

## ДИСКРЕТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С КИНЕСТЕТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ ПОЛОЖЕНИЯ

Ю.С. Смирнов, А.В. Соколов, А.Н. Лысов

г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

## DISCRETE DISPLACEMENT CONVERTER WITH KINESTHETIC POSITION CONVERTER

Y.S. Smirnov, A.V. Sokolov, A.N. Lysov

Chelyabinsk, South Ural State University

Рассмотрены варианты построения электромеханических (ЭМП) и электромехатронных (ЭМТП) преобразователей с использованием шагового электропривода (ШЭП), его динамика и её влияние на износ элементов передаточного механизма (ПМ), получены выражения для оптимизации его передаточного числа.

*Ключевые слова:* электромеханический и электромехатронный преобразователи, шаговый электродвигатель, энергоэффективность, самоорганизация, интеллект и синергия, передаточный механизм, оптимизация редукции и надёжность.

Options for construction of electromechanical (EMC) and electromechatronic (EMTC) converters with the use of step electric drive (SED) are considered, its dynamics and influence on gear mechanism (GM) elements wear are considered, formulae for optimization of its transfer number are received.

*Keywords:* electromechanical and electromechatronic converters, step electric drive, power efficiency, self-organization, intelligence and synergy, gear mechanism, optimization of reduction and reliability.

Для традиционного построения электромеханических преобразователей (ЭМП) используются непрерывные электродвигатели, запитываемые от источника переменного тока. Однако для автономных устройств, запитываемых от генераторов постоянного тока, аккумуляторов или емкостных накопителей, более предпочтительным является использование бесконтактных электродвигателей с постоянными магнитами (БЭПМ) и дискретной коммутацией.

Широкое применение получил дискретный шаговый электропривод (ШЭП) [1], структура которого предельно проста (рис. 1, а), а информационное обеспечение возложено на электромагнитное взаимодействие между ротором и статором ШЭД. Формирование закона управления осуществляется формирователем сигналов коммутации (ФСК), на выходе которого устанавливались величина (Mod) и знак (Sign) унитарного кода, частота импульсов в котором задает скорость перемещения объекта управления (ОУ), а количество импульсов – его величину. При этом структурно ШЭП (рис. 1, а) оказывается разомкнутым по перемещению и может устойчиво работать в идеализированных условиях отсутствия помех и пропадания питания. Наличие этих факторов в боль-

шинстве случаев исключают применение разомкнутого ШЭП в ответственных системах.

Введение контура главной обратной связи (ГОС) по перемещению устраняет основной недостаток разомкнутого ШЭП. В робототехнике и мехатронике наибольшее распространение получили кинестетические датчики перемещения (КДП). В настоящее время свыше 70 % информационных устройств промышленного производства реализуют кинестетические функции [2].

На рис. 1, б представлены выходные характеристики трех типов КДП: индукционного датчика положения (ИДП), линейного вращающегося трансформатора (ЛВТ) и бесконтактного магнитного датчика (БМД). Для линейного преобразования перемещения в диапазоне  $\pm 360^\circ$  используются преобразователи «угол – параметр-код» с синусо-косинусным вращающимся трансформатором (СКВТ) [2] в амплитудном или фазовом режимах [3]. Механически КДП сопрягается непосредственно или через передаточный механизм (ПМ) с ОУ, а информационно – с ФСК (см. рис. 1, а).

Вариант ЭМП (рис. 2, а) с транзисторным электронным коммутатором (ЭК) и ШЭД типа ДШ-0,04В потребляет от сети до 30 Вт при парной коммутации в режиме фиксированной стоянки под

