

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ю.С. Смирнов, А.Н. Лысов, П.Б. Серебряков

г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

ELECTROMECHATRONIC CONVERTERS DATAWARE

Y.S. Smirnov, A.N. Lysov, P.B. Serebryakov

Chelyabinsk, South Ural State University

Рассмотрены варианты информационного обеспечения (ИО) электромехатронных преобразователей (ЭМП), отличающиеся достоверностью формирования составляющих перемещения. Показаны преимущества единого информационного обеспечения (ЕИО) и предложен пример его реализации на основе микроэлектронного преобразователя (МЭП) выходных сигналов фазовращателя (ФВ).

Ключевые слова: внутреннее, «бессенсорное», инкрементальное, многокомпонентное и единое информационное обеспечение, формирование цифровых эквивалентов перемещения.

The variants of the dataware (DW) electro-mechatronic converters (EMTC), characterized by the formation of components of authenticity movement. The advantages of a common dataware (CDW) and offered an example of its implementation on the basis of microelectronic converter (MEC) of the output signals of the phase shifter (PS).

Keywords: dataware, electro-mechatronic converters, internal, "sensorless" incremental, multi- and common dataware, digital equivalents of the formation of movement: the magnitude and quadrature projections, speed and acceleration.

В работах отечественных [1] и зарубежных [2] авторов обращается внимание на важность формирования эффективного информационного обеспечения (ИО) для прецизионного управления перемещением. Принципиальным решением этой задачи становится при создании безредукторных электромехатронных преобразователей (ЭМП) [3] на основе бесконтактных электродвигателей с постоянными магнитами (БЭПМ), которые в зависимости от уровня информационного обеспечения могут использоваться как шаговые (ШЭД), вентильные (ВЭД) и моментные (МЭД). В последнем случае помимо электрических эквивалентов величины θ , скорости ω и ускорения ϵ необходимыми становятся квадратурные составляющие перемещения, которые нужны для управления МЭД [3].

На рис. 1, а представлена структура ЭМП [2], где θ^* , ω^* и M^* соответственно величины ошибок по положению, скорости и моменту, а θ , ω и M соответственно величины текущих значений этих параметров. Она включает регулятор положения (РП), регулятор скорости (РС) и регулятор

момента (РМ), а также двигатель и нагрузку. Формирователь сигналов управления обеспечивает задание положения θ^* и скорости движения $d\theta^*/dt$. В ряде ЭМП [2–4] может задаваться профиль ускорения ϵ^* (рис. 1, г).

На временных диаграммах рис. 1, б, в, г представлены графики изменения составляющих перемещения: величины θ , скорости ω и ускорения ϵ .

Благодаря соответствующему уровню ИО структура (рис. 1, а) наиболее полно раскрывает возможности ЭМП в части управления перемещением, его скоростью и развиваемым на выходе моментом.

Известные структуры ИО можно разделить по степени достоверности формирования перемещения на 3 категории: низшую, среднюю и высшую.

К низшей категории относится внутреннее ИО (ВИО) разомкнутого шагового электропривода (ШЭП), в основе построения которого лежит концепция параметрической стабилизации программного управления перемещением на основе

* Работа посвящена 50-летию кафедры «Приборостроение» ЮУрГУ.

