

СТРУКТУРНОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ю.С. Смирнов, П.Б. Серебряков, А.В. Соколов

STRUCTURAL AND ALGORITHMIC ELECTRO-MECHATRONIC CONVERTERS

Yu.S. Smirnov, P.B. Serebryakov, A.V. Sokolov

Рассмотрены особенности структурного и алгоритмического обеспечения электро-мехатронных преобразователей (ЭМТП), осуществляющих трансформацию энергии и информации в мехатронных системах (МС). Показано, что ЭМТП с бесконтактными электродвигателями с постоянными магнитами (БЭПМ) в режиме пошагового управления не обеспечивают высоких показателей плавности и надёжности работы из-за колебательного характера перемещения, при пошаговом управлении. Показана целесообразность перехода к самокоммутации, при которой БЭПМ превращается в вентильный электродвигатель (ВЭД), который в безредукторном варианте ЭМТП становится моментным электродвигателем (МЭД).

Ключевые слова: составляющие перемещения; электромеханические, электро-мехатронные и кинестетические преобразователи; разомкнутые, замкнутые, самоорганизующиеся, дискретные и цифровые системы; динамика и плавность перемещения; переходный процесс и устойчивость движения.

The features of the structural and algorithmic electro-mechatronic converters (EMTC) carrying out the transformation of energy and information in mechatronic systems (MS). It is shown that EMTC with brushless permanent-magnet motors (BPMM) in mode of the step control do not provide high levels of smoothness and reliability of work due to the oscillatory nature of the step control. The expediency of the transition to self-synchronization, in which BPMM into a brushless DC motors (BLDC), which version of EMTC is gearless motor torque (TM).

Keywords: movement components; electromechanical, electro-mechatronic and kinesthetic converters; open, loop, self-organizing, discrete and digital systems; dynamics and smooth movement; transient response and stability of the motion.

Формирование нового научно-технического направления (НТН)

Современные методы изготовления измерительной аппаратуры, оптических изделий, механической и лучевой обработки материалов, сборочные и манипуляционные процессы в большинстве случаев требуют управления большими перемещениями с высокой точностью и плавностью.

Это привело к формированию нового НТН «МЕХАТРОНИКИ» (Mechatronics). Термин был предложен японским инженером Tetsuro Moriga (Тецууро Мори) в 1969 г. Название получено комбинацией слов «МЕХАника и электРОНИКА». Компанией Yaskawa Electronic он зарегистрирован

в качестве торговой марки в 1972 г. Актуальность развития направления подтвердил S. Yaskawa (С. Яскава) в докладе «Future Trends in Intelligent Mechatronics Systems» на VII Mechatronics Forum, Sept. 2000 in Atlanta, заявив: «Эта концепция увеличила производительность в таких отраслях, как автомобилестроение, компьютеры, средства связи и дала возможность глобальному развитию. Это привело к эффективности массового производства. Оно было сконцентрировано на получение материальной выгоды».

Для выработки движущих сил эффективными оказываются электромехатронные преобразователи (ЭМТП), преобразующие аналоговую или цифровую информацию в перемещение. В качестве исполнительного элемента в ЭМТП оказывается

Смирнов Юрий Сергеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры приборостроения, Южно-Уральский государственный университет.

Серебряков Пётр Борисович – аспирант кафедры приборостроения, Южно-Уральский государственный университет; Silver87@bk.ru

Соколов Александр Васильевич – старший преподаватель кафедры автоматизации механосборочного производства, Южно-Уральский государственный университет; iaexsok@gmail.com

Smirnov Yury Sergeevich – professor of Instrument making Department of South Ural State University.

Serebryakov Petr Borisovich – postgraduate student of Instrument making Department of South Ural State University; Silver87@bk.ru

Sokolov Alexander Vasilevich – senior teacher of Automation of machine-assembling manufacture Department of South Ural State University; iaexsok@gmail.com

предпочтительным использование бесконтактных электродвигателей с постоянными магнитами (БЭПМ), т. е. шаговых (ШЭД), вентильных (ВЭД) и моментных (МЭД), имеющих различные конструкции (рис. 1). Особенность БЭПМ состоит в том, что они способны ступенчато менять в широких пределах свои выходные характеристики путем изменения алгоритмического и структурного обеспечения.

Они определяют выходные параметры ЭМТП в части момента, быстродействия и точности преобразования энергии и формы информации мехатронной системой (МС). За рубежом существенное значение придают совершенствованию электродвигателей, которые приводят в действие ЭМТП: *«Современные электродвигатели, при той же мощности, меньше по размерам и более эффективны: их КПД – 85 % против 45 % у старых»*, заявил изобретатель Д. Дайсон, в интервью журналу «Популярная механика» (2010. – № 11. – С. 88–90).