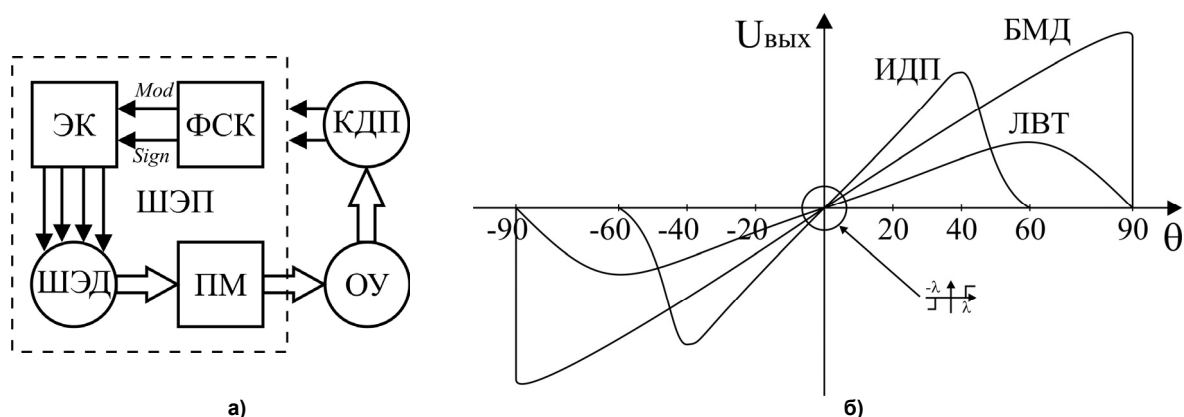


Рис. 1. Структура ЭМП с ШЭД (а) и выходные характеристики КДП (б)

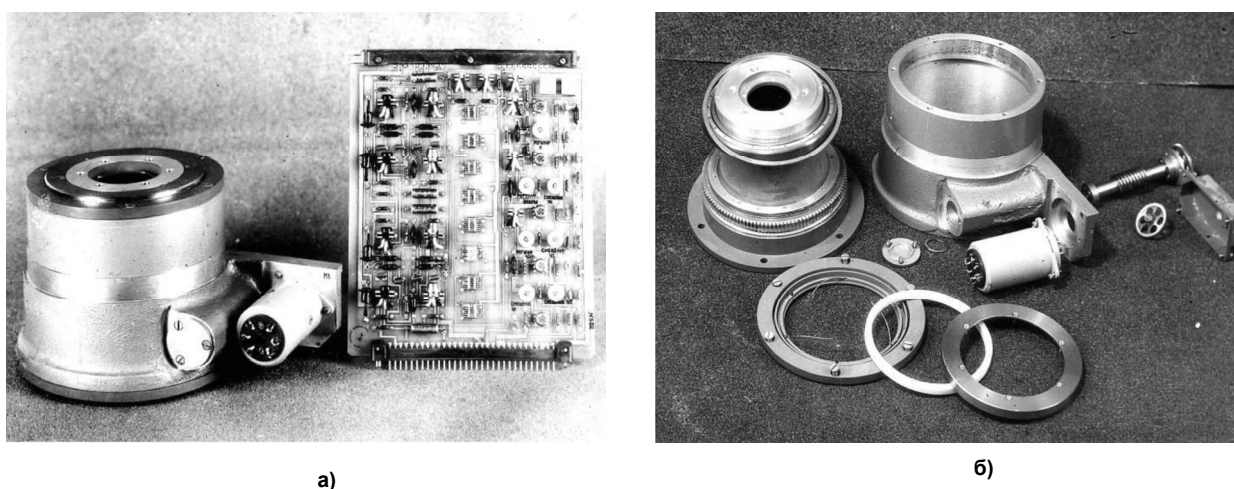


Рис. 2. Вариант ЭМП с транзисторным ЭК (а) и ШЭД типа ДШ-0,04В (б)

током. Электроника размещается на типовой плате. Механизм (рис. 2, б) состоит из цилиндрической и червячной передач – последняя является необратимой, что устраняет влияние ОУ через ПИМ на ШЭД.

**Электромехатронный преобразователь (ЭМП)** благодаря структурным и алгоритмическим изменениям в электронной части позволяет в 2 раза повысить энергоэффективность преобразования за счет использования ШЭД большей мощности с прежним потреблением от сети и механизмом (см. рис. 2, б).