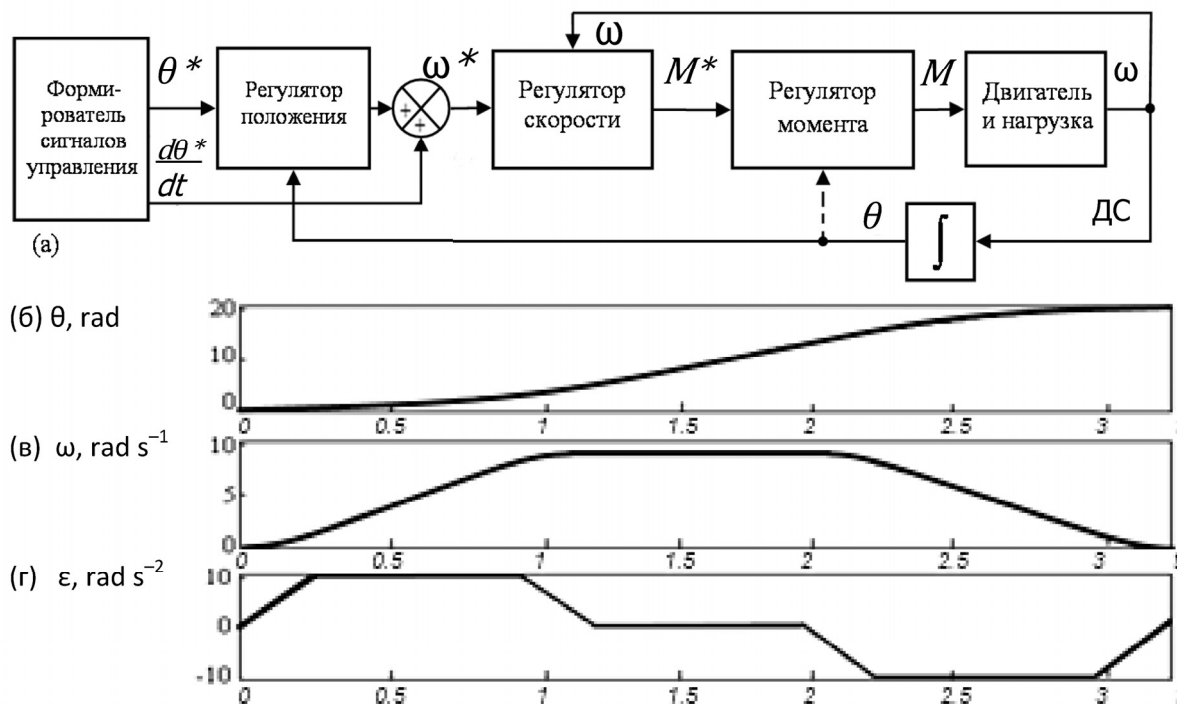


Рис. 1. Структура ЭМТП (а) и временные диаграммы составляющих перемещения: величины θ (б), скорости ω (в) и ускорения ϵ (г)

универсальных динамических характеристик [5]. Информационное обеспечение возложено на электромагнитные связи между ротором и статором. Такой ШЭП обладает низкой адаптивностью к внешним воздействиям: помехам и пропаданию питания из-за отсутствия главной обратной связи (ГОС). Предложено в [6] реализовать ГОС использованием датчика тока с последующим анализом полученной формы ЭДС или тока в обмотках управления посредством микропроцессора.

Получение параметров движения косвенным методом посредством компьютера исключает применение датчиков и интерфейсов, которые выполняют в ЭМТП механико-информационное преобразование. Функции формирования ИО возлагаются на микроэлектронную компоненту, упрощая электромеханическую часть ЭМТП [7].

Это достигается применением «бессенсорного» ИО (БИО). Реально создать систему (рис. 1, а), в которой РП определяет механический момент, который прикладывается к нагрузке непосредственно без внутренней обратной связи по скорости и моменту. В случае, когда достаточно управлять системой только по скорости, РП опускается. Когда система управляет только вращающим моментом, то исключаются РП и РС.

Датчик положения, обеспечивающий обратную связь в системе, может быть представлен следующими «бессенсорными» вариантами:

- при работе с двигателем переменного тока РМ требуется информация о положении (см. пунктирную линию, на рис. 1, а). Если обратная связь обеспечивается информацией по скорости, то воз-

можны «бессенсорные» схемы управления скоростью и крутящим моментом двигателей переменного тока за счёт интегрирования сигнала ω от датчика скорости (ДС) [4]. Этот вариант БИО, благодаря своей простоте, надёжности и экономичности, нашёл широкое применение в бытовых стиральных машинах с прямым приводом (Direct Drive) [2];

- обратная связь по положению не является необходимой для РМ двигателя постоянного тока, поэтому ДС (тахогенератор) может быть использован для обеспечения обратной связи по скорости. При этом возможны «бессенсорные» схемы управления, когда ДС не требуется [2].

