

Особенности построения электроприводов с импульсной и цифровой фазовой синхронизацией

Фалеев М.В., д-р техн. наук

Проведен анализ особенностей прецизионных электроприводов с импульсно-фазовой и цифровой синхронизацией для определения влияния способа выявления фазовой ошибки на точностные характеристики мехатронных систем управления параметрами движения механизмов технологических агрегатов.

Ключевые слова: прецизионный электропривод, импульсы, цифровая синхронизация, мехатронная система, устойчивая работа.

Features of designing of electric drives with pulse and digital phase locking

FALEEV M.V., Doctor of engineering science

Analysis of features of precision electric drives with impulse-phase and digital synchronization is made for detection of phase error on precise characteristic of mehatronnih management systems on parameters of motion of gears of technological aggregates.

Keywords: precision electric drives, pulses, digital synchronization, mehatronnih system, firm work.

Реализация высоких технологий во многих отраслях промышленности связана с прецизионным перемещением исполнительных механизмов, выполняемым электроприводами, построенными на базе контура фазовой синхронизации скорости [1]. Ориентация таких приводов на воспроизведение заданных траекторий движения с малыми погрешностями, стабильность характеристик и широкие их возможности по адаптации к конкретным условиям работы являются залогом успеха реализации всех возможностей современного технологического оборудования. Многообразие условий эксплуатации систем с контуром фазовой синхронизации и возможностей их технической реализации ведёт к широкому разнообразию технической реализации таких систем. Наиболее распространённые функциональные схемы таких систем представлены на рис. 1.

На рис. 1,а показана ставшая классической система с контуром фазовой синхронизации, положенная в основу астатических дискретных электроприводов (АДЭ) с импульсным управлением [1]. Управление скоростью ω двигателя М осуществляется посредством широтно-импульсного преобразователя (ШИП) в функции фазового рассогласования $\Delta\varphi$ частотных сигналов задания f_z блока частотного задания (БЧЗ) и обратной связи f_F , снимаемой с импульсного датчика положения ВР. В приводах с импульсной синхронизацией величина фазового рассогласования $\Delta\varphi$, фиксируемая частотно-фазовым дискриминатором (ЧФД), определяется как

$$\Delta\varphi = \int (f_z - f_F) dt,$$

а частота датчика связана со скоростью ω соотношением вида

$$f_F = \frac{Z}{2\pi} \omega,$$

где Z – число меток импульсного датчика положения ВР.

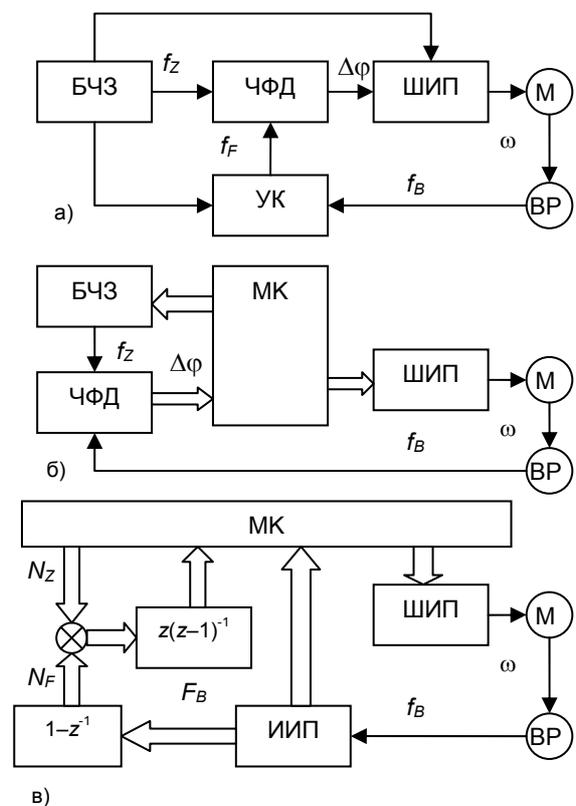


Рис. 1. Функциональные схемы электроприводов с фазовой синхронизацией: а – с импульсной синхронизацией; б – с импульсно-цифровой синхронизацией; в – с цифровой синхронизацией

В электроприводах с импульсной синхронизацией реализована широтно-импульсная модуляция II рода, которая может рассматриваться как импульсная система с мгновенными импульсами, передаточная функция которой $W(z)$ определяется как

$$W(z) = Z\{W_0(s)\}, \quad (1)$$

где $W_0(s)$ – передаточная функция непрерывной части системы, включающей двигатель и исполнительный механизм.

Добротность D_I систем с импульсной синхронизацией однозначно связана со скоростью ω и параметрами объекта соотношением вида

$$D_I = \frac{Z\omega_M}{2\pi f_Z} = \frac{1}{\Omega_{\min}}, \quad (2)$$

где ω_m – скорость идеального холостого хода двигателя; Ω_{\min} – минимально-возможная по условиям устойчивости скорость вала двигателя, определенная относительно ω_m .

