

Методы измерений углового ускорения и рассогласования по угловой скорости синхронно-синфазного электропривода

А. В. БУБНОВ, В. А. ЕМАШОВ, А. Н. ЧУДИНОВ, А. Н. АЛПЫСОВА

Омский государственный технический университет, Омск, Россия,
e-mail: vemashov@mail.ru

Разработаны методы численного определения углового ускорения и рассогласования по угловой скорости синхронно-синфазного электропривода. Предложенные методы основаны на анализе взаимного порядка следования импульсов опорной частоты и обратной связи в режимах насыщения логического устройства сравнения.

Ключевые слова: синхронно-синфазный электропривод, прецизионный электропривод, угловая скорость и ускорение, фазовая автоподстройка частоты, логическое устройство сравнения, импульсный частотно-фазовый дискриминатор.

The methods of numerical determination of the angular acceleration and angular velocity misalignment for synchro-phase electric drive were developed. The methods are based on the analysis of the mutual order of the reference frequency pulses and feedback pulses in the saturation modes of logical comparator.

Key words: synchro-phase electric drive, precise electric drive, angular velocity, angular acceleration, phase autoadjustment of frequency, logical comparator, pulse frequency-phase detector.

Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ) находят широкое применение в обзорно-поисковых и сканирующих системах, использующих оптико-механическую развертку изображения [1, 2]. Такие ССЭ строятся на основе двухконтурной схемы, приведенной на рис. 1. Астатизм по частоте вращения и высокая точность регулирования электропривода по углу обеспечивается внутренним контуром синхронизации, построенным по принципу фазовой автоподстройки частоты [3, 4]. Контур фазовой автоподстройки частоты вращения (ФАПЧВ) электропривода включает логическое устройство сравнения, корректирующее устройство, электродвигатель и импульсный датчик частоты.

Внешний контур фазирования служит для начальной установки углового положения вала электродвигателя, что необходимо для настройки положения призмы узла оптико-механической развертки, соответствующего началу строки развертки сканируемого изображения в момент прихода импульса угловой привязки $F_{оп}$. Контур фазирования состоит из блока определения углового рассогласования, блока регулирования, контура ФАПЧВ и датчика положения.

Управление внешним и внутренним контурами осуществляется от блока задания частоты, формирующего импульсные сигналы опорной частоты $f_{оп}$ и угловой привязки $F_{оп}$. Частота $f_{оп}$ задает частоту вращения электропривода и определяется кодом задания M . Частота импульсов $F_{оп}$ определяется по формуле

$$F_{оп} = mf_{оп}/z,$$

где m — количество граней призмы узла оптико-механической развертки; z — количество радиальных меток импульсного датчика частоты.

На выходе логического устройства сравнения, частота задания которого $f'_{оп}$, формируется выходной сигнал γ , пропорциональный угловому рассогласованию. Сигнал $F_{ос}$ характеризует положение вала электродвигателя, а сигнал i_y задает уровень тока в его обмотках.

Управление ССЭ осуществляется в соответствии с принципом разделения во времени процессов синхронизации и фазирования [5], не позволяющим получить высокое быстродействие электропривода, и приводит к значительным потерям информации в сканирующей системе.

Для повышения быстродействия в переходных режимах работы, разработки сложных и более эффективных, с точки зрения динамики, систем управления ССЭ, необходимо с высокой точностью определять рассогласование по угловой скорости и угловое ускорение [6]. Известные методы опре-

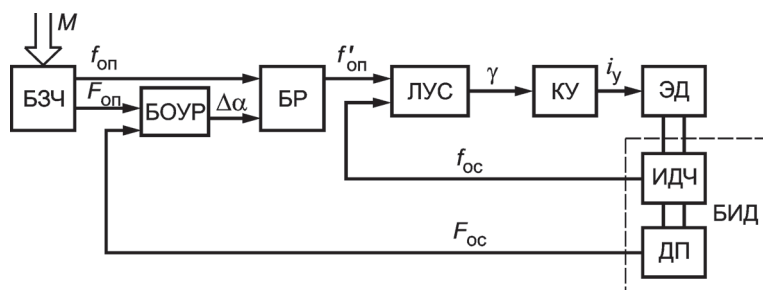


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема синхронно-синфазного электропривода:

БЗЧ — блок задания частоты; БОУР — блок определения углового рассогласования; БР — блок регулирования; ЛУС — логическое устройство сравнения; КУ — корректирующее устройство; ЭД — электродвигатель; БИД — блок импульсных датчиков; ИДЧ — импульсный датчик частоты; ДП — датчик положения

деления этих величин либо сложны в реализации (различные способы интерполяции импульсных сигналов датчика частоты вращения, алгоритмы определения оптимальной, с точки зрения точности и быстродействия, дискретизации этих датчиков и др.), либо имеют значительные ограничения по диапазону измеряемой величины.

