

УДК 62-83: 621.3.07

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ И ОШИБКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО УГЛОВОЙ СКОРОСТИ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов, М.В. Гокова

Омский государственный технический университет

E-mail: chudinov\_al@mail.ru

Разработаны методы косвенного измерения ошибки по угловой скорости и углового ускорения синхронно-синфазного электропривода, основанные на анализе взаимного порядка следования импульсов опорной частоты и импульсов обратной связи в режимах насыщения логического устройства сравнения. Для определения ошибки по угловой скорости предлагается два метода: в первом используется подсчет количества повторяющихся во времени совпадений импульсов опорной частоты и импульсов в канале обратной связи на интервале между двумя соседними моментами времени, соответствующими приходу двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты, а во втором – подсчет количества импульсов частоты опорного высокочастотного генератора на том же временном интервале. При косвенном измерении углового ускорения используется подсчет количества импульсов частоты опорного высокочастотного генератора на двух соседних временных интервалах измерения ошибки по угловой скорости.

### Ключевые слова:

Синхронно-синфазный электропривод, логическое устройство сравнения, косвенное измерение угловой скорости, косвенное измерение углового ускорения, фазирование, синхронизация.

Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ) находят широкое применение в обзорно-поисковых и сканирующих системах, в системах технического зрения современных робототехнических комплексов, системах автоматического визуального контроля продукции, установках фототелеграфной и видеозаписывающей аппаратуры, копировальных установках, что обусловлено их высокими точностными показателями, широким диапазоном регулирования угловой скорости и высоким быстродействием [1]. Синхронно-синфазный электропривод строится на основе двухконтурной схемы (рис. 1).

Астатизм по частоте вращения и высокая точность регулирования электропривода по углу обеспечивается внутренним контуром синхронизации, построенным на основе принципа фазовой автоподстройки частоты [2]. Контур фазовой автоподстройки частоты вращения (ФАПЧВ) электропривода включает в себя логическое устройство сравнения (ЛУС), корректирующее устройство (КУ), электродвигатель (ЭД) и импульсный датчик частоты (ИДЧ).

Логическое устройство сравнения обеспечивает три режима работы электропривода: разгон с максимальным ускорением  $\varepsilon_m$  (при  $f_{оп} > f_{ос}$ ), пропорциональный (синхронный,  $f_{оп} \approx f_{ос}$ ) и торможение с максимальным ускорением (при  $f_{оп} < f_{ос}$ ). В качестве логического устройства сравнения двух импульсных последовательностей обычно используется импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД) [1]. Чаще всего используется алгоритм работы ИЧФД, при котором изменение режима работы происходит в случае прохождения двух или более импульсов одной из сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты.

Внешний контур фазирования служит для начальной установки углового положения вала электродвигателя, что вызвано необходимостью установки положения призмы узла оптико-механической развертки (ОМР), соответствующего началу строки развертки сканируемого изображения в момент прихода импульса  $F_{оп}$ . Контур фазирования включает в себя блок определения углового рассогласования (БОУР), блок регулирования угловой ошибки (БР), контур ФАПЧВ и датчик положения ДП.

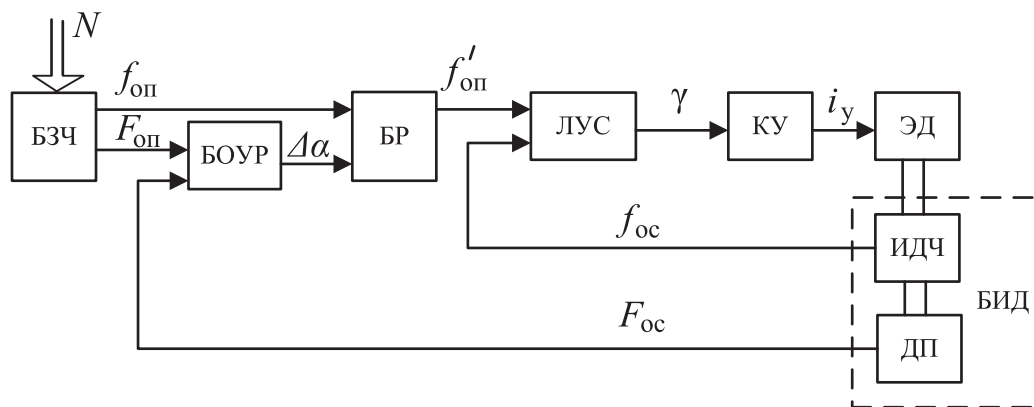


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

Управление внешним и внутренним контурами осуществляется от блока задания частоты (БЗЧ), формирующего импульсные сигналы  $f_{оп}$  и  $F_{оп}$ . Опорная частота  $f_{оп}$  задает частоту вращения электропривода и определяется кодом задания  $N$ . Частота импульсов угловой привязки  $F_{оп}$  связана с опорной частотой  $f_{оп}$  через коэффициент деления цифрового делителя частоты, входящего в состав БЗЧ, и определяется как

$$F_{оп} = \frac{m}{z} f_{оп},$$

где  $m$  – количество граней призмы узла ОМР,  $z$  – количество радиальных меток ИДЧ.

Организация управления ССЭ осуществляется в соответствии с принципом разделения во времени процессов синхронизации и фазирования [3], который не позволяет получить высокое быстродействие ЭП и приводит к значительным потерям информации в сканирующей системе.

