

Аналого-цифровые преобразователи составляющих перемещения на основе электромеханических первичных преобразователей

Ю. С. СМЕРНОВ, Т. А. КОЗИНА, П. Б. СЕРЕБРЯКОВ

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, e-mail: revveka7@mail.ru

Рассмотрены варианты исполнения бесконтактных синусно-косинусных датчиков угла и существующие решения информационного обеспечения позиционирования на основе электромеханических первичных преобразователей. Приведены описание и характеристика циклических и следящих преобразователей перемещения с разомкнутой, замкнутой и переменной структурами. Показаны ограничения, связанные с их применением.

Ключевые слова: электромеханические и электромехатронные преобразователи, синусно-косинусные датчики угла, циклические и следящие преобразователи перемещения.

The design versions of contactless sine-cosine angle sensors and the existing data ware solutions of positioning based on electromechanical transducers are considered. The description and characteristic of cyclic and tracking displacement transducers with open, closed and variable structures are presented. The application limitations are demonstrated.

Key words: electromechanical and electromechatronic converters, sine-cosine angle-data transmitters, cyclic and tracking displacement converters.

На основе анализа [1] типовых временных диаграмм составляющих перемещения [2] показано, что оптимизация системных показателей электромехатронных преобразователей (ЭМТП) на основе бесконтактных электродвигателей с постоянными магнитами (БЭПМ) [3, 4] достигается в безредукторном варианте при едином информационном обеспечении (ЕИО) с первичным преобразователем на основе синусно-косинусного датчика угла (СКДУ) [5]. Предельной структурой информационного обеспечения является вариант бессенсорного формирования сигналов о перемещении и его составляющих [6, 7]. Широко используются инкрементальные и абсолютные оптико-электронные энкодеры, конструктивно совместимые со встраиваемыми БЭПМ [8], но не обеспечивающие в информационно-силовом модуле работу при температурах до 150 °С. Существенным недостатком таких энкодеров является сложность интерфейса, предусматривающего передачу цифрового эквивалента перемещения микроконтроллеру, формирующему путем последовательного дифференцирования цифровые эквиваленты скорости и ускорения. Выполнение последних операций связано с существенным снижением достоверности информации о составляющих перемещения.

В [5, 9] приведены варианты исполнения бесконтактных СКДУ: редуктосина, синус-косинусного вращающегося трансформатора и индукционного фазовращателя. При применении СКДУ в случае одноотсчетного варианта интерфейс связан со схемой трехпроводной линией, а при двухотсчетном — пятипроводной. Важное преимущество СКДУ в качестве первичного преобразователя состоит в том, что эквиваленты

составляющих перемещения формируются в результате интегрирования сигналов рассогласования в замкнутых электронных следящих системах, обеспечивающих более высокую помехозащищенность, чем дифференцирование кодовых эквивалентов в условиях помех.

Информация о составляющих перемещения: величине, скорости и ускорении — содержится в выходных сигналах первичного преобразователя, они способны непосредственно в векторном режиме управлять усилителями мощности при аналоговом (гармоническом) управлении БЭПМ [5]. Формирование ЕИО позволяет реализовать не только оптимальное управление движением, но и обеспечить структурные изменения в самоорганизующихся ЭМТП в зависимости от угла поворота вала θ , скорости ω и ускорения ε .

Наибольшими функциональными возможностями и отсутствием методической погрешности формирования эквивалента скорости обладает полифункциональный фазовый преобразователь, формирующий составляющие перемещения и его ортогональные проекции в цифровой форме [10]. Это позволяет обеспечить управление БЭПМ при дискретной коммутации.

К недостаткам фазового преобразователя следует отнести ограничение максимальной скорости до 90° в секунду, что обусловлено конечным быстродействием структур угол—фаза—код; отсутствие у ряда синусно-косинусных вращающихся трансформаторов квадратурной обмотки, что исключает их применение в режиме индукционного фазовращателя. Эти недостатки устраняются в амплитудных вариантах преобразования сигналов хронотопа [5], разделяемых

по алгоритму получения цифровых эквивалентов составляющих перемещения на циклические и следящие. В первых происходит стробирование входных аналоговых сигналов и их циклическое преобразование в цифровой эквивалент, а во вторых благодаря непрерывному слежению за входными сигналами обеспечивается изменение аналоговой формы информации на цифровую. Циклические преобразователи могут быть разомкнутыми и замкнутыми.