На рис. 2 представлена структурная схема БИО, где U_s и I_s – напряжение и ток статора ЭМТП; X_m и X – выходные переменные соответственно реального ЭМТП и его компьютерной модели, а Δ – погрешность оценки [7].

Модели ЭМТП с ШЭД и ВЭД (см. пред. статью) могут быть использованы в этой структуре. Схема формирования БИО (рис. 2) работоспособна при адекватности компьютерной модели реальному ЭМТП. Недостатком БИО является необходимость предварительной процедуры «прокрутки» ЭМТП для формирования начальных условий работы, что в ряде применений технологически исключено.

Достижение средней степени достоверности в ряде случаев [2] возможно использованием инкрементального ИО (ИИО). Оно предусматривает применение для формирования величины переме-

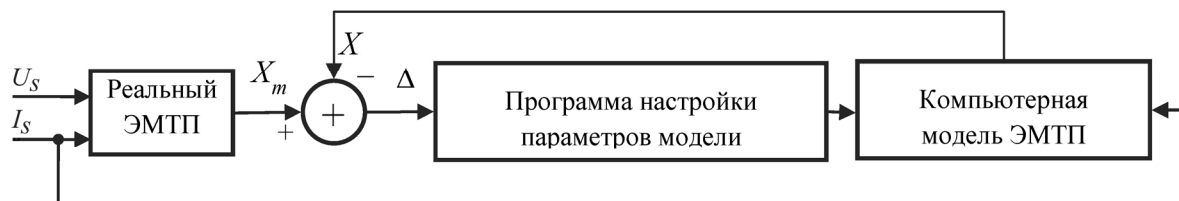


Рис. 2. Структурная схема БИО

щения число-импульсного первичного преобразователя (ПП), формирующего унитарный код, в котором число импульсов характеризует величину перемещения, а частота их следования – его скорость. Вариант ИИО позволяет упростить ПП и его интерфейс. Высокие быстродействие и разрядность микроконтроллеров при наличии вычислительного ресурса позволяют формировать цифровые эквиваленты скорости и ускорения, являющиеся соответственно первой и второй производной перемещения. При этом необходимо учесть существенный рост уровня помех при дифференцировании и сложности, возникающие при формировании составляющих перемещения на низких частотах вращения, что свойственно безредукторным системам [3]. Введение инкрементальной обратной связи в определённой степени повышает помехозащищённость ЭМТП. Однако главным недостатком варианта ИИО является отсутствие восстановления достоверной информации после пропадания питания. По этому показателю ИИО близок к ВИО и БИО. Вариант ИИО требует процедуры «прокрутки».

Достижение высокой степени достоверности обеспечивается многокомпонентным ИО (МИО), которое обычно предусматривает размещение в электромеханической части нескольких ПП. На их выходах формируются аналоговые или цифровые эквиваленты составляющих перемещения: величины, скорости и ускорения. К недостаткам МИО следует отнести необходимость использования нескольких ПП, что усложняет конструкцию электромеханики, повышает стоимость ЭМТП, снижает его

надёжность и увеличивает число связей с электронной компонентой, особенно при использовании многозарядных кодовых датчиков. Основные недостатки МИО устраняются в новых конструкциях интегральных ПП, формирующих несколько составляющих в одном устройстве. Их применение пока ограничивается высокой стоимостью и ограничениями свойственными ИИО.

Минимаксная стратегия построения ИО предусматривает применение единого ИО (ЕИО) и размещение в электромеханической части одного ПП.

На рис. 3 представлены (слева направо) аналоговые, инкрементальный и кодовые варианты ПП, которые используются в ЕИО.

Анализ возможных вариантов выполнения ЕИО показал, что оптимальным со всех точек зрения является построение ЕИО с использованием синусно-косинусного датчика угла (СКДУ) (рис. 3, а) в сочетании с микроэлектронным преобразователем его выходных сигналов в цифровые составляющие перемещения в амплитудном или фазовом режимах [3].