Алгоритмические возможности управления БЭПМ

Эти возможности раскрываются при микропрограммном управлении, особенности которого наглядно иллюстрируются на примере четырехобмоточных магнитоэлектрических и индукторных ШЭД [1].

Множество алгоритмов коммутации таких ШЭД (схема подключения показана на рис. 2, а) содержат подмножества четырёх-, восьми- и двухтактных алгоритмов коммутации, области применения и широта использования которых разнообразны. Наибольшее распространение получило подмножество четырёхтактных алгоритмов. Оно содержит алгоритм парного (рис. 2, б), поочередного (рис. 2, в) и одновременного включения трех обмоток (рис. 2, г).

Поочередное включение обмоток используется там, где определяющим является требование минимальной потребляемой мощности, поскольку она снижается вдвое по сравнению с парным включением обмоток. Следует отметить, что момент ШЭД при такой системе коммутации уменьшается в $2\sqrt{2}$ раз по сравнению с парной коммутацией. Положительной характеристикой этого типа коммутации является повышение быстродействия ШЭД за счет уменьшения его демпфирования. Это свойство используется при комбинированном управлении БЭПМ, когда он используется в ЭМТП поочередно в режимах пошагового управления и самокоммутации. Положения ротора при этом способе управления сдвинуты относительно положений при парной коммутации на половину шага.

