

ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

ФАЛЕЕВ М.В., д-р техн. наук, КИСЕЛЕВ А.А., канд. техн. наук, САМОК С.Г., асп.

Предлагаются новые принципы построения прецизионных электроприводов, предназначенных для использования в локальных системах управления мехатронных устройств.

Ключевые слова: импульсно-фазовые электроприводы, фотоимпульсные измерительные преобразовательные перемещения, фазовая ошибка.

PULSE-PHASE ELECTRIC DRIVES OF MECHANOTRONIC APPLIANCES

FALEEV M.V., Ph.D., KISELYOV A.A., Ph.D., SAMOK S.G., postgraduate

The article contains the new principles of precision electric drive intended for use in local systems of mechanotronic appliance management.

Key words: pulse-phase electric drives, photoimpact measuring transforming displacements, phase mistake.

Развитие гибких автоматизированных производств и создание многофункционального технологического оборудования неразрывно связано с широким применением IT-технологий как основного средства повышения эффективности производства. При этом связующим звеном между информационными и материальными потоками в таких системах являются исполнительные механизмы и средства управления ими, к которым предъявляются достаточно специфические требования относительно выполняемых функций и технических возможностей по адаптации к изменяющимся условиям работы. К таким техническим средствам относятся разнообразное обрабатывающее оборудование с числовым программным управлением, промышленные роботы, средства испытательной техники, системы оптико-механической развертки, различные системы слежения и наведения и ряд других устройств. Большинство из вышеперечисленных механизмов требуют высокой точности и стабильности воспроизведения заданной траектории движения рабочих элементов в нескольких координатных осях при широкой вариации скоростей перемещения, обеспечиваемого с помощью автоматизированных электроприводов.

Традиционным направлением, реализующим эти тенденции, является применение специализированных DSP-микроконтроллеров (МК) типа Motor Control. Эти МК, изначально ориентированные на использование в автоматизированном электроприводе, обладают широким набором периферийных устройств сопряжения с объектами и могут полностью решать задачи управления параметрами движения исполнительного механизма. Выпускаемые фирмами TEXAS, ANALOG DEVICES, INFINEON, FREESCALE SEMICONDUCTOR и MICROCHIP контроллеры позволяют для многих областей использования электропривода создавать эффективные однокристалльные устройства с алгоритмами работы, отвечающими требованиям автоматизированных про-

изводств. Однако такой подход не обеспечивает максимальную адаптацию системы управления к требованиям потребителя из-за фиксированного набора встроенной периферии. Вместе с тем широко используемые принципы построения цифровых систем создают ряд проблем, связанных как с измерением, так и управлением регулируемые координатами, наличие которых обусловлено дискретизацией переменных и конечностью времени их обработки. С расширением диапазона регулирования скорости исполнительного механизма влияние этих факторов на точностные характеристики электропривода возрастает. Попытки решить эту проблему путем увеличения мощности используемых МК приводят к усложнению систем управления и повышению требований к технологии их производства. В то же время обеспечение заданных требований к траектории движения механизма может быть достигнуто при использовании технических решений и алгоритмов, в максимальной степени адаптированных к специфике объектов управления [3]. При рациональном разделении функций между программными и аппаратными средствами возможно создание электроприводов, которые обладают высокой конкурентоспособностью в сфере применения, где совокупность достоинств цифровых систем избыточна, а широко понимаемая экономичность привода является основным фактором, определяющим эффективность его применения.

Широкие возможности выполнения специфических требований технологических агрегатов могут быть обеспечены посредством конфигурируемых систем на кристалле KCHK или FPSLIC, выпускаемых фирмами TRISCEND и ATMEL. Размещение на одном кристалле жесткого ядра микроконтроллера с базовым набором периферийных устройств и программируемой логической матрицы (CSL) позволяет реализовать необходимый для связи с объектом управления набор средств со-

пряжения, что устраняет необходимость применения дополнительных элементов. Возможность внутрисхемного программирования конфигурации CSL в значительной степени расширяет сферу применения электроприводов, отвечающих всему многообразию требований технологического оборудования автоматизированных производств.