По сложности электромеханики этот вариант адекватен варианту с ИИО. Однако с точки зрения помехозащищённости он существенно его превосходит. По стоимости ПП они сопоставимы. Что касается сложности интерфейса между ПП и МЭП, то вариант с СКДУ уступает варианту с ИИО. Однако ЕИО с СКДУ по простоте интерфейса и дальности трансляции превосходит варианты МИО с кодовыми датчиками, требующими большего количества связей и устройств считывания информа-

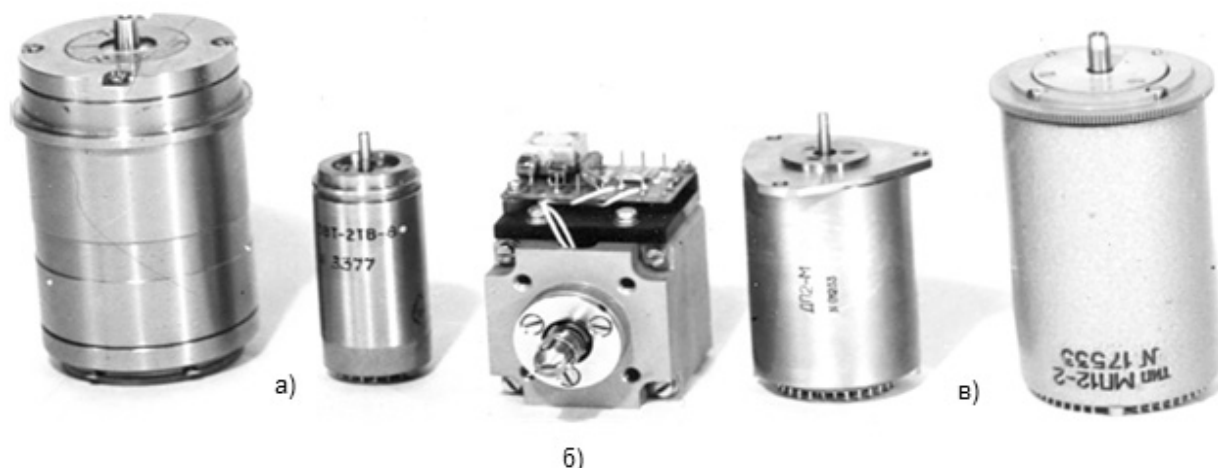


Рис. 3. Аналоговые (а), инкрементальный (б) и кодовые (в) ПП

ции, расположенных в непосредственной близости от ПП.

Существенным преимуществом ЕИО с СКДУ является то, что составляющие перемещения формируются в МЭП посредством интегрирования соответствующих сигналов в замкнутой цифровой системе.

На рис. 4. представлена схема формирования цифровых составляющих перемещения, в котором СКДУ работает в режиме фазовращателя (ФВ) [3].

Питание ФВ производится через формирователь опорных напряжений (ФОН) и делитель частоты (ДЧ) от генератора импульсов G . Формирователь преобразует выходной линейный код X на выходе ДЧ в коды $\sin X$ и $\cos X$, которые преобразуют его ЦАП в их аналоговые эквиваленты U_s и U_c .

Цифровой эквивалент угла поворота θ формируется из сдвига фазы между опорным напряжением ФВ и его выходным сигналом $U_\phi = U_{\max} \sin(\omega_0 t - \theta)$, где ω_0 – частота опорного напряжения. Процесс формирования N_θ не отличается от классического [3]. В канале преобразования угла имеется нуль-орган НО, преобразующий U_ϕ в прямоугольные импульсы, T -триггер, тактируемый фронтом импульса генератора импульсов G и стробирующий выходной сигнал НО с тем, чтобы момент записи кодов в выходные регистры не попал на переходные процессы в ДЧ, SM1 и SM3.