Цель работы — разработка методов численного определения углового ускорения и рассогласования по угловой скорости ССЭ, основанных на анализе взаимного порядка следования импульсов опорной частоты и импульсов обратной связи в режимах насыщения логического устройства сравнения.

В качестве логического устройства сравнения двух импульсных последовательностей обычно используют импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД) [7, 8], который можно построить на основе различных алгоритмов работы, отличающихся реализуемыми функциональными возможностями дискриминатора и критериями сравнения входных частот [1]. Наиболее часто применяют такой алгоритм функционирования ИЧФД, когда изменение режима работы происходит при прохождении двух или более импульсов одной из сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты.

Логическое устройство сравнения обеспечивает три режима работы электропривода: разгон с максимальным ускорением ε_m при $f_{оп} > f_{ос}$ ($f_{ос}$ — частотный сигнал обратной связи, формируемый на выходе импульсного датчика частоты); пропорциональный или синхронный режим, $f_{оп} \approx f_{ос}$; торможение с максимальным ускорением при $f_{оп} < f_{ос}$. При разгоне и торможении система автоматического управления работает в разомкнутом режиме, а при переходе электропри-

вода в синхронный режим — в замкнутом. Такой алгоритм обеспечивает высокое быстродействие электропривода в режимах пуска и обработки изменения заданной частоты вращения, а также высокую точность регулирования угловой скорости в синхронном режиме работы.

Метод определения рассогласования по угловой скорости ССЭ. Для определения рассогласования по угловой скорости $\Delta\omega$ в режимах насыщения логического устройства сравнения в [9, 10] предложен метод, в котором в режиме насыщения ИЧФД подсчитывается количество импульсов N опорной частоты $f_{оп}$ на интервале Δt между двумя соседними моментами времени t_n, t_k , соответствующих приходу двух импульсов одной из частот ($f_{оп}$ или $f_{ос}$) между двумя соседними импульсами другой частоты, т. е. значениям фазового рассогласования $\pm \varphi_0/2$ импульсов сравниваемых частот. Следует отметить, что при выводе уравнений не были учтены искажающие помехи электромеханического преобразователя энергии.

За время Δt в режимах разгона электропривода угловое рассогласование изменится на величину

$$\Delta\omega_n \Delta t - \varepsilon_m \Delta t^2 / 2 = \varphi_0. \quad (1)$$

Заменив в (1) $\Delta\omega_n$ на $\Delta\omega_k$, в соответствии с выражением

$$\Delta\omega_k = \Delta\omega_n - \varepsilon_m \Delta t, \quad (2)$$

получим

$$\Delta\omega_k = (2\varphi_0 - \varepsilon_m \Delta t^2) / (2\Delta t).$$

С учетом того, что на интервале времени $\Delta t = NT_{оп}$ ($T_{оп} = 1/f_{оп}$) пройдет N импульсов частоты $f_{оп}$, найдем

$$\Delta\omega_k = (2\varphi_0 - \varepsilon_m N^2 T_{оп}^2) / (2NT_{оп}). \quad (3)$$

В режиме торможения в выражении (3) изменяется знак в правой части, тогда в общем виде запишем

$$|\Delta\omega_k| = |(2\varphi_0 - \varepsilon_m N^2 T_{оп}^2) / (2NT_{оп})|. \quad (4)$$

Полученное уравнение (4) позволяет вычислить значение $\Delta\omega_k$ в момент времени t_k по известным $\varphi_0, T_{оп}, \varepsilon_m$ и измеряемому значению N .