Широкие возможности в этом направлении открывает использование систем с контуром фазовой синхронизации, применение которого позволяет реализовать концепцию "точного" электропривода [2]. Однако большинство технических решений для такого электропривода не отвечает современным требованиям к приводным устройствам. Расширение функциональных возможностей таких электроприводов достигается при включении МК непосредственно в контур регулирования при сохранении принципа управления по интегралу управляемой координаты в режиме непрерывной развертки сигнала задания. Такое построение системы не снижает точностные показатели электропривода, так как погрешности квантования возникают внутри замкнутого контура. Поэтому требования к точностным показателям достигаются при использовании относительно простых МК.

С другой стороны, предлагаемая концепция построения электропривода освобождает МК от решения простых, но ресурсоемких задач по формированию и обработке импульсных сигналов, что снижает требования к его производительности. Это позволяет, с одной стороны, использовать относительно недорогие восьмиразрядные однокристалльные микроконтроллеры, а с другой стороны, дает возможность усложнить законы управления и адаптировать электроприводы к особенностям технологии выполнения приводным механизмом требуемых операций, что расширяет функциональные возможности проектируемых систем. Такие устройства можно назвать импульсно-фазовыми электроприводами с управлением от микроконтроллера (ИФЭП).

Основу такого электропривода (см. рисунок), который может быть определен как информационно-механический преобразователь, составляет контур фазовой синхронизации, базовыми элементами которого являются измеритель управляемой координаты ВР и блок сопряжения БС, регистрирующий положение механизма или его отклонение от заданного значения. Для широкого класса механизмов защита от опрокидывания регулирования реализуется без частотно-фазовых дискриминаторов чисто программными средствами. Это позволяет упростить структуру блока БС и повысить информативность снимаемых с ВР данных. Для управления асинхронным двигателем М через инвертор И используется блок центрированной векторной широтно-импульсной модуляции И2. Необходимые для узлов БС и И2 линейки импульсных сигналов создаются блоком задания БЗ. Управление электроприводом выполняется цифровым ядром МК и многофункциональной периферией, обеспечивающей сопряжение процессорного ядра МК с элементами электропривода и локальной информационной сетью (ЛИС) технологического агрегата.

В качестве ВР используются фотоимпульсные (ФПП) или электромашинные измерительные преобразователи перемещения, а также совокупность технических и программных средств определения цифрового эквивалента положения вала. Порог различимости этой величины ε_φ не зависит от частоты вращения вала [1] и однозначно определяется как

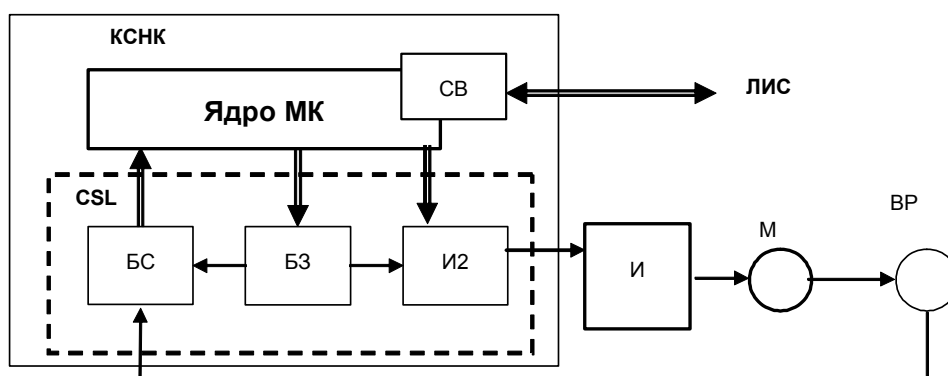
$$\varepsilon_\varphi = \frac{2\pi}{Z},$$

где Z – число меток датчика.