Сигнал на выходе триггера

$$U_x = \text{sign} \sin(\omega_0 t - \theta), \quad (1)$$

а в RG3 записывается значение линейно нарастающего кода

$$X = f_T t, \quad (2)$$

соответствующее фронту сигнала U_x . В соответствии с (1) и (2) можно записать, что $N_\theta = f_T \theta \omega_0^{-1}$, т. е. выходной код RG3 является цифровым эквивалентом N_θ угла θ .

Особенностью построения (рис. 4) является выполнение каналов преобразования скорости ω и ускорения ϵ , сопряжение которых с угловым производится через формирователь узких импульсов (ФУИ) и двоичный суммирующий счетчик СТ2, имеющий вход установки в нулевое состояние. Цифровой эквивалент скорости N_ω формируют без методической погрешности.

Это достигается тем, что код отклонения периода выходного сигнала ФВ не принимается в качестве эквивалента угловой скорости N_ω , а подвергается преобразованию замкнутой цифровой системой. Она содержит в контуре последовательно соединенные HC1, HC2, блок инверторов и полный сумматор SM3. Накапливающие сумматоры HC1 и HC2, в свою очередь, построены на замкнутых в кольцо полных двоичных сумматорах SM и регистрах RG, запись информации в которые происходит по фронту импульса, поступающего на их тактовые входы C .

Накапливающий сумматор HC1 с числом разрядов m выполняет роль цифрового интегратора, придавая устройству астатизм первого порядка. Его работа описывается разностным уравнением

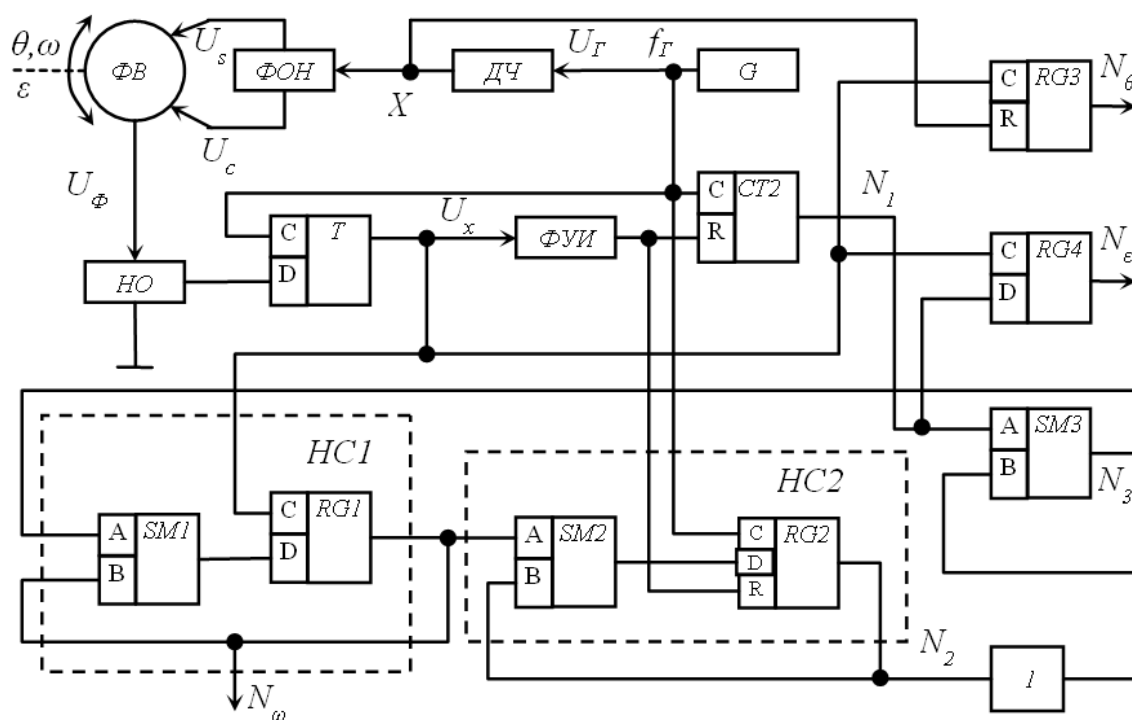


Рис. 4. Схема формирования цифровых составляющих перемещения: угла N_θ , скорости N_ω и ускорения N_ϵ

$$N_{\omega}[n+1] = N_{\omega}[n] + N_3[n], \quad (3)$$

где $N_{\omega}[n]$ – выходной код НС1 перед приходом $(n+1)$ импульса на тактовый вход RG1; $N_{\omega}[n+1]$ – выходной код НС1 после прихода $(n+1)$ -го импульса; $N_3[n]$ – соответственно входной код НС1 после прихода $(n+1)$ -го импульса.

