУП

Вариант ЭП	Зона перемещений	Режим позиционирования	
		Качество ПП	
		Время регулирования 1 %, $t_{рег,i}(i=1,2)$ , с	Выигрыш во времени регулирования, раз
Одноканальный (автономный канал К-1)	М	0,087	–
	С	0,13	–
	Б	0,61	–
Двухканальный (каналы К-1 и К-2)	М	0,0095	9,15
	С	0,034	3,8
	Б	0,64	0,95

### 2. Быстродействие двухдвигательного ЭП с ЖМС

Вариант ЭП	Зона перемещений	Режим позиционирования		Режим номинальной нагрузки	
		Время регулирования 1 %, $t_{рег,i}(i=1,2)$ , с	Выигрыш во времени регулирования, раз	Время регулирования 1 %, $t_{рег,i}(i=1,2)$ , с	Выигрыш во времени регулирования, раз
Одноканальный (автономный канал К-1)	М	0,106	–	0,126	–
	С	0,14	–	0,15	–
	Б	0,6	–	0,61	–
Двухканальный (каналы К-1 и К-2)	М	0,013	8,15	0,016	7,8
	С	0,046	3,04	0,05	3
	Б	0,68	0,88	0,7	0,87

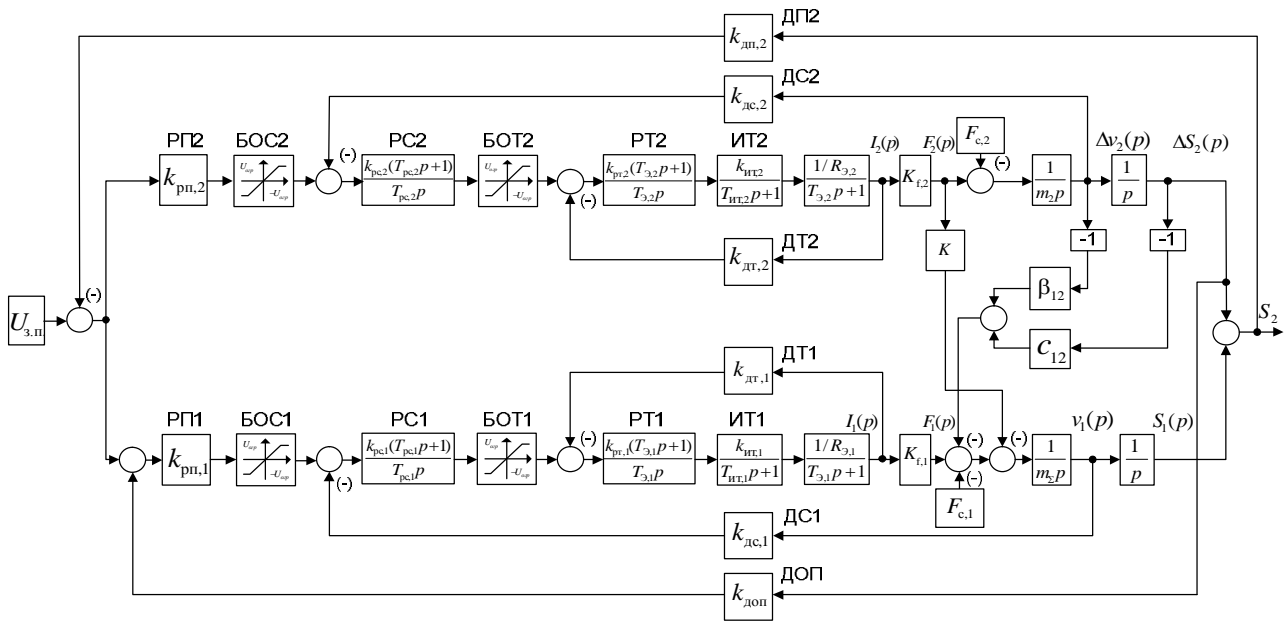


Рис.4. Структурная схема двухдвигательного линейного ЭП с СУП

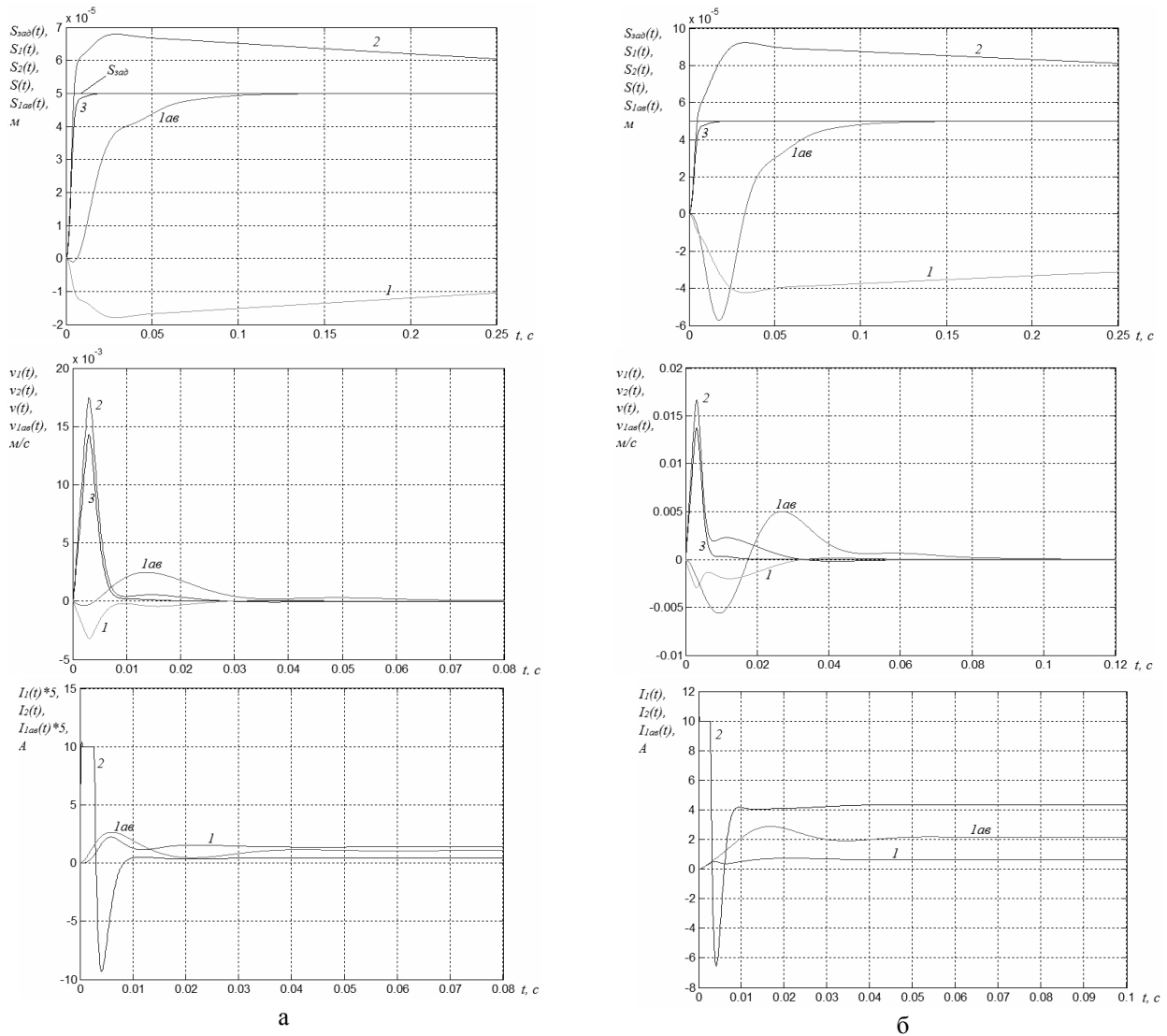