ЭМП отличается от ЭМП следующими особенностями.

**1. Синергическим характером интеграции составляющих, который определяется тем, что создается устройство, обладающее свойствами, превышающими возможности каждого из них и их суммы.**

**2. Непременным условием создания ЭМП является его интеллектуализация на основе оценки значений координат перемещения, за которые приняты позиционная ошибка или скорость ее изменения.**

Поскольку ЭМП должен обладать интеллектом, то наличие ГОС является не только достаточным, но и необходимым условием отнесения этого преобразователя энергии и формы информации к ЭМП. Наличие контура ГОС позволяет придать ему второй необходимый и достаточный признак – синергический эффект, позволяющий в результате интеграции в едином устройстве информационной и исполнительной частей получить эффект, превышающий сумму эффектов составляющих.

Повышение эффективности замкнутых ЭМП с ШЭД стало возможным благодаря использованию их алгоритмических возможностей в части микропрограммного управления [3]. Это позволило реализовать самоорганизующиеся структуры интеллектуальных ЭМП, обладающих синергией на основе структуры, представленной на рис. 3, а.

В отличие от структуры ЭМП (см. рис. 1, а) она содержит формирователь алгоритмов управления (ФАУ), который действует на основе оценки информации, поступающей от КДП, формируя сигнал Алг смены алгоритма управления ШЭД. В пределах линейной части выходной характеристики КДП (см. рис. 1, б) ШЭД управляется по алгоритму парной коммутации в направлении умень-

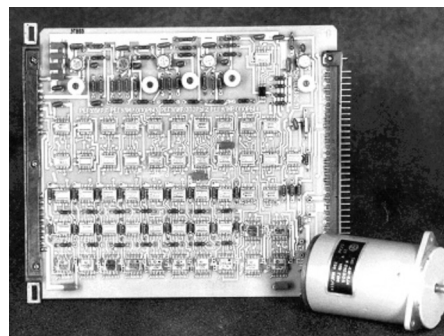
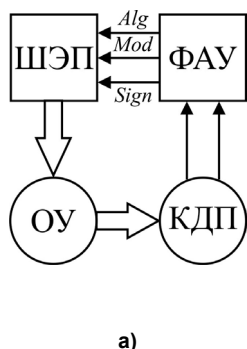


Рис. 3. Структура ЭМТП (а) и его микроэлектроника с ШЭД типа ДШ-0,1В (б)

нения рассогласования. При входе в зону нечувствительности  $\pm\lambda$  (см. рис. 1, б) ротор ШЭД фиксируется на алгоритме поочередной коммутации, при котором потребление тока снижается вдвое по сравнению с алгоритмом парной коммутации. С целью устранения периодических режимов направление последнего шага сохраняется прежним относительно направления входа в зону, что приводит к снижению погрешности позиционирования и износа элементов ПМ. Построение и работа ФАУ описаны в [3].

Структурное, алгоритмическое и информационное обеспечение процесса управления в сочетании с удачной конструкцией ПМ (см. рис. 2, б) позволили реализовать в процессе модернизации самоорганизующийся ЭМТП с удвоенным выходным моментом за счет применения ШЭД типа ДШ-0,1В (рис. 3, б) без увеличения потребляемой мощности. Микроэлектроника ЭМТП выполнена на отечественных ИМС и размещена на типовой плате (рис. 3,б). В настоящее время ведутся работы по замене ИМС средней степени интеграции на микроконтроллер типа AVR.

**Изменение структуры может иметь одну из трех целей: расширение адаптивных и функциональных возможностей, совершенствование систем в процессе эксплуатации. Рассмотренный пример самоорганизующейся ЭМТП с ШЭД иллюстрирует одновременную реализацию всех трех целей, т. е. комплексное решение задачи повышения эффективности.**

При решении задачи идентификации динамических свойств комплекса «ЭК-ШЭД», являющегося основным динамическим звеном замкнутого ЭМТП, был учтен постулат академика А.Ю. Ишлинского о том, что САУ любой сложности реагирует на входное ступенчатое воздействие, в нашем случае переключение обмоток ШЭД, подобно звену второго или третьего порядка. Эксперимент и моделирование подтвердили правомерность применения постулата [4].