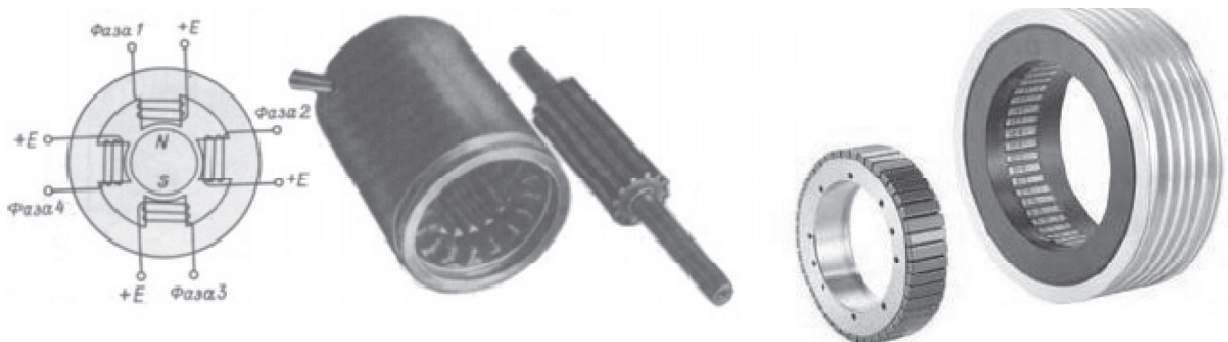


Рис. 1. Схема и варианты конструкции БЭПМ

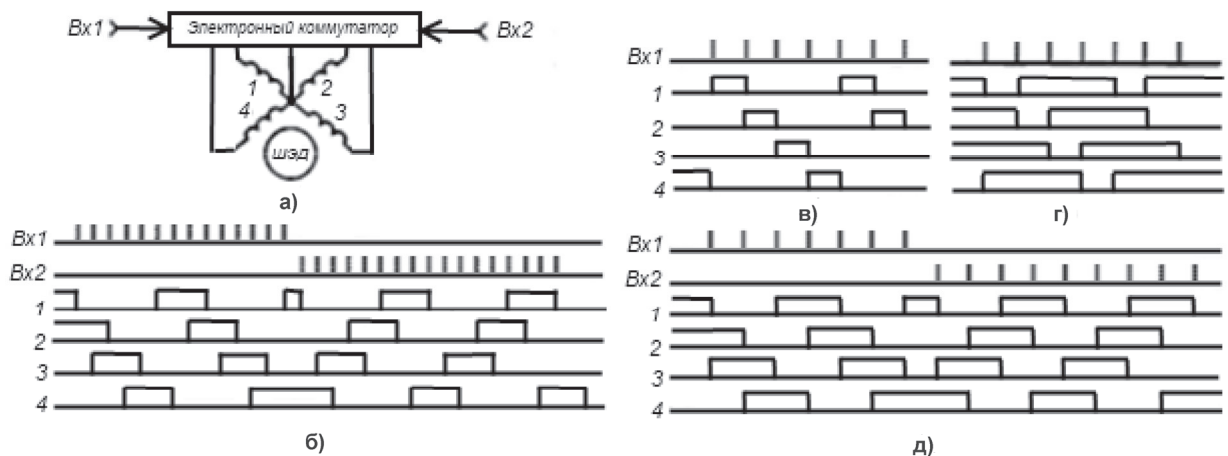


Рис. 2. Алгоритмы коммутации четырёхобмоточного ШЭД

Алгоритм управления четырехобмоточных ШЭД с поочередным включением обмоток является элементарным алгоритмом. Это один из членов обладающего свойством полноты подмножества четырёхтактных алгоритмов управления, выделенного из множества возможных алгоритмов, обладающих свойством неразложимости. Неразложимость состоит в том, что этот алгоритм не может быть заменен комбинацией других алгоритмов. Свойство полноты состоит в том, что любой неэлементарный алгоритм, принадлежащий множеству алгоритмов управления ШЭД, может быть выполнен с помощью совокупности элементарных алгоритмов.

Алгоритм коммутации с одновременным включением трех смежных обмоток применяется при работе ШЭД на инерционную нагрузку с малым трением для улучшения устойчивости в области резонансных частот. Энергетические показатели ШЭД ухудшаются по сравнению с ШЭД с парной коммутацией, поскольку потребляемая мощность увеличивается на 50 %, а момент ШЭД только на 6 %. Быстродействие системы падает за счет увеличения собственного демпфирования. Алгоритм, реализуемый при такой коммутации, относится к подмножеству четырёхтактных алгоритмов и является неэлементарным, поскольку может быть заменен комбинацией из трех элементарных алгоритмов.

Четырёхтактный алгоритм коммутации с парным включением обмоток получил наибольшее распространение благодаря более высоким энергетическим показателям и простоте построения однорежимный электронный коммуникатор (ОЭК). С поступлением импульса управления одна из обмоток обесточивается при одновременном подключении третьей обмотки, смежной с оставшейся включенной. Эта система коммутации принята в настоящее время в качестве стандартной, а изготовители ШЭД приводят все паспортные данные на двигатели для этого алгоритма, который является комбинацией двух элементарных алгоритмов.

В системах повышенного быстродействия находят применение восьмитактные алгоритмы коммутации, которые при усложнении логической части ОЭК дают увеличение частоты отработки ШЭД. При этом единичные перемещения уменьшаются в 2 раза по сравнению с четырёхтактной коммутацией, что соответствует естественному дроблению шага. Подмножество восьмитактных алгоритмов содержит два неэлементарных алгоритма:

а) одновременно возбуждены одна или две обмотки управления (рис. 2, д) $1-12-2-23-3-34-4...$, т. е. в течение периода коммутации напряжение приложено к каждой обмотке в течение трех тактов, а остальные пять тактов она обесточена. Такой алгоритм является совокупностью периодического чередования двух четырёхтактных алгоритмов: поочередной и парной коммутации;

б) одновременно возбуждены две или три обмотки $123-23-234-34-412...$, т. е. пять тактов периода каждая обмотка находится под током, а три – обесточена. Этот алгоритм является совокупностью чередования двух четырёхтактных алгоритмов: с одновременным возбуждением трех и двух обмоток.

С точки зрения оптимизации энергетических и динамических показателей управления магнитоэлектрическим ШЭД целесообразно осуществить по системе: три такта – импульс, пять тактов – пауза, а индукторным – наоборот.

Очень редко при пошаговом управлении используется двухтактная система коммутации. Она требует для работы введения в состав ОЭК схемы, задающей направление движения. Без неё ротор может попасть в состояние неустойчивого равновесия. Этот тип коммутации широко применяется при работе ШЭД в режиме самокоммутации. Переход от двухтактной к восьмитактной коммутации приводит к изменению единичного шагового перемещения в 8 раз.

Традиционная структура электромеханического преобразования (ЭМП)

Широкое применение получил разомкнутый дискретный шаговый электропривод (ШЭП), структура которого предельно проста (рис. 3, а) [1]. Она преобразует информацию формирователя траектории перемещения (ФТП) через формирователь сигналов коммутации (ФСК), однорежимный электронный коммутатор (ОЭК) и ШЭД (рис. 3, б и в) и передаточный механизм (ПМ).

Отличительной особенностью отечественных ОЭК от зарубежных, предусматривающих для каждого типоразмера ШЭД свою модель ЭК (см. рис. 3, в), является унификация, обеспечивающая управление одним ОЭК гаммой ШЭД (см. рис. 3, б), выпускаемой различными изготовителями. Это достигнуто оригинальным построением ОЭК [2], обеспечивающим автоматическое регулирование выходного тока путём введения обратной связи.