Анализ областей устойчивой работы электропривода, определенных в функции коэффициента расширения K_P устройства дискретной коррекции УК (рис. 2), позволяет сделать два вывода: во-первых, существует область оптимальной настройки регулятора, а во-вторых, пренебрежение импульсными свойствами системы неизбежно приведет к результатам, неадекватно отражающим происходящие в АДЭ процессы.

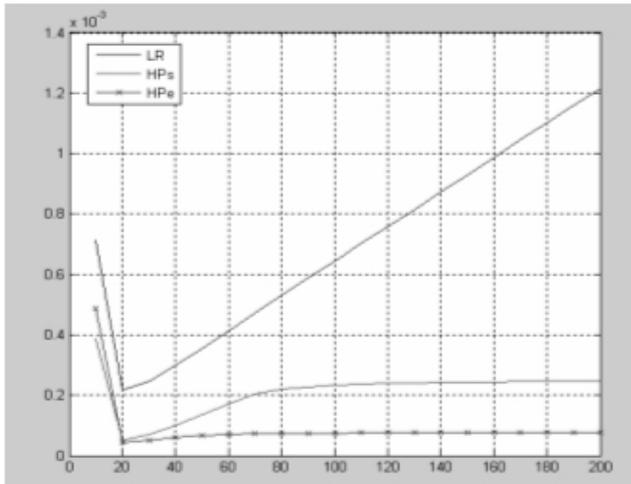


Рис. 2. Области устойчивости электропривода с детерминированным (LR) и нечеткими (HP) регуляторами

С другой стороны, такие особенности АДЭ существенно ограничивают возможности расширения диапазона регулирования скорости, предельная величина которого ограничивается параметрами двигателя и управляемого объекта. Увеличение диапазона регулирования достигается при использовании резольверов, частота выходного сигнала которых определяется как

$$f_B = \omega \frac{p}{2\pi} + f_0, \quad (3)$$

где p – число пар полюсов резольвера; f_0 – частота возбуждения резольвера ВР.

С учетом (2) и (3) минимально-возможная скорость вала ω_{\min} находится из следующего выражения:

$$\omega_{\min} \geq \omega_M \Omega_{\min} - f_0 \frac{p}{2\pi}.$$

Такая особенность АДЭ, а именно, прямая зависимость добротности от разрешающей способности датчика, делает практически невозможным использование оптических энкодеров. Решение этой проблемы достигается при использовании преобразователей частотного спектра сигнала датчика положения [2], как это показано на рис. 3.

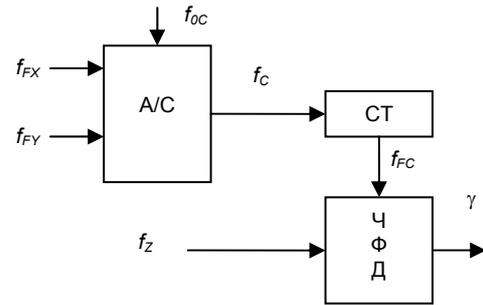


Рис. 3. Схема частотного преобразования сигналов энкодера

Основой такого преобразователя является блок суммирования/сложения (A/C) частот, управляемый посредством парафазных импульсных сигналов f_{FX} и f_{FY} , поступающих с энкодера, установленного непосредственно на валу двигателя. Частота преобразованного сигнала f_{FC} определяется как

$$f_{FC} = \frac{f_{OC} / 2 \pm \omega Z / 2\pi}{N}, \quad (4)$$

где f_{OC} – несущая частота частотного преобразователя A/C; N – коэффициент пересчета счетчика СТ.

При таком построении системы приращение длительности широтно-импульсного сигнала $\Delta\gamma$ ЧФД находится из выражения вида

$$\Delta\gamma = \frac{Z}{2\pi} \frac{f_Z}{f_{OC}} \Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ – изменение положения вала.

Поэтому эквивалентная добротность контура фазовой синхронизации снижается до величины, допускающей устойчивость работы системы. Простота и функциональность в сочетании с высокими точностными показателями представляются несомненными преимуществами АДЭ, эффективность использования которых уменьшается сложностью технической реализации операций управления, выполняемых над импульсными последовательностями. Однако увеличение потребности оборудования в прецизионных системах требовало все большего использования алгоритмов управления, реализация которых в рамках АДЭ связана с существенным конструктивным усложнением контроллеров. И неизвестно, как пошло бы развитие АДЭ, если бы развитие мик-

розлектроники двинулось в направлении выпуска доступных и относительно недорогих схем программируемой логики (ПЛИС), возможности которых идеально отвечали тенденциям построения АДЭ. Однако опережающее развитие технологии выпуска микропроцессоров, а затем и микроконтроллеров, создало предпосылки к применению этих устройств в электроприводах с фазовой синхронизацией скорости. Необходимость такого решения определялась переходом в прецизионной технике от двигателей постоянного тока к бесконтактным электрическим машинам синхронного и асинхронного типов. В системах с импульсно-цифровой фазовой синхронизацией (рис. 1,б) сохраняется большинство элементов классического контура фазовой синхронизации. Однако в этом случае связь между блоками ЧФД и ШИП осуществляется посредством микроконтроллера (МК) с соответствующими интерфейсами. Для получения числового N_P эквивалента фазовой ошибки φ используется времяимпульсный преобразователь (ВИП), который выполняет операцию вида

$$N_P = \frac{Z f_0}{2\pi f_Z} \varphi,$$

где f_0 – частота заполнения ВИП; f_Z – частота дискретизации МК, совпадающая с сигналом на выходе БЧЗ.