Анализ устойчивости замкнутого ЭМТП с ШЭД произведен в соответствии со структурой на рис. 4. Пользуясь теоремами смещения, линейно-

сти и сдвига, получим импульсную передаточную функцию для импульсной системы с безразмерным временным запаздыванием  $\sigma = t_3/T_y$  [5]:

$$K^*(q, \epsilon) = \frac{e^q}{e^q - 1} - \frac{e^{2q} \cos \bar{\omega} \epsilon - e^q e^{-\eta} \cos \bar{\omega} (1 - \epsilon)}{e^{2q} - 2e^q e^{-\eta} \cos \bar{\omega} + e^{-2\eta}} e^{-\eta \epsilon} - \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \frac{e^q \sin \bar{\omega} (1 - \sigma) + e^{-\eta} \sin \bar{\omega} \sigma}{e^{2q} - 2e^q e^{-\eta} \cos \bar{\omega} + e^{-2\eta}} e^{-\eta (1 - \sigma)}. \quad (1)$$

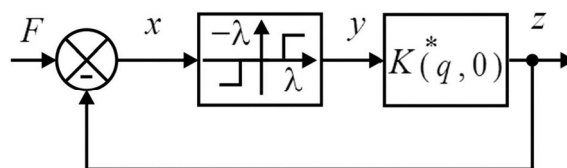


Рис. 4. Эквивалентная структура ЭМТП с ШЭД

**Оптимизация величины редукции ПМ.** Диапазон вариаций редукции  $i_p$  ПМ ограничен условиями, в которых для достижения требуемого быстродействия

$$i_{PB} = \alpha_{дв} f_{упр} / \Omega_{max}, \quad (2)$$

а для получения необходимой точности

$$i_{PB} < \alpha_{дв} / \delta_{доп}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{дв}$  – величина шага двигателя;  $f_{упр}$  – частота управляющих импульсов;  $\Omega_{max}$  – максимальная скорость входного воздействия;  $\delta_{доп}$  – допустимая величина статической ошибки ЭМТП.

Определим выражение для получения оптимального передаточного числа ПМ, обеспечивающего максимальные ускорения исполнительного вала механизма. Из выражений (2) и (3) легко получить пределы изменения нагрузочного момента двигателя; линеаризуя зависимости в предлагаемых рабочих точках характеристики, получаем выражение вида

$$f_{дв} = f_0 \left( 1 - k \frac{J_H}{J_p} \right) - k_1 M_{пр}, \quad (4)$$

где  $f_0$  – частота импульсов холостого хода ШЭД;  $k$  – коэффициент, учитывающий влияние момента инерции нагрузки;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий влияние момента нагрузки типа «сухого» трения;  $M_{пр}$  – приведенный к валу ШЭД момент нагрузки.

Скорость  $\omega_H$  выходного вала ПМ определяется выражением

$$\omega_H = \frac{\alpha_{дв}}{i_p} \left\{ f_0 \left[ 1 - \frac{k \left( \frac{J_H}{i_p^2} + J_{ред} \right)}{J_p} \right] - k_1 \frac{M_H}{i_p} \right\}. \quad (5)$$

Приравняв нулю производную  $\frac{d\omega_H}{di_p}$ , получим

выражение

$$i_p^2 - \frac{2k_1 M_H}{\left( 1 - k \frac{J_{ред}}{J_p} \right) f_0} i_p - \frac{3k \frac{J_H}{J_p}}{1 - k \frac{J_{ред}}{J_p}} = 0. \quad (6)$$