Информационное обеспечение процесса преобразования информации, задаваемой ФТП в формате унитарного кода, возложено на электромагнитное взаимодействие полей ротора и статора. Число импульсов по шине Mod определяет величину, сигнал Sign – направление, а частота следования импульсов – скорость и ускорение. По существу такое построение представляет наиболее простой вариант «бессенсорного» ИО, обладающего рядом недостатков.

Независимо от алгоритма коммутации ШЭП (см. рис. 3, а) оказывается разомкнутым по перемещению и может устойчиво работать в идеализированных условиях отсутствия помех и пропадания питания. Это ограничивает его применение в ответственных МС.

Структурное повышение эффективности преобразования

Предложен, исследован и внедрен в ответственных устройствах альтернативный вариант (рис. 4), предусматривающий введение контура главной обратной связи (ГОС) посредством кинестетических сенсоров перемещения (КСП) [3].

Такое построение устраняет отмеченный выше недостаток за счет придания ШЭП свойства помехоустойчивости. Однако следует отметить, что разомкнутая (см. рис. 3) и замкнутая (см. рис. 4) структуры ЭМП с ШЭП не могут быть отнесены к ЭМТП из-за отсутствия в них интеллекта и синергии.

Самоорганизующийся ЭМТП с ШЭД

Структурное повышение эффективности в сочетании с алгоритмическими возможностями БЭПМ позволяют реализовать самоорганизующийся ЭМТП, обладающий необходимыми свойствами. В таком ЭМТП алгоритм работы ШЭД

изменяется автоматически в зависимости от значений выходного сигнала U_{Δ} измерительного устройства (ИУ) (рис. 5, а).

Отображение структурных и функциональных особенностей ЭМТП, обладающего интеллектом и синергетикой, представлена на рис. 5, б.

Структура самоорганизующегося ЭМТП представлена на рис. 6 [2].

В отличие от структуры ЭМП (см. рис. 3, а) она содержит ФАУ, который действует на основе оценки сигнала U_{Δ} (рис. 5, а) и формирует сигналы смены алгоритма Alg, Mod и Sign управления двухрежимным ЭК (ДЭК).

В пределах линейной зоны входной характеристики ШЭД управляется по алгоритму парной коммутации в направлении уменьшения рассогласования. При входе в зону нечувствительности $\pm\lambda$ (см. рис. 5,а) ротор ШЭД фиксируется на алгоритме поочередной коммутации, при котором потребление тока снижается вдвое по сравнению с алго-