Функциональная схема разомкнутого циклического преобразователя перемещения с арктангенсным постоянным запоминающим устройством (ПЗУ) представлена на рис. 1. Такой преобразователь характеризуется повышенным быстродействием. На первом этапе посредством функционального тригонометрического преобразователя ФТП выходные сигналы СКДУ преобразуются в код $\arctg\beta$, где β — угол θ , приведенный к первому октанту, по выражениям

$$\sin\beta = |\sin\theta|, \cos\beta = |\cos\theta| \text{ — в 1, 4, 5 и 8-м октантах;}$$

$$\sin\beta = |\cos\theta|, \cos\beta = |\sin\theta| \text{ — в 2, 3, 6 и 7-м октантах.}$$

При этом выявитель октанта ВО формирует три старших по весу разряда СВР цифрового эквивалента Φ кода угла. На входы аналогового коммутатора АК и ВО поступают сигналы $U\sin\theta$ и $U\cos\theta$, сформированные демодулятором ДМ. На выходе АК получаются сигналы $U\sin\beta$ и $U\cos\beta$.

Для первого октанта $\sin\theta > 0$, $\cos\theta > 0$, а $\sin\theta < \cos\theta$. Номера октантов возрастают против часовой стрелки. Код $\arctg\beta$ формируется в АЦП, где в качестве опорного сигнала используется $\cos\beta$, а в качестве измеряемого $\sin\beta$.

В отличие от циклического преобразователя перемещения, реализующего приближение $\sin\beta \approx \theta[k\cos\beta + (1 - k)\theta\sin\beta]$, вариант циклического преобразователя, приведенный на рис. 1, не имеет методической погрешности. Повышение точности достигается за счет упрощения схемы. К недостаткам построения преобразователя относятся сложность реализации многокомпонентного варианта и низкая структурная помехозащищенность разомкнутого. Эти ограничения приводят к необходимости поиска иных структур ЕИО, использующих замкнутые варианты преобразователей сигналов хронопа.

Замкнутые преобразователи представляют аналого-цифровые системы автоматического регулирования, отличающиеся типом функционального тригонометрического преобразователя, способами формирования сигнала рассогласования и выходного кода. Структурно такие системы реализуют метод обратной связи, при котором сигнал с цифрового выхода поступает на два функциональных тригонометрических преобразователя. Их выходные сигналы изменяют цифровой выход системы таким образом, чтобы его значение стало соответствовать положению вала СКДУ. К преимуществам замкнутого преобразователя относится малая чувствительность к частоте опорных сигналов; устойчивость к значительным возмущениям; непрерывное изменение кода Φ в реальном времени; построение принципа измерения на соотноше-

нии двух ортогональных выходных сигналов СКДУ; пониженная чувствительность к гармоникам [5].

Недостатки рассмотренных выше вариантов информационного обеспечения в определенной степени устраняются в амплитудных следящих преобразователях перемещения, которые в отличие от циклических имеют переменную по времени частоту квантования сигнала рассогласования, т. е. выполняют не релейное, а пропорциональное управление. Это достигается введением в их состав преобразователя напряжение—частота, осуществляющего преобразование напряжения рассогласования в унитарный код [3]. Наибольший интерес с точки зрения формирования ЕИО представляют варианты амплитудных следящих преобразователей перемещения [5], эквивалентные структурные схемы которых приведены на рис. 2.

Сигнал U_ϵ на выходе демодулятора ДМ имеет положительную полярность, если $\theta > \Phi$, и отрицательную, если $\theta < \Phi$. Сигнал U_ϵ подается на аналоговый интегратор АИ (см. рис. 2, а), формирующий напряжение U_ω , пропорциональное интегралу по времени от напряжения рассогласования U_ϵ . Напряжение U_ω поступает на вход преобразователя напряжение—частота ПНЧ, причем частота импульсов на его выходе прямо пропорциональна напряжению U_ω . В двоичном счетчике СТ2 эти импульсы суммируются или вычитаются до тех пор, пока сигнал рассогласования не снизится до нуля. При постоянном рассогласовании частота импульсов увеличивается, поскольку интеграл от сигнала рассогласования по времени возрастает до момента, когда частота импульсов не станет достаточной для поддержания изменений Φ практически равным изменениям θ . Однако частота следования импульсов не должна превышать максимальной возможной для ПНЧ.