Проверка метода. Для проверки предложенного косвенного метода определения рассогласования по угловой скорости использована компьютерная имитационная модель синхронно-синфазного электропривода, построенная в приложении Simulink пакета программ Matlab.

Результаты моделирования процесса синхронизации на угловой скорости 52,5 рад/с представлены на графике рис. 2, а в виде зависимости отношения угловой скорости электропривода к заданному значению ω_3 от относительной погрешности измерения угловой скорости. Погрешность измерения определена как

$$\delta\omega_k = [(|\Delta\omega_k| + \omega_{оп}) - \omega_{оп}] / \omega_{оп} = |\Delta\omega_k| / \omega_{оп} = z|\Delta\omega_k| / (2\pi f_{оп}),$$

где $\Delta\omega_k$ рассчитана по (4).

На рис. 2, б показан в увеличенном масштабе отрезок графика рис. 2, а, соответствующий интервалу $0,9 < \omega/\omega_3 < 1,0$.

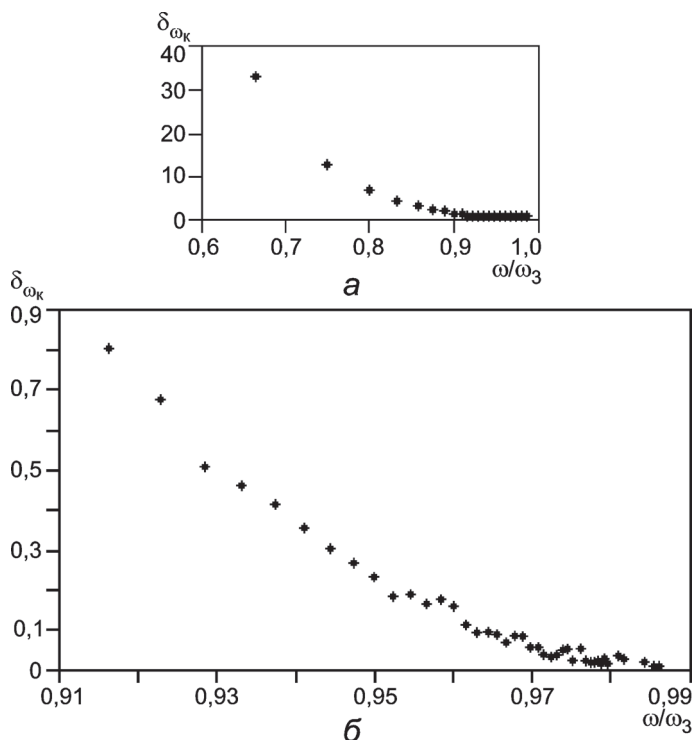


Рис. 2. Относительная погрешность $\delta\omega_k$ измерения угловой скорости при 52,5 рад/с для участка $0 < \omega/\omega_3 < 1,0$ (а) и участка $0,9 < \omega/\omega_3 < 1,0$ (б)

Точки на графиках соответствуют максимальной погрешности определения угловой скорости на некотором временном интервале. Эффективность применения косвенного способа определения рассогласования по угловой скорости для измерения частоты вращения электропривода повышается при приближении частоты вращения вала к опорной частоте задающего сигнала.

Для повышения точности косвенных способов определения рассогласования по угловой скорости и для разработки эффективных способов регулирования ССЭ следует также определять реальное ускорение электродвигателя в режимах насыщения, учитывающее момент нагрузки на его вал [11].

Метод измерения углового ускорения ССЭ. Запишем уравнение (1) с учетом реального ускорения ε_p :

$$\Delta t^2 - 2\Delta\omega_n \Delta t / \varepsilon_p + 2\varphi_0 / \varepsilon_p = 0, \quad (5)$$

или, заменив $\Delta\omega_n$ на $\Delta\omega_k$ в соответствии с (2), получим

$$\Delta t^2 + 2\Delta\omega_k \Delta t / \varepsilon_p - 2\varphi_0 / \varepsilon_p = 0. \quad (6)$$

Выразим ε_p из (5), а $\Delta\omega_k$ из (6):

$$\varepsilon_p = (2\Delta\omega_n \Delta t - 2\varphi_0) / \Delta t^2; \quad (7)$$

$$\Delta\omega_k = \varphi_0 / \Delta t - \varepsilon_p \Delta t / 2. \quad (8)$$