Интерфейс ВИП может выполняться по классическим схемам, но более предпочтительно использование преобразователей масочного типа, обеспечивающих считывание маски счетчика по скачку импульса одной из сравниваемых частот. В ряде случаев вполне возможно использование для фиксации величины фазовой ошибки «менеджеров событий», входящих в состав стандартного набора встроенной периферии ряда микроконтроллеров. Включение МК непосредственно в контур синхронизации позволило расширить возможный набор алгоритмов управления системой при сохранении основного ее преимущества перед другими системами – управление по величине фазовой ошибки траектории движения приводного механизма. Реализация же программного управления БЧЗ и возможность подключения к локальной сети управления технологическим оборудованием существенно расширили область применения таких электроприводов. Все это не устраняет одного из основных недостатков фазовых систем, а именно, – значительной величины гистерезиса при переходе к фазовой синхронизации из режима сравнения частот. Наличие такого гистерезиса обусловлено многозначной логической нелинейностью характеристик ЧФД, показанных на рис. 4,а.

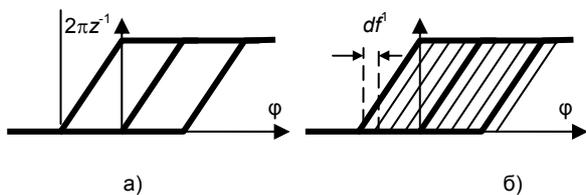


Рис. 4. Выходные характеристики: а – ЧФД; б – МЧФД

Использование дополнительных технических средств ускорения перехода к фазовому режиму не имеет в настоящее время однозначного решения и ведет к усложнению системы в части интерфейса взаимодействия цифровых и импульсных блоков. Одним из путей решения этой проблемы является переход от фиксированной системы отсчета к плавающей. В такой системе координат в режиме фазовой сравнения величина числового эквивалента фазовой ошибки N_K определяется по алгоритму вида

$$N_K = \frac{N_K}{z} + \frac{Z f_0}{2\pi f_Z} \left(\varphi - \frac{\varphi}{z} \right), \quad (5)$$

где z – оператор дискретного преобразования.

В этом случае величина гистерезиса перехода к фазовому режиму df определяется дискретностью ВИП:

$$df = \frac{2\pi f_Z}{Z f_0}.$$

В силу соотношения частот f_Z и f_0 , величина df значительно меньше гистерезиса обычного ЧФД. Однако при таком способе фиксации фазовой ошибки отсутствует жесткая привязка положения вала к моменту формирования датчика положения. В системах с импульсно-цифровой синхронизацией используется достаточно широкий арсенал аппаратных средств, что снижает возможности применения DSP-контроллеров из семейства Motor Control. Для реализации вычислительных возможностей таких устройств разработаны принципы построения электроприводов с цифровой фазовой синхронизацией (рис. 1,в), в которых практически все функции управления осуществляются встроенными интерфейсами. Как и при других способах фазовой синхронизации, работа системы управления базируется на информации о положении вала, получаемой с интерфейса измерительного преобразователя ИИП. Для электропривода с инкрементальным энкодером считываемая с ИИП информация $F_{FE}[nT]$ определяет действительное положение вала в соответствии со следующим законом:

$$F_{FE}[nT] = \frac{Z}{2\pi} \left\langle \int \omega dt \right\rangle. \quad (6)$$

При использовании резольверов посредством встроенного «менеджера событий» по (6) определяется смещение вала $F_{FR}[nT]$ в пределах полюсного деления датчика:

$$F_{FR}[nt] = D_F \frac{p}{2\pi} \left\langle \int \omega_B dt - \int \omega_0 dt \right\rangle, \quad (7)$$

где D_F – разрешающая способность ВИП-интерфейса; ω_0 – скорость поля возбуждения ВР; $\omega_B = \omega + \omega_0$.

Задание уровня скорости в таких системах осуществляется на программном уровне, а для вычисления величины фазового рассогласования используется модификация алгоритма (4), что обеспечивает вели-

чину гистерезиса при переходе в режим синхронизации, равную разрешающей способности используемого энкодера.

С точки зрения теории дискретных систем электропривод с фазовой синхронизацией и цифровыми средствами обработки уже не может быть сведен к простейшей системе с мгновенными импульсами. Поэтому, в отличие от (1), передаточная функция электропривода представляется в виде

$$W_D(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_0(s)}{s} \right\}. \quad (8)$$

Фалеев Михаил Владимирович,
Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
e-mail: admin@tam.ispu.ru

Принцип цифровой синхронизации в наибольшей степени отвечает требованиям, предъявляемым к многофункциональным электроприводам переменного тока.

Список литературы

1. **Трахтенберг Р.М.** Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоиздат, 1982.
2. **Пат. РФ №2310971.** Электропривод / М.В. Фалеев и др. Опубл. 2007, БИ №32.