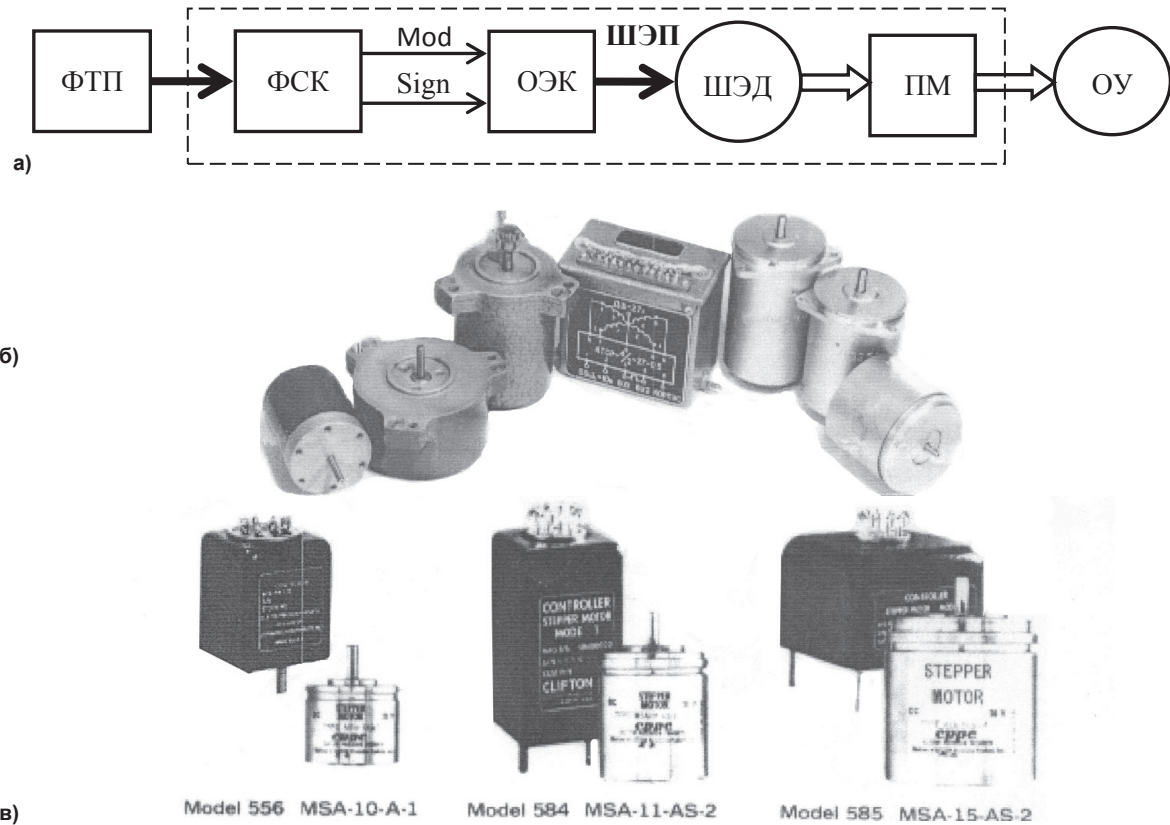


Рис. 3. Структура и элементы разомкнутого ШЭП

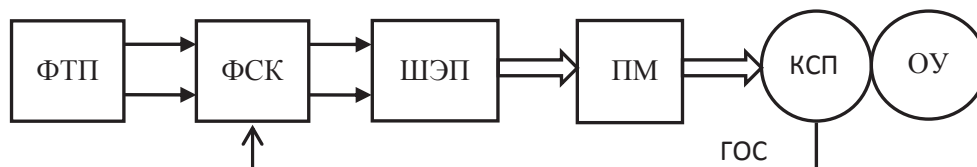


Рис. 4. Структура замкнутого ЭМП с КСП

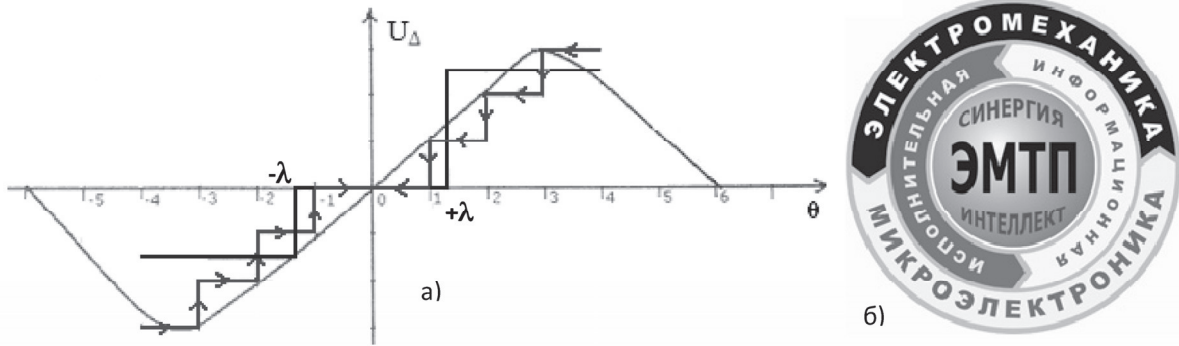


Рис. 5. Выходной сигнал измерительного устройства (а) и структура ЭМТП (б)