На рис. 3 изображен участок фазового портрета работы электропривода, показывающий две последовательных отработки углового рассогласования $\Delta\alpha = \varphi_0$ — участки AB и BC . Изображающая точка проходит оба участка с ускорением ε_p за время Δt_1 и Δt_2 , соответственно; $\Delta\omega_{n1}$, $\Delta\omega_{n2}$ и $\Delta\omega_{k1}$, $\Delta\omega_{k2}$ — начальные и конечные значения рассогласования по угловой скорости для каждого участка; при этом $\Delta\omega_{k1} = \Delta\omega_{n2}$.

В результате (8) представим в виде

$$\Delta\omega_{n2} = \Delta\omega_{k1} = \varphi_0 / \Delta t_1 - \varepsilon_p \Delta t_1 / 2. \quad (9)$$

Для участка BC (см. рис. 3) уравнение (7) запишем как

$$\varepsilon_p = 2\Delta\omega_{n2} / \Delta t_2 - 2\varphi_0 / \Delta t_2^2. \quad (10)$$

Преобразуем выражение (10) с учетом (9):

$$\varepsilon_p = 2(\varphi_0 / \Delta t_1 - \varepsilon_p \Delta t_1 / 2) / \Delta t_2 - 2\varphi_0 / \Delta t_2^2. \quad (11)$$

Выразив ε_p из (11), получим

$$\varepsilon_p = 2\varphi_0 (\Delta t_2 - \Delta t_1) / [\Delta t_2 \Delta t_1 (\Delta t_2 + \Delta t_1)]. \quad (12)$$

Количество импульсов задающей частоты $f_{оп}$ на интервале времени Δt :

$$N_i = \Delta t_i / T_{оп},$$

тогда (12) примет следующий вид:

$$\varepsilon_p = 2\varphi_0 (N_2 - N_1) / [T_{оп}^2 N_2 N_1 (N_2 + N_1)].$$

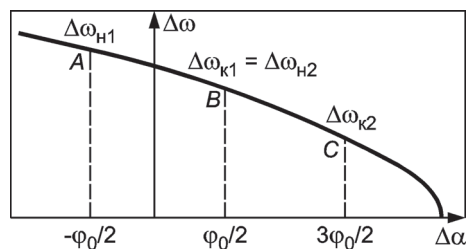


Рис. 3. Фазовый портрет работы электропривода

Проведя аналогичные вычисления для режима торможения электродвигателя с ускорением ε_m , получим

$$\varepsilon_m = -2\varphi_0 (N_2 - N_1) / [T_{оп}^2 N_2 N_1 (N_2 + N_1)].$$

В результате обобщения запишем уравнение для определения углового ускорения электропривода

$$\varepsilon = \pm 2\varphi_0 (N_2 - N_1) / [T_{оп}^2 N_2 N_1 (N_2 + N_1)], \quad (13)$$

где знак «+» выбирается для режима разгона, а «-» для режима торможения.

Вычисленное угловое ускорение (см. (13)) можно использовать для повышения точности измерений рассогласования по угловой скорости в соответствии с (4), а также для организации управления ССЭ с улучшенными динамическими показателями качества регулирования [3].

Выводы. Полученные результаты можно использовать при проектировании синхронно-синфазных электроприводов с повышенным быстродействием в режимах синхронизации и фазирования, что позволит снизить потери информации в обзорно-поисковых и сканирующих системах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-08-31109).

Л и т е р а т у р а

1. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Федоров В. Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода. Омск: ОмГТУ, 2010.
2. Трахтенберг Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. М.: Энергоиздат, 1982.
3. Бубнов А. В., Чудинов А. Н. Улучшение показателей качества регулирования электропривода сканирующих систем. Омск: ОмГТУ, 2012.
4. Парамонова А. А., Ивахно В. С. Особенности построения электропривода сканирующего устройства с цифровым контуром фазовой синхронизации скорости // Известия ТГУ. Техн. науки. 2012. Вып. 11. Ч. 1. С. 222—228.
5. Bubnov A. V., Bubnova T. A. Methods of phasing electric drive with phase lock // Rus. Elect. Eng. 2010. № 5. P. 2—8.
6. Чудинов А. Н. и др. Новые принципы и способы организации управления синхронно-синфазным электроприводом сканирующих систем // Омский научный вестник. 2012. № 1. С. 192—197.