Рис.5. Переходные процессы в двухдвигательном линейном ЭП с ЖМС для зоны малых перемещений ( $S_M = 50 \text{ мкм}$ ): а – в режиме позиционирования; б – в режиме номинальной нагрузки

### 3. Сравнительный анализ показателей качества двухдвигательных линейных ЭП с ЖМС и СУП

Вариант ЭП	Зона перемещений	Быстродействие при позиционировании		Полоса воспроизводимых частот по уровню 0,707 при $S_M = 50$ мкм: $\omega_{П,i} (i=1,2)$		Расширение полосы пропускания по сравнению с двухдвигательным ЭП с ЖМС, раз	Величина кинетической ошибки при $U_{зад,n}(t) = t$ ( $t = 1с$ ), м	Выигрыш в точности позиционирования, раз
		Время регулирования 1%, $t_{рег,i} (i=1,2), с$	Выигрыш во времени регулирования, раз					
				М	С			
Двухдвигательный ЭП с ЖМС	М	0,013	–	90,8	570	–	–	–
	С	0,046	–	17,3	109	–	–	–
	Б	0,68	–	–	–	–	$1,8 \cdot 10^{-8}$	–
Двухдвигательный ЭП с СУП	М	0,0095	1,36	117,2	736	1,29	–	–
	С	0,034	1,353	25,4	160	1,46	–	–
	Б	0,64	1,063	–	–	–	$0,903 \cdot 10^{-8}$	1,99