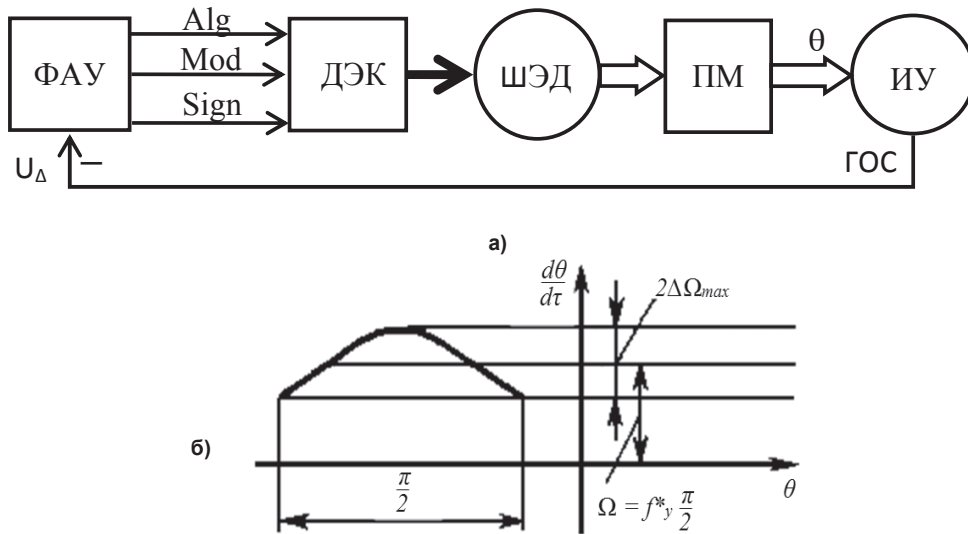


Рис. 6. Структура самоорганизующегося ЭМТП с ШЭД (а), изменение скорости движения (б)

ритмом парной коммутации. С целью устранения периодических режимов направление последнего шага сохраняется прежним относительно направления входа в зону нечувствительности, что приводит к снижению погрешности позиционирования и износа ПМ.

Поскольку ЭМТП должен обладать интеллектом, то наличие ГОС является не только достаточным, но и необходимым условием отнесения этого преобразователя энергии и формы информации к МС. Контур ГОС позволяет придать второй необходимый и достаточный признак МС – синергетический эффект, позволяющий в результате интеграции информационной и исполнительной частей (см. рис. 5, б) получить эффект, превышающий сумму эффектов составляющих.

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.

Оценка плавности и надёжности работы ПМ с ШЭД

Обеспечение устойчивой работы, плавности и надёжности МС потребовало исследования динамики замкнутого ЭМТП с ШЭД. При решении задачи идентификации динамических свойств комплекса ЭК–ШЭД, являющегося основным динамическим звеном ШЭП и ЭМТП, был учтён постулат академика А.Ю. Ишлинского о том, что САУ любой сложности реагирует на входное ступенчатое воздействие подобно звену второго или третьего порядка [4].

Непрерывная часть эквивалентной структурной схемы ШЭП и ЭМТП является колебательным звеном, оказывающим отрицательное влияние на плавность и надёжность работы ПМ, что исключает возможность их использования при высоких требованиях к этим показателям. Построение переходного процесса в ЭМТП с ШЭД производится по рекуррентной формуле и позволяет произвести

оценку динамических показателей и ресурса узлов системы. Наименьшим ресурсом обладает ПМ с редуктором, имеющим износ поверхностей зацепления.

При оценке надежности ШЭП и ЭМТП с ШЭД необходимо знать динамический момент, действующий на элементы ПМ. С этой целью следует определить ускорение ротора, возникающее вследствие элементарных перемещений поля статора. Определение усредненного ускорения с достаточной для практических расчетов точностью удобно производить при помощи метода фазовой плоскости, для чего на фазовом «портрете» находятся периодические режимы установившегося движения при заданной частоте управляющих импульсов. Для определения эквивалентного ускорения поведение ШЭД будем описывать нелинейным дифференциальным уравнением [2]

$$d^2\theta / d\tau^2 + \delta d\theta / d\tau + m(\gamma - \theta) = \mu_H.$$

Для повышения точности при построении фазовых траекторий лучше воспользоваться реальной зависимостью статического синхронизирующего момента M от угла рассогласования полей статора и ротора. Для отыскания периодического режима, соответствующего заданной частоте управляющих импульсов, воспользуемся очевидным для двухфазного ШЭД при парном алгоритме коммутации выражением: $\theta(t) = \theta(t + T_y) - \pi / 2$ [2]. Изменения скорости перемещения во времени представим в соответствии с рис. 6б в виде: $\overline{\Delta\Omega}(\tau) = \overline{\Delta\Omega}_{\max} \sin 2\pi \cdot f_y^* \tau$, где f_y^* – частота управляющих импульсов.

Эквивалентное значение ускорения, действующего за период:

$$\varepsilon_{\text{эке}} = \varepsilon_{\max} / \sqrt{2} = 2\pi \cdot f_y^* \overline{\Delta\Omega}_{\max} / \sqrt{2} \text{ или } \varepsilon_{\text{эке}} = \sqrt{2}\pi \cdot \Omega_0^2 \overline{\Delta\Omega}_{\max} f_y^* / \bar{p}, \text{ где } \bar{p} - \text{число пар полюсов.}$$

Это ускорение испытывает ротор в режиме установившегося движения. В зависимости от условий работы ШЭД в переходных режимах значение этого ускорения может резко возрастать. Будем полагать, что в период пуска движение ротора происходит под действием среднего момента ШЭД. В этом случае ускорение на первых шагах приближенно можно определять по формуле $\varepsilon_{\text{пуск}} \approx (M_{\text{ср}} - M_H) J_{\text{пр}}$, где $M_{\text{ср}}$ и M_H соответственно моменты средний и нагрузочный, а $J_{\text{пр}}$ – приведённый момент инерции.