7. **Стребков В. И.** Импульсный частотно-фазовый дискриминатор на интегральных микросхемах // Электронная техника в автоматике. 1977. Вып. 9. С. 223—230.

8. **Zhang Jiawei, Zhao Hui, Ma Kema.** Phase-Locked Loop in Constant Speed Control System for the Flywheel Motor // Recent Advances in CSIE. 2011. V. 129. P. 323—330.

9. **Емашов В. А., Бубнов А. В., Чудинов А. Н.** Эффективный способ регулирования электропривода с фазовой синхронизацией // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 5. С. 46—49.

10. **Чудинов А. Н., Емашов В. А., Бубнов А. В.** Способ косвенного определения ошибки по частоте вращения в электроприводе с фазовой синхронизацией в режиме насыщения логического устройства сравнения // Омский научный вестник. 2011. № 1. С. 99—103.

11. **Харченко Е. Ф., Емашов В. А., Бубнов А. В.** Способ определения углового ускорения синхронно-синфазного электропривода // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Омск, 2012. Кн. 1. С. 99—102.

Дата принятия 09.06.2014 г.

681.2.531.71

Прецизионные фотоэлектрические преобразователи перемещения в нанометрии

В. Н. ЯНУШКИН, Ю. Б. КОЛЯДА

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: yura_kolyada@mail.ru

Рассмотрена возможность использования в нанометрии разработанного цифрового фотоэлектрического интерферометра для измерений малых перемещений. Проанализирован частный случай использования интерферометра, имеющего достаточные показатели по точности, надежности, функциональности и высокий индекс интерполяции для цифровой фиксации перемещений в нанометровом диапазоне.

Ключевые слова: цифровой фотоэлектрический интерферометр, нанометрия, индекс интерполяции.

The possibility of using the digital photoelectric interferometer in nanometry to measure the small displacements is considered. In particular the analysis of use of interferometer with a high interpolation index for digital record of displacements in nanometer range due to its high accuracy, reliability and functionality — has been carried out.

Key words: digital photoelectric interferometer, nanometry, interpolation index.

В настоящее время бурно развиваются такие нанотехнологии, как микролитография, супрмолекулярная химия, наноплазмоника. Появляются новые нанообъекты: нанотранзисторы, размеры которых за период 2007—2011 гг. уменьшились с 45 до 22 нм; мемристоры с запоминанием силы тока; плазмоны; графен, заменяющий кремний в интегральных схемах; литийные наноаккумуляторы большой емкости; углеродные трубки для бронежилетов повышенной прочности; сверхбыстродействующие нейрокомпьютеры; широкополосные фотоприемники. Нанотехнологии существенно повышают потребительские свойства промышленных изделий и, следовательно, очень перспективны. Поэтому промышленно развитые страны выделяют на исследования и разработку нанотехнологий огромные средства, создают исследовательские центры и производства. Однако в нашей стране метрологии в этой области уделяется недостаточно внимания.

Д. И. Менделеев говорил, что «наука начинается там, где начинают измерять». Он был услышан, метрологию начали развивать и в России. Сейчас наступило время нанотехнологий, поэтому надо ускоренно развивать нанометрологию, так как «если нельзя измерить, то невозможно создать» [1].

Пути этого развития находятся на стыке методов исследования поверхности твердого тела — сканирующей зондовой микроскопии — и прецизионных измерений линейных величин.

Основными средствами измерений и исследования микроструктур, нашедших широкое применение, являются:

атомно-силовой микроскоп, работающий с проводящими материалами и позволяющий наблюдать атомы;

сканирующий туннельный микроскоп, позволяющий не только наблюдать, но и передвигать атомы;

электросиловой микроскоп для детектирования единичных зарядов на поверхности образцов, использующийся для изучения локальных диэлектрических свойств поверхностных слоев образцов;

магнитно-силовой микроскоп, предназначенный для исследования образцов с сильно развитым рельефом поверхности;

ближнепольный оптический микроскоп, применяемый для исследования локальных оптических и фотоэлектрических свойств полупроводниковых структур и биологических объектов.