В установленном режиме погрешность определения скорости равна нулю; она возрастает в периоды изменения скорости. За исключением отставаний или опережений в интервалы времени с ускорением или замедлением выходная реакция системы близка к входному воздействию. Электронная система автоматического управления должна быть устойчивой и обеспечивать оптимальный переходный процесс на выходе при заданных входных воздействиях. В функциональной схеме следящего преобразователя перемещения (см. рис. 2, б), содержащей блоки ВО, УЦАП, ДУ, СТ2, логический элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и ПЗУ образуют электронный аналог СКДУ.

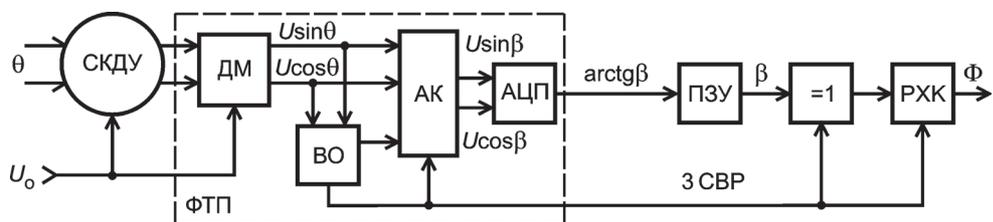


Рис. 1. Функциональная схема разомкнутого циклического преобразователя перемещения с арктангенсным ПЗУ:

θ — угол поворота вала; β — тот же угол θ , приведенный к первому октанту; U_0 — опорное напряжение; СКДУ — синусно-косинусный датчик угла; ФТП — функциональный тригонометрический преобразователь; ДМ — демодулятор; ВО — выявитель октанта; АК — аналоговый коммутатор; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; 3 СВР — три старших по весу разряда; ПЗУ — постоянное запоминающее устройство; =1 — логический элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ; РХК — регистр хранения кода

Напряжение рассогласования формируется на выходе ДУ путем вычитания выходного напряжения УЦАП из приведенного к первому октанту выходного напряжения СКДУ. В ПЗУ хранятся значения $\text{tg}\beta$ от 0 до 45° ; выборка происходит по адресным входам ПЗУ выходным кодом СТ2 через логический элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, управляемый третьим разрядом кода октанта.

Далее сигнал рассогласования преобразуется демодулятором ДМ, который осуществляет его фазочувствительное выпрямление, обеспечивает подавление гармоник и квадратурных составляющих. Последние возрастают при вращении ротора СКДУ, который функционирует как генератор. Фильтр низких частот ФНЧ подавляет низкочастотные помехи в сигнале рассогласования системы автоматического управления с астатизмом второго порядка и ограниченной полосой пропускания. Время установления такой электронной следящей системы определяется частотой среза ее логарифмической амплитудной характеристики, которая зависит от параметров ФНЧ, т. е. от степени подавления гармоник напряжения несущей частоты в выходном сигнале ДМ [5].

Из анализа схемы на рис. 2, а следует возможность формирования цифровых эквивалентов скорости и ускорения изменения входного угла, т. е. использования следящего

преобразователя перемещения (см. рис. 2, б) в качестве многокомпонентного преобразователя. Поскольку на выходе цифрового интегратора в установившемся режиме формируется цифровое значение угла, напряжение на его входе пропорционально скорости ω изменения угла, а напряжение на входе аналогового интегратора пропорционально ускорению ε . Данные свойства используются для получения при помощи АЦП1 и АЦП2 цифровых эквивалентов скорости $\dot{\Phi}$ и ускорения $\ddot{\Phi}$. Для устранения влияния нестабильности опорного напряжения U_0 коды скорости и ускорения вычисляются как отношения соответствующих напряжений на входах интеграторов к выпрямленному и отфильтрованному опорному напряжению.