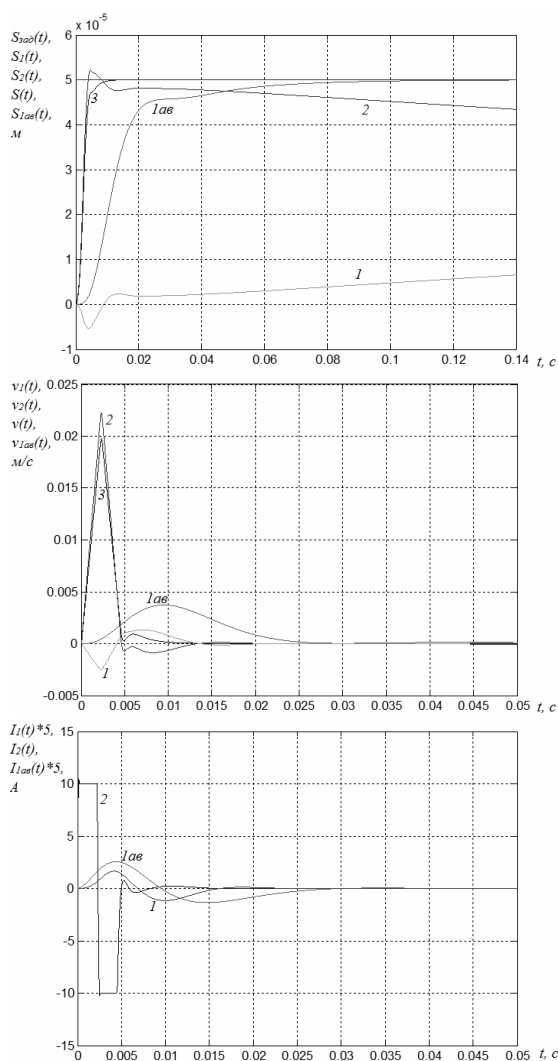


Рис.6. Переходные процессы в двухдвигательном линейном ЭП с СУП для зоны малых перемещений ( $S_M = 50$  мкм) в режиме позиционирования

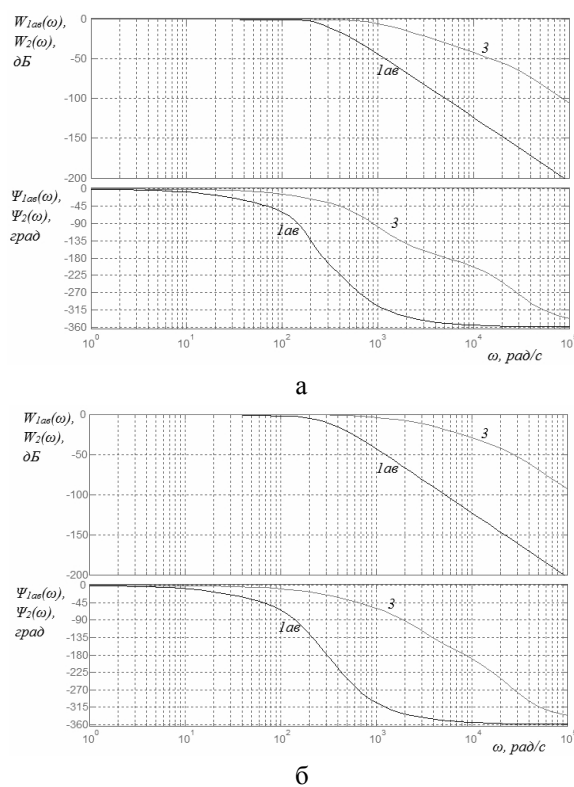
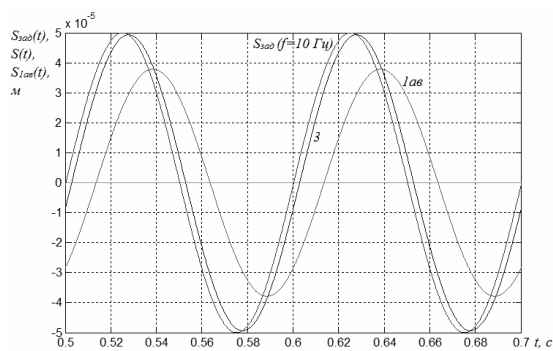
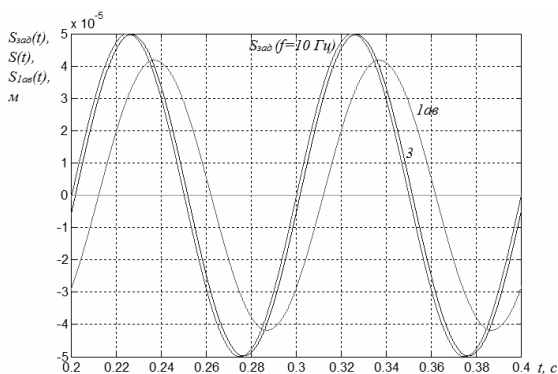