Оптимальное передаточное число  $i_{опт}$  ПМ определяется:

$$i_{опт} = \frac{k_1 M_H}{\left( 1 - k \frac{J_{ред}}{J_p} \right) f_0} + \sqrt{\left[ \frac{k_1 M_H}{\left( 1 - k \frac{J_{ред}}{J_p} \right) f_0} \right]^2 + \frac{3k \frac{J_H}{J_p}}{1 - k \frac{J_{ред}}{J_p}}}. \quad (7)$$

Величина момента инерции ПМ, как показывает опыт проектирования ЭМТП с ШЭД, находится в диапазоне

$$J_{ред} = (0,3 \dots 0,8) J_p. \quad (8)$$

Наряду с положительными сторонами при использовании ШЭД в ЭМТП часто возникают вопросы, связанные с проектированием ПМ. Это

связано с импульсным возбуждением обмоток двигателя и приводит к дискретному характеру перемещения ротора. Это дискретное перемещение, сопровождающееся колебаниями ротора в пределах шага (1), вызывает существенное увеличение динамических нагрузок на ПМ. Поэтому вопросы, связанные с исследованием надежности механизмов с ШЭД, имеют важное значение с точки зрения эксплуатации.

Идентификация динамических показателей ЭМТП с ШЭД [4] позволяет по иному подойти к исследованию надежности механических передач. В связи с тем, что при больших изменениях физических параметров ЭМТП с ШЭД его относительные единицы [1] изменяются в сравнительно небольших диапазонах, удается обойтись сравнительно небольшим числом испытаний и результаты этих испытаний распространить на большое число ПМ.

Для определения динамических нагрузок, действующих на механизмы, необходимо определить величину угловых ускорений. Используя систему относительных единиц и эквивалентную структуру ЭМТП с ШЭД (см. рис. 4), удается построить зависимость относительного ускорения  $\varepsilon$  как функцию относительной частоты управляющих импульсов  $f^*$  (рис. 5, а). Определение относительного ускорения проводилось методом фазовой поверхности (характеристика 1), при моделировании на ЭВМ (характеристика 2) и экспериментально (характеристика 3). Величина истинного ускорения легко определяется из соотношения

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \omega_0^2 \cdot \frac{d^2\theta}{d\tau^2} = \frac{M_{max}}{J_{\Sigma}} \cdot \frac{d^2\theta}{d\tau^2}. \quad (9)$$

Сопоставляя результаты (рис. 5, а), можно отметить, что в расчетах надежности при определении ускорений, действующих на ПМ, можно использовать метод фазовой поверхности, который дает несколько завышенные результаты. Экспериментальные характеристики износа приведены на рис. 5, б.

Результаты испытаний показали недопустимость возникновения в ЭМТП с ШЭД периодиче-