При этом добротность D регулятора системы определяется как

$$D = \frac{Z}{2\pi f_z} = \frac{1}{\varepsilon_\varphi f_z},$$

где f_z – частота задающего сигнала.



Функциональная схема импульсно-фазового электропривода с цифровым управлением

Непосредственное включение ФПП с малым порогом различимости в контур фазовой синхронизации значительно снижает устойчивость системы, что особенно ярко проявляется в нижней части диапазона регулирования скорости [3]. Для устранения этого эффекта используется блок транспонирования спектра выходного сигнала ФПП, алгоритм которого определяется как

$$f_{NZ} = \frac{Z \Omega + f_{01}}{2\pi N_{01}}, \quad (1)$$

где N_{01} – емкость буферного делителя; f_{01} – опорная частота схемы транспонирования; f_{NZ} – частота квантования системы.

Добротность такой системы определяется как

$$D = \frac{Z}{2\pi(f_{01} + f)} = \frac{Z}{2\pi(N_{01}f_0 + f)},$$

где f_0 – эквивалентная опорная частота.

В любом из рассмотренных случаев необходимо использование частотно-фазового дискриминатора.

Ошибка $\Delta\varphi$ контура фазовой синхронизации в режиме непрерывной развертки определяется как

$$\Delta\varphi = \varphi_Z - \varphi_B, \quad (2)$$

где φ_Z – непрерывная развертка сигнала задания, соответствующая необходимому углу поворота вала; φ_B – угол поворота вала.

Выражение (2) можно представить в виде разностной схемы

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\varphi_Z}{Z} + \Delta\varphi_Z \right) - \left(\frac{\varphi_B}{Z} + \Delta\varphi_B \right) = \dots$$

$$\dots = \left(\frac{\varphi_Z}{Z} - \frac{\varphi_B}{Z} \right) + (\Delta\varphi_Z - \Delta\varphi_B),$$

или

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi}{Z} + (\Delta\varphi_Z - \Delta\varphi_B),$$

что позволяет оперировать с данными относительно небольшой размерности при отсутствии систематической погрешности обработки входных сигналов.

Для обеспечения работоспособности ИФЭП достаточно применения простого ПД-регулятора с алгоритмом вида

$$N_U = N_P + k_P T \left(N_P - \frac{N_P}{Z} \right), \quad (3)$$

где N_P – сигнал ошибки; N_U – выходной сигнал регулятора; k_P – коэффициент передачи корректирующего канала.

Для снижения погрешности стабилизации скорости при изменении нагрузки механизма применяется алгоритм ПИД-регулирования, вычисляющего сигнал управления N_U по разностной схеме:

$$N_d = T_{KP} \left(N_P - \frac{N_P}{Z} \right);$$

$$N_i = k_i N_P / T + \frac{N_i}{Z};$$

$$N_U = N_P + N_d + N_i,$$

где N_i – интеграл сигнала фазовой ошибки; k_i – добротность по фазовой ошибке.

Интегрирование входного сигнала осуществляется методом прямоугольников, что ускоряет выполнение этой операции при сохранении точности вычислений. Так как

$$N_U = k_i \int \Delta\varphi dt, \quad (5)$$

то при интегрировании сигнала фазовой ошибки получаем, что выходной сигнал регулятора определяется как

$$N_U = \frac{Zk_i}{2\pi} \iint (\Omega_Z - \Omega) dt.$$

Следовательно, при использовании алгоритма регулятора вида (3) электропривод можно отнести к классу синхронно-синфазных электроприводов, которые в наибольшей степени отвечают требованиям к приводным устройствам рассматриваемого класса механизмов.