Как показывают исследования, средняя продолжительность выхода двигателя на установившийся режим при реальных нагрузках составляет от 4 до 16 шагов в зависимости от f_y^* , $J_{\text{пр}}$ и M_H . Приняв среднюю продолжительность выхода на установившийся режим в пределах 10 шагов и зная среднее количество включений ШЭД в единицу

времени, несложно определить среднее значение ускорений, действующих на элементы ПМ.

Расчеты и эксперименты [3] показали, что ЭМТП с ШЭД имеет области частот управления, при которых нагрузки на элементы возрастают, что приводит к неравномерному движению и повышенному износу ПМ.

Дискретный вариант ЭМТП с ВЭД

Средством устранения этого фактора является переход в ЭМП к самокоммутации, при которой БЭПМ, будучи охвачен контуром местной обратной связи (МОС), трансформируется в ВЭД [2], где преобразование энергии оптимизируется. При проектировании ЭМТП с ВЭД учитывается то, что он помимо формы информации осуществляет преобразование энергии. Энергоэффективность ЭМТП повышается ограничением поступления энергии, рассеиваемой при колебательном характере дискретных перемещений в ЭМТП с ШЭД.

Структура ЭМТП с ВЭД (рис. 7, а) строится на основе разомкнутого ШЭП (см. рис. 3, а) с добавлением полирежимного ЭК (ПЭК) (рис. 7, б и е) датчика положения ротора (ДПР), конструкция которого может быть встроена в БЭПМ или ПМ (рис. 7, г) и выполнена на основе эффектов Холла, гигантского магниторезистивного эффекта (ГМР) или оптронных пар с обтюратором (рис. 7, ж).

В ЭМТП с ВЭД командный сигнал, осуществляющий управление ПЭК формируется по каналу МОС. При необходимости БЭПМ может управляться через дополнительный вход ПЭК в пошаговом режиме. Введение в ЭМТП с ВЭД контура ГОС (пунктир) открывает новые возможности повышения уровня интеллектуализации процесса управления БЭПМ за счет ответвления от ГОС контура МОС. При этом на каждом дискретном перемещении внутри ЭМТП производится оценка реального положения ротора БЭПМ и принимается решение о последующей команде. Имеет место и синергетический эффект, состоящий в том, что количественные изменения в энергоэффективности, быстродействии и плавности движения по сравнению с ШЭП приводят к его трансформации в ВЭД, т. е. существенным качественным изменениям.

Улучшение качества движения

Важной задачей дальнейшего повышения эффективности ЭМТП с ВЭД является улучшение качества движения, в частности, его плавности, от которой зависят в значительной степени технологические показатели МС. Плавность движения определяется конструктивными особенностями комплекса ЭК – БЭПМ и динамикой ЭМТП, которая зависит от его структурного и алгоритмического обеспечения, требующего для функционирования соответствующего уровня информационного обеспечения (ИО). Оно задаётся ФТП, в соответствии с типовыми временными диаграммами составляющих перемещения (рис. 8): величины θ