Рис.7. Частотные характеристики двухдвигательного линейного ЭП для зоны малых перемещений ( $S_M = 50$  мкм) в режиме позиционирования: а – ЭП с ЖМС; б – ЭП с СУП

На рисунках 5÷8 обозначены: цифрами «1», «2» и «3» – графики динамических характеристик приводов соответственно основного К-1 и дополнительного К-2 каналов управления, функционирующих в итерационном режиме, и двухдвигательного ЭП в целом; цифрой «1ав» – динамические характеристики привода основного канала К-1, работающего в автономном режиме.



а



б

Рис.8. Графики отработки синусоидального сигнала  $U_{3.л.}(t) = U_{3.л.} \sin 2\pi ft$  ( $f = 10$  Гц) двухдвигательным ЭП в режиме позиционирования ( $S_m = 50$  мкм): а – ЭП с ЖМС; б – ЭП с СУП

**Выводы.** Теоретические и компьютерные исследования показали, что итерационный двухдвигательный ЭП механизма подачи с ЖМС и типовой настройкой имеет существенные преимущества перед традиционным однодвигательным позиционным ЭП по быстродействию (в 3÷8 раз) и динамической точности (в 2÷5 раз и более), обладает более чем в 2÷3 раза большей полосой пропускаемых частот без ухудшения качества апериодического переходного процесса в системе.

Двухдвигательный линейный позиционный ЭП с СУП и системой аэростатических опор позволяет по сравнению с аналогичным однодвигательным линейным ЭП МП повысить быстродействие в 4÷10 раз, расширить в 2÷5 раз полосу воспроизводимых частот, существенно повысить динамическую точность при отработке линейно нарастающих и гармонических задающих сигналов на перемещение.

Применение двухдвигательного ЭП с упругой связью между основным и дополнительным СЛД и системой аэростатических опор обеспечивает повышение быстродействия в 1,3÷1,4 раза, расширение полосы пропускания в 1,3÷1,5 раза и двукратное уменьшение кинетической ошибки по сравнению с двухдвигательным ЭП с ЖМС.

К общим недостаткам двухдвигательных линей-

ных ЭП с СУП и ЖМС следует отнести их сравнительное удорожание из-за наличия в них двух отдельных приводов требуемой мощности, высококачественного механизма передачи усилий и перемещений и высокоточного (нанометры) оптического датчика положения исполнительного органа.

В целом применение двухдвигательных линейных следящих ЭП целесообразно в тех случаях, когда необходимо получить очень высокую динамическую точность воспроизведения и широкую полосу пропускаемых частот традиционного однодвигательного следящего ЭП (основного канала К-1) при отсутствии или наличии значительных нагрузок.

#### Список использованной литературы

1. Двухкорный линейный синхронный привод обрабатывающего центра / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.М. Некрасов, В.И. Русаев // Электротехника. – 1993. – № 4. – С.11-18.
2. Зильберг И.М. Высокопроизводительные технологические модули повышенной точности / И.М.Зильберг // Стратегия развития НПО „Ротор”. Сб. докладов НТК. – Черкассы: – 1987. – С. 33-35.
3. Многоканальные итерационные системы управления: Уч.пособие / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.Н. Богаенко и др. – К.: НПК „КИА”, 1998. – 224 с.
4. Никольский А.А. Новые высокоточные электроприводы с пьезокомпенсаторами для станков, механизмов и приборов / А.А.Никольский // Электротехника. – 1993. – № 1. – С.27-31.

Получено 24.07.2011



Худяев  
Александр Андреевич,  
канд.техн.наук, доц. каф.  
«Автоматизированные  
эл.механические системы»  
Нац. технич. ун-та «ХПИ»,  
т. (057) 71-97-318



Червоный  
Андрей Владимирович,  
магистр каф.  
«Автоматизированные  
эл.механические системы»  
Нац. технич. ун-та «ХПИ»,  
т. (057) 74-22-099,  
e-mail: mx2970@gmail.com