Накапливающий сумматор НС2 аналогично НС1 построен на SM2 и RG2, но отличается от НС1 тем, что регистр RG2 имеет вход R установки его в нулевое состояние выходным импульсом ФУИ. В статике, при неподвижном роторе ФВ, период его выходного сигнала

$$T_x = T_0 = N_0 f^{-1} r = 2\pi\omega_0^{-1}, \quad (4)$$

где N_0 – ёмкость ДЧ и СТ2. При вращении ротора ФВ с частотой ω период

$$T_x = 2\pi(\omega_0 - \omega)^{-1} = 2^r f^{-1} (1 - \bar{\omega}), \quad (5)$$

где $\bar{\omega} = \omega/\omega_0$ – относительная частота вращения. Все дальнейшие положения справедливы для случая, когда $|\omega| \ll \omega_0$.

Счётчик СТ2 фронтом U_x устанавливается в нулевое состояние, и к приходу следующего фронта на выходе СТ2 формируется дополнительный код пропорциональный разности периодов:

$$N_1[n] = f_T (T_x - T_0) = 2\pi\bar{\omega}f_T / (\omega_0 - \omega)^{-1}. \quad (6)$$

Одновременно в НС2 производится суммирование кода N_{ω} на каждый импульс U_T и к этому же моменту

$$N_2[n] = N_{\omega} f_T T_x = 2\pi N_{\omega} f_T / (\omega_0 - \omega)^{-1}. \quad (7)$$

Вычитанием этих кодов образуется N_3 , кото-

рый в момент прихода фронта сигнала U_x корректирует содержание НС1 (код N_{ω}) таким образом, чтобы рассогласование $N_3[n]$ компенсировалось:

$$N_1[n] = N_2[n], \text{ т. е. } N_{\omega} \sim \omega \cdot \omega_0^{-1}.$$

Рассогласование $N_{\epsilon} = N_3[n]$ к моменту прихода фронта сигнала U_x , формируемое на выходе SM3, записывается в RG4. Поскольку N_{ϵ} является входным кодом цифрового интегратора НС1, выходной код N_{ω} которого пропорционален ω , то $N_{\epsilon} \sim \epsilon$. Покажем это для установившегося режима, когда $\epsilon = \text{const}$. Можно записать разностное уравнение

$$\omega[n+1] = \omega[n] + \epsilon T_x[n], \quad (8)$$

где $\omega[n+1]$ и $\omega[n]$ – значение скорости в $(n+1)$ -м и n -м периоде соответственно; $T_x[n]$ – значение периода T_x сигнала U_x в n -м периоде. Из (6) и (7) следует:

$$N_1[n+1] = 2\pi f_T \omega[n+1] / \omega_0 (\omega_0 - \omega)[n+1], \quad (9)$$

$$N_2[n+1] = 2\pi f_T N_{\omega}[n] / \omega_0 - \omega[n+1]. \quad (10)$$

В установившемся режиме, для системы с астатизмом первого порядка рассогласование

$$N_3[n] = N_{\epsilon} = \text{const},$$

$$\text{т. е. } N_{\omega}[n] = \omega[n] \omega_0^{-1} + N_{\epsilon}. \quad (11)$$

Из (8)–(11) находим

$$N_3[n+1] = \left(4\pi^2 f_T \epsilon / \omega_0 (\omega_0 - \omega[n+1]) (\omega_0 - \omega[n]) \right) - \left(2\pi f_T N_{\epsilon} / \omega_0 - \omega[n+1] \right). \quad (12)$$