Использование частотного эталона для задания уровня угловой скорости приводного двигателя определяет принципы построения выполняющих эти функции узлов. Они строятся на базе импульсных устройств, изменяющих масштаб частотного эталона с помощью делителей и синтезаторов частоты. Использование алгоритма (2) для обработки сигнала ФПП делает необходимым обеспечение высокой плавности изменения частотного эталона. Для управления двигателями используется широтно-импульсный сигнал (ШИП), частота переключений которого составляет (1÷20) кГц. Такой способ реализуется путем формирования широтно-импульсного сигнала, длительность которого определяется вычисленным МК сигналом управления. Применение цифрового блока позволяет достаточно просто реализовать как симметричный, так и несимметричный режимы формирования широтно-импульсного сигнала с постоянным или зависящим от частоты задания периодом коммутации. В последнем случае устраняется погрешность измерения среднего значения скорости в течение импульса частоты задания. Однако это приводит к некоторому усложнению аппаратной части, обеспечивающей формирование широтно-импульсного сигнала особенно при необходимости получения высоких частот переключения силовых элементов. Несимметричный закон управления импульсным силовым преобразователем значительно снижает потери в приводном двигателе и коммутационных элементах, однако регулировочная характеристика такого преобразователя имеет разрыв при изменении знака управляющего работой устройства цифрового кода.

Представленные алгоритмы управления ИФЭП не требуют большого числа расчетных операций, проводимых при жестких временных ограничениях. При этом основная доля необходимых для управления работой механизма действий заключается в преобразовании логической информации. Большинство же относительно сложных математических операций могут быть реализованы с использованием табличных преобразований, возможность применения которых определяется достаточным объемом памяти программ существующих МК. Использование цифрового интегрирования величины фазового рассогласования придает системе возможность слежения за текущим положением управляемого объекта.

Для мехатронных систем с асинхронными двигателями (АД) характерно применение векторного управления, использующего информацию о токах и напряжениях статорных обмоток АД. Электромагнитный момент двигателя определяется косвенным путем, реализация которого связана с выполнением ресурсоемких преобразований. Такой подход эффективен в бессенсорных системах, в которых не используются измерители скорости или положения. Наличие информации о скорости механизма, частоте и амплитуде сигнала управления АД дает возможность вычисления электромагнитного момента без измерения токов статорных обмоток и выполнения сложных координатных преобразований. Вычисленный момент используется для компенсации внутренних перекрестных связей АД.

В большинстве работ система управления АД рассматривается как непрерывная. При этом пренебрегается импульсным характером

обработки информации в микропроцессорной системе управления. Предположение, что высокая частота квантования обеспечивает идеальное приближение свойств реальной системы управления к непрерывной, в большинстве случаев не является строго обоснованным.

Принятые при разработке импульсно-фазовых электроприводов технические решения, программные и аппаратные средства позволяют создавать многофункциональные контроллеры, отвечающие всему комплексу требований, предъявляемых к приводным устройствам металлообрабатывающих станков, промышленных роботов и секций агрегатов по непрерывной обработке различных материалов.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, предложенная концепция построения ИФЭП обеспечивает диапазон регулирования скорости свыше 16000:1, плавность задания угловой скорости 0,5%, минимальную угловую скорость 0,01 рад/сек, допуски на точностные показатели, лежащие в пределах требований, предъявляемых к электроприводам подачи металлорежущих станков.

Список литературы

1. **Андрущук В.В.** Цифровые системы измерения параметров движения механизмов в машиностроении. – СПб.: Машиностроение, 1992.
2. **Трахтенберг Р.М.** Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. **Фалеев М.В.** Микропроцессорные импульсно-фазовые электроприводы информационно-измерительных систем: Автореф... д-ра техн. наук. – Иваново: ИГЭУ, 1998.

Фалеев Михаил Владимирович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-73,
e-mail: admin@tam.ispu.ru

Киселев Александр Анатольевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-73,
e-mail: admin@tam.ispu.ru

Самок Сергей Георгиевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-73,
e-mail: admin@tam.ispu.ru