Изложенные выше структурные методы инженерного синтеза позволяют существенно повысить эффективность электромеханических первичных преобразователей за счет определенного усложнения отсчетной части. В настоящее время целесообразность такого подхода оправдана в случае реализации функций отсчетной части в микроконтроллере. Стоимость электромеханического первичного преобразователя на три порядка выше стоимости микроэлектроники, которой экономически эффективно передать его функции.

Прецизионный бесконтактный вариант СКДУ конструктивно сложен и сопряжен при изготовлении не только с трудоемкими технологиями, но и со значительным расходом медного обмоточного провода и необходимостью применения прецизионных подшипников, имеющих ограниченный ресурс при высоких скоростях вращения. Встраиваемая конструкция СКДУ упрощает интегрирование первичного преобразователя в информационно-силовой модуль, содержащий БЭПМ с полым ротором [1].

Область применения ЕИО на основе СКДУ ограничена низкими частотами вращения, характерными для безредукторных ЭМТП на основе БЭПМ. Они большую часть времени работают в режиме самокоммутации на ползучих скоростях, где затруднительно сформировать достоверную информацию о составляющих перемещения традиционными методами тахометрирования [11].

Высокая стоимость двухотсчетных прецизионных электромеханических первичных преобразователей, обеспечивающих преобразование перемещения на уровне 14—16 бит, не способствует их широкому применению. Двухотсчетные прецизионные электромеханические первичные преобразователи целесообразно использовать в безредукторных ЭМТП, от которых кроме точности требуется высокий нерегулируемый ресурс.

Другой недостаток, ограничивающий применение электромеханических первичных преобразователей, — относительно низкий уровень предель-

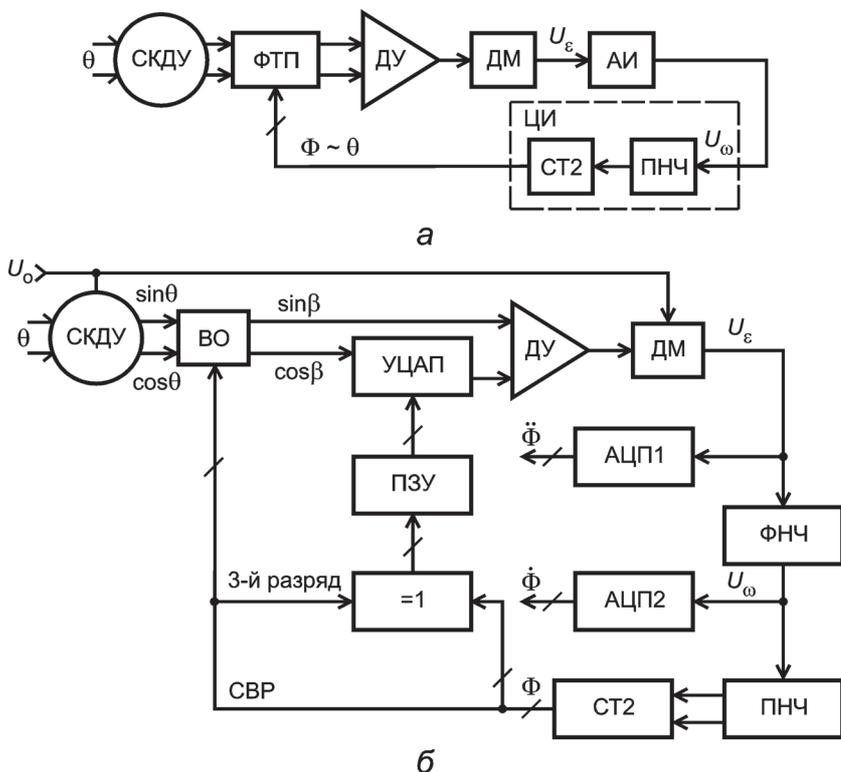


Рис. 2. Структурные схемы следящего (а) и многокомпонентного (б) следящих преобразователей перемещения:

ДУ — дифференциальный усилитель; АИ, ЦИ — аналоговый и цифровой интеграторы; СТ2 — двоичный реверсивный счетчик; ПНЧ — преобразователь напряжение—частота; ФНЧ — фильтр низких частот; УЦАП — умножающий цифроаналоговый преобразователь. Остальные обозначения как на рис. 1

ных скоростей вращения, которые для современных ЭМТП с вентильным электродвигателем достигают десятков тысяч оборотов в минуту. Достаточно простым и недорогим вариантом информационного обеспечения является использование редуктосина, формирующего квадратурные сигналы многополюсного первичного преобразователя. Такой его вариант конструктивно удобен в малоредукторных ЭМТП при скоростях до 1000 об/мин [12].