С учетом (7) и ряда упрощений $N_{\epsilon} \approx \bar{\epsilon}$, где

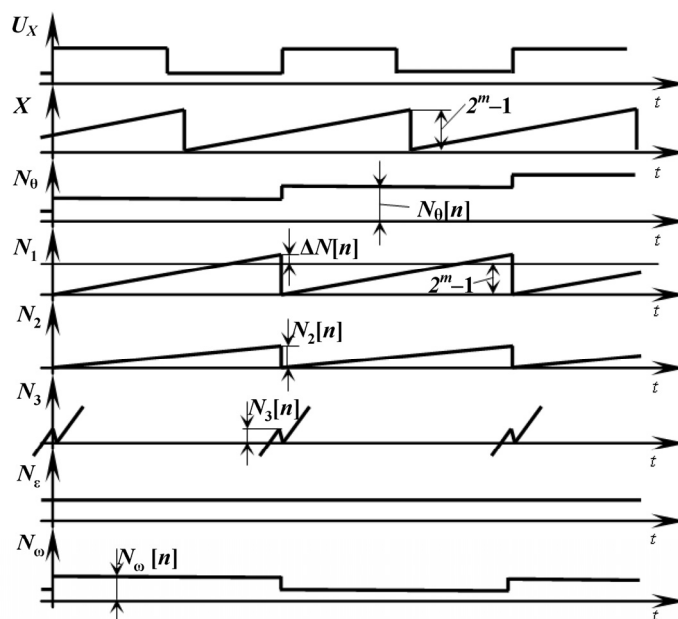


Рис. 5. Временные диаграммы работы схемы

$\bar{\varepsilon} = 2\pi\omega_0^{-2}$, т. е. код N_ε на выходе RG4 в первом приближении пропорционален ускорению ε . Чем выше ω_0 , тем строже это выполняется.

Работа схемы (рис. 4) поясняется временными диаграммами на рис. 5.

Преобразователь позволяет получить цифровые эквиваленты угла, скорости и ускорения из фазы выходного сигнала ФВ чисто цифровым методом и не имеет методической ошибки измерения скорости. Ведутся работы по использованию в МЭП микроконтроллеров типа STM32F217. В качестве первичного датчика рекомендуется использование СКДУ типа СКТД 6465, ДСПУ 128, ВТ-100 и ВТ-70.

Основным недостатком построения МЭП (рис. 4) следует считать ограниченное быстродействие, связанное с использованием фазы в качестве промежуточного параметра при ЕИО.

Литературы

1. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учебное пособие / Ю.С. Усынин. – 2-е изд. испр. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

2. Drury Bill. *The Control Techniques Drives and Controls Handbook EMERSON. JET 2nd Edition 2009*, p. 724.

3. Smirnov, Y.S. *Common Dateware of Robotics Mechatronic Converters / Y.S. Smirnov // Proc. of the Third ISMCR'93. ITALY, Torino, 1993, As 1 – 13...18.*

4. Лысов, А.Н. Динамика малогабаритного датчика угловой скорости, построенного на базе сферического ротора / А.Н. Лысов, В.В. Шувалов // *Навигация и управление движением: материалы докл. IX конференция молодых учёных / под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – С. 194–198.*

5. *Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под общ. ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.*

6. Kenjo Takashi. *Stepping Motors and their Microprocessor Control / Kenjo Takashi. Stepping Motors and their Microprocessor Control. – Clarendon Press. – Oxford, 1984. – p. 200.*

7. Подураев, Ю.С. *Мехатроника: основы, методы, применение: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.*

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 Yury 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, Chelyabinsk. Telephone: 260-68-42.

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, Chelyabinsk. Telephone: 8-(351) 267-90-12, e-mail: anlysov74@yandex.ru

Серебряков Пётр Борисович – аспирант кафедры «Приборостроение», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-(351) 267-90-12, e-mail: Silver87@bk.ru

Petr B. Serebryakov is a postgraduate student of Instrument Engineering Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Telephone: 8-(351) 267-90-12, e-mail: Silver87@bk.ru.