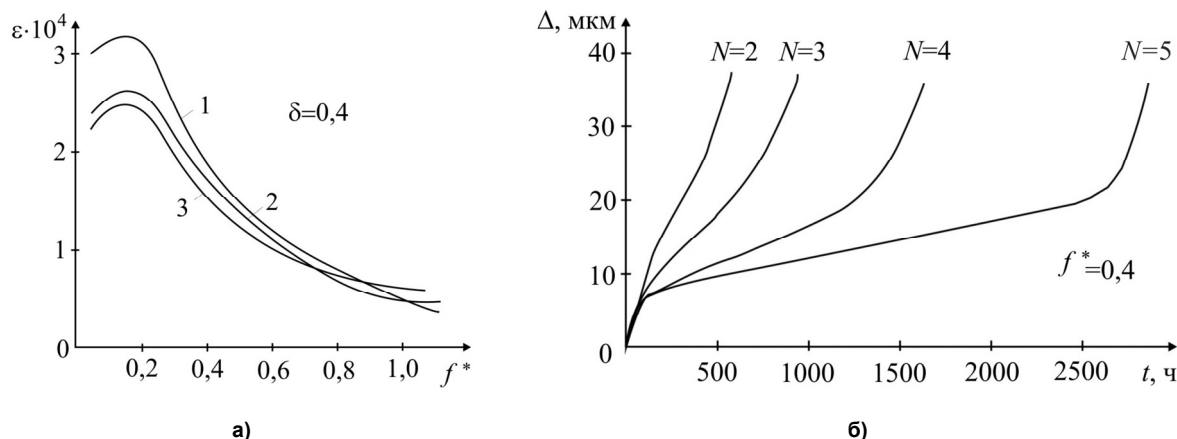


Рис. 5. Характеристика износа

ских режимов с малыми периодами даже несмотря на то, что они могут не влиять на качество всей системы. Если при отсутствии периодических режимов продолжительность наработки  $t$  до катастрофического износа составляет приблизительно 2500 часов, то при наличии периодических режимов износ до того же уровня наступает значительно быстрее. Так, например, если периодический режим имеет относительный полупериод  $N=2$ , то продолжительность наработки составляет всего 250 часов (рис. 5, б).

Введение контура местной обратной связи (МОС) переводит БЭПМ в режим вентильного электродвигателя (ВЭД), имеющего по сравнению с ШЭД более высокую энергоэффективность. Благодаря количественным изменениям динамические характеристики ЭМТП претерпевают качественное изменение, состоящее в переходе от колебательного характера перемещения в пределах шага к апериодическому, что согласуется с положениями упомянутого выше постулата.

Переход в ЭМТП на использование ВЭД вместо ШЭД позволяет удвоить ресурс работы элементов ПМ до катастрофического износа. Дальнейшее повышение надёжности ЭМТП достигается в его безредукторных вариантах [5, 6].

В заключение следует отметить, что исполнение ПМ характеризуется большим разнообразием, так же как и существенными вариациями нагрузок, действующими на механические передачи. Поэтому созданию прецизионных ЭМТП [7], обладающих повышенной мощностью является перспективным направлением электромехатроники.

#### **Литература**

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под общ. ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
2. Воротников, С.А. Информационные устройства робототехнических систем: учебное пособие / С.А. Воротников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.
3. Домрачев, В.Г. Цифроаналоговые системы позиционирования (Электромехатронные преобразователи) / В.Г. Домрачев, Ю.С. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
4. Смирнов, Ю.С. Эквивалентные структурные схемы дискретных электромехатронных преобразователей / Ю.С. Смирнов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 15. – № 3 (262). – С. 81–86.
5. Смирнов, Ю.С. Особенности динамики замкнутых электромехатронных преобразователей с шаговыми электродвигателями / Ю.С. Смирнов, А.В. Соколов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 15. – №3 (262). – С. 87–90.
6. Лысов, А.Н. Управление моделирующим стендом, построенным на базе трёхосного гиросtabilизатора / А.Н. Лысов, Е.С. Шмигун // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – № 9 (38), 2004. – С. 65–70.
7. Мощный высокоточный привод, защищенный патентами на системы стабилизации, двойных энкодеров и автоматического наведения компании Sky-Watcher // Популярная механика. – 2012. – № 4 (114). – С. 117.

**Поступила в редакцию 14.02.2012 г.**

**Смирнов Юрий Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Приборостроение», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-(351) 260-68-42.

**Smirnov Yuri Sergeevich** is a Doctor of Science (Engineering), an Honored Scientist of the Russian Federation, a Professor of Instrument Engineering Department of South Ural State University; tel: 8-(351) 260-68-42.

**Соколов Александр Васильевич** – старший преподаватель кафедры «Автоматизация механосборочного производства», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. E-mail: ialexsok@gmail.com.

**Sokolov Alexander Vasilevich** is a senior teacher of Mechanical Assembly Production Automation Department of South Ural State University. E-mail: ialexsok@gmail.com.

**Лысов Александр Николаевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Приборостроение», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-(351) 267-90-12. E-mail: anlysov74@yandex.ru.

**Lysov Aleksander Nikolaevich** is a Doctor of Science (Engineering), a head of Instrument Engineering Department of South Ural State University. E-mail: anlysov74@yandex.ru; tel: 8-(351) 267-90-12.