Выбор оптимального типа преобразователя для конкретного применения усложняется рядом противоречивых ограничений. Последние определяются возможностями, достоинствами и недостатками циклических и следящих преобразователей перемещения. Мехатронный подход позволяет предложить компромиссный вариант с переменной структурой, обладающий расширенными возможностями и преимуществами исходных типов. Алгоритм преобразования меняется в результате перестройки структуры в зависимости от погрешности преобразования. С этой целью в состав преобразователя введен формирователь алгоритмов, осуществляющий перевод отсчетной части следящего преобразователя перемещения в режим циклического преобразователя, т. е. из режима слежения в режим поразрядного уравновешивания.

Схемное построение преобразователя с переменной структурой предусматривает значительное уменьшение времени установления отсчетной части благодаря автоматическому изменению структуры системы автоматического управления в переходных режимах. Меняется ее алгоритм функционирования: из режима пропорционального управления она при больших рассогласованиях переводится в релейный режим. С точки зрения теории автоматического управления, применение формирователя алгоритмов преобразования адекватно введению логического нелинейного корректирующего устройства. В этом случае преобразователь с переменной структурой становится интеллектуальным [12]. Описание работы самоорганизующегося преобразователей с переменной структурой представлено в [10].

При ограничениях, связанных с применением электро-механических первичных преобразователей, по-видимому, целесообразно применять бесконтактные датчики, что возможно при выполнении циклических и следящих преобразователей перемещения на основе однокристалльной интегральной микросхемы синусно-косинусного магнитного энкодера. Интерес представляет построение на его основе самоорганизующегося преобразователя с переменной структурой и многокомпонентной структуры преобразования, обес-

печивающей получение цифровых эквивалентов ускорения $\ddot{\varphi}$ и скорости $\dot{\varphi}$ перемещения в результате аналого-цифрового интегрирования.

Л и т е р а т у р а

1. **Смирнов Ю. С., Серебряков П. Б., Соколов А. В.** Структурное и алгоритмическое обеспечение электромехатронных преобразователей // Вестник ЮУрГУ. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. Вып. 17. № 35 (294). С. 119—126.
2. **Drury B.** The Control Techniques Drives and Controls Handbook EMERSON. Instit. Eng. Technol. (UK), 2009.
3. **Hendershott J. R., Miller T. J. E.** Design of Brushless Permanent Magnet Motors: Monograph EEEE. Oxford: Magna Phys. Publ. and Clarendon Press, 1995.
4. **Kenio T., Sugawara A.** Stepping motors and microprocessor controls. Oxford: Univ. Press, 1994.
5. **Домрачев В. Г., Матвеевский В. Р., Смирнов Ю. С.** Схемотехника цифровых преобразователей перемещений. М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. **Vas P.** Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford: Univ. Press. 1998.
7. **Козина Т. А.** Бездатчиковые системы определения скорости и положения ротора в асинхронном электроприводе // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. трудов. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г. И. Носова, 2011. Вып. 19. С. 43—55.
8. **Балковой А. П., Цаценкин В. К.** Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издат. дом МЭИ, 2010.
9. **Воротников С. А.** Информационные устройства робототехнических систем: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.
10. **Smirnov Yu. S.** Common Dateware of Robotics Mechatronic Converters // Proc. Third ISMCR'93. Torino (Italy), 1993. Pt. 1. P. 13—18.
11. **Смирнов Ю. С., Лысов А. Н., Серебряков П. Б.** Информационное обеспечение электромехатронных преобразователей // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. 2012. Вып. 17. С. 31—36.
12. **Смирнов Ю. С., Соколов А. В., Лысов А. Н.** Дискретные преобразователи перемещения с кинестетическими датчиками положения // Там же. С. 37—41.

Дата принятия 15.04.2013 г.