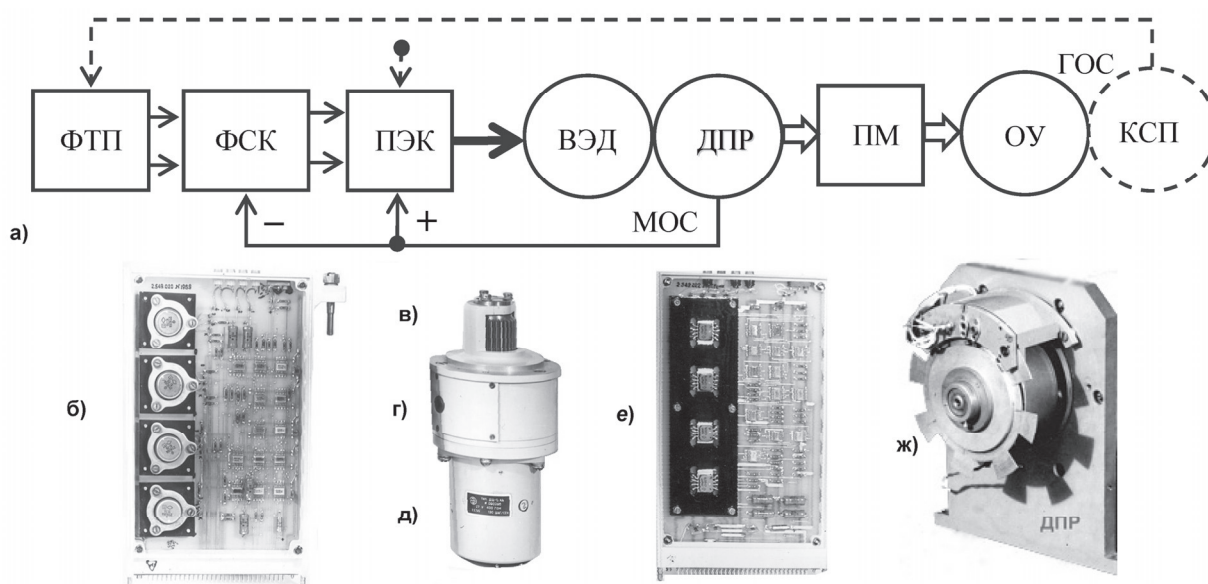


Рис. 7. Структура дискретного ЭМТП с ВЭД (а), варианты ПЭК (б и е) с ПМ (в), ДПР (г, ж) и ВЭД (д)

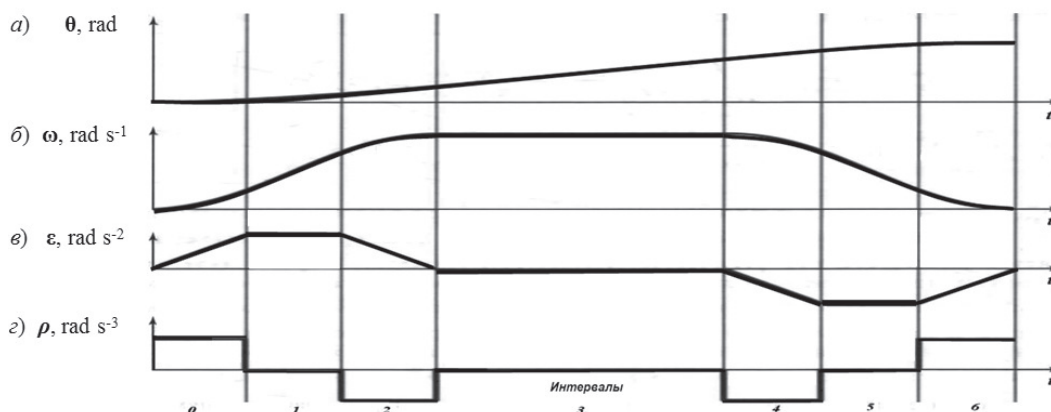


Рис. 8. Типовые временные диаграммы составляющих перемещения: величины θ (а), скорости ω (б), ускорения ϵ (в) и рывка ρ (г)

(а), скорости ω (б), ускорения ϵ (в) и рывка ρ (г) [5], который обычно реализуется повышением питания.

Безредукторный дискретный ЭМТП с МЭД

Достижение высоких показателей равномерности (плавности) движения, при одновременном повышении точности позиционирования достигается в безредукторном варианте ЭМТП с БЭПМ. В этом случае БЭПМ работает в режиме МЭД. По аналогии с ВЭД устойчивость и качество движения ЭМТП с МЭД зависят от его структуры и поэтому подаются целенаправленному воздействию, в то время как в ШЭП эти показатели зависят от параметров ЭК, ШЭД и ОУ, которые ограничено поддаются изменению.

Что касается точности ЭМТП, то основным фактором, препятствующим созданию прецизионных устройств, является мёртвый ход редуктора.

Согласно критерию Миллера динамическая ошибка в ЭМТП не может быть меньше удвоенной величины мёртвого хода редуктора, который трудно сделать менее 5 минут при больших сроках службы. В этих случаях рационален безредукторный вариант ЭМТП с МЭД с единым ИО (ЕИО) [6], использующий СКДУ в качестве ДПР и ПП (рис. 9).

При дискретном задании параметров ФТП и возможности использования ШИМ в регуляторах положения (РП), скорости (РС) и момента (РМ) структура безредукторного ЭМТП с МЭД представлена на рис. 9, где используется ЕИО на основе сочетания СКДУ с фазовым или амплитудным МЭП [6,7].

Безредукторный вариант ЭМТП в сочетании с ЕИО позволяет упростить структуру устройства и трудоёмкость его изготовления, за счёт исключения самого дорогого и трудоёмкого интерфейса между ОУ и МЭД.