Для разработки и реализации высокоэффективных с точки зрения улучшения динамики электропривода способов управления [4] необходимо процесс фазирования начинать до момента фазовой синхронизации, а для этого необходимо с высокой точностью определять ошибку по угловой скорости и угловое ускорение ССЭ. Известные методы определения ошибки по угловой скорости и углового ускорения 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 т. п.), либо имеют значительные ограничения по диапазону измеряемой величины.

Целью работы является разработка методов косвенного измерения ошибки по угловой скорости и углового ускорения ССЭ, основанных на анализе взаимного порядка следования импульсов опорной частоты и импульсов обратной связи в режимах насыщения логического устройства сравнения.

Для определения ошибки по угловой скорости  $\Delta\omega$  в режимах насыщения ЛУС предлагается [5, 6] использовать методы вычисления  $\Delta\omega$ , основанные на измерении временного интервала  $\Delta t$ , за который угловое рассогласование  $\Delta\alpha$  электропривода изменится на известную заранее величину, путем логической обработки последовательности импульсов сравниваемых ЛУС частот  $-f_{оп}$  с  $f_{ос}$ .

Для нахождения зависимости  $\Delta\omega_k = f(\Delta t, \Delta\alpha)$  проведем анализ работы ЛУС в режиме насыщения при приближении значения частоты обратной связи  $f_{ос}$  к опорной частоте  $f_{оп}$ . На рис. 2 представлен фазовый портрет работы электропривода с фазовой синхронизацией в режиме разгона [2].

Время  $\Delta t$  соответствует интервалу времени между начальным моментом времени  $t_n$  и конечным  $t_k$ , за который угловая скорость изменится от значения  $\Delta\omega_n$  до значения  $\Delta\omega_k$ , а ошибка по углу  $\Delta\alpha$  изменится на величину, равную  $\Delta\alpha_0$ .

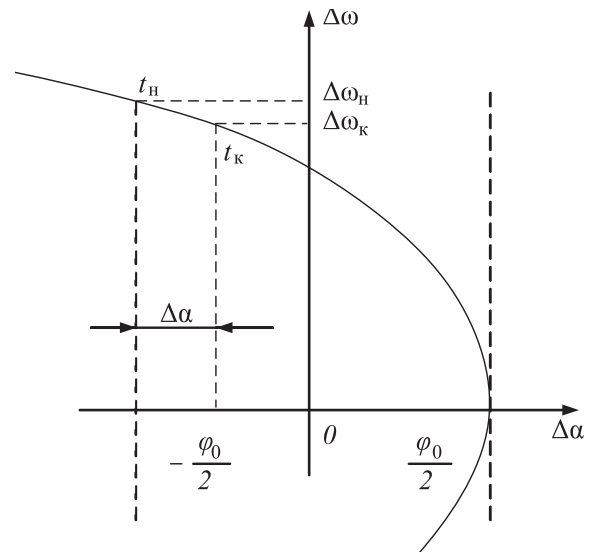


Рис. 2. Фазовый портрет работы электропривода с фазовой синхронизацией

Запишем систему уравнений для фазовых траекторий в координатах  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\omega$  фазовой плоскости:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \alpha_3 - \alpha = \int \omega_3 dt - \int \omega dt = \int \Delta\omega dt; \\ \Delta\omega = \omega_3 - \omega = \omega_3 - \int \varepsilon_m dt, \end{cases}$$

где  $\alpha_3$  и  $\alpha$  – заданное и фактическое угловое положение вала электродвигателя,  $\omega_3$  и  $\omega$  – заданная и фактическая угловая скорость ЭП.

В режиме разгона электродвигателя с максимальным ускорением  $\varepsilon_m$  угловая скорость  $\omega$  с момента времени  $t_n$  изменяется по закону:

$$\omega = \omega_n + \varepsilon_m(t - t_n).$$

Ошибка по угловой скорости электропривода может быть записана в виде:

$$\Delta\omega = \omega_3 - \omega_n - \varepsilon_m(t - t_n).$$

С учетом того, что

$$\omega_3 - \omega_n = \Delta\omega_n,$$

получаем

$$\Delta\omega = \Delta\omega_n - \varepsilon_m(t - t_n). \quad (1)$$

Подставляя в данное выражение  $t=t_k$ , получаем для промежутка времени  $\Delta t=t_k-t_n$

$$\Delta\omega_k = \Delta\omega_n - \varepsilon_m\Delta t$$

или

$$\Delta\omega_n = \Delta\omega_k + \varepsilon_m\Delta t. \quad (2)$$

Величина изменения угловой ошибки электропривода на интервале времени  $t_n-t$  определяется из выражения:

$$\Delta\alpha = \int_{t_n}^t \Delta\omega dt.$$

С учетом того, что на интервале времени  $t_n-t_k$  величина угловой ошибки изменяется на  $\Delta\alpha_0$ , получаем:

$$\Delta\alpha_0 = \int_{t_n}^{t_k} \Delta\omega dt$$

или с учетом выражения (1):

$$\Delta\alpha_0 = \Delta\omega_n \Delta t - \frac{\varepsilon_m \Delta t^2}{2}.$$

Проведя замену  $\Delta\omega_n$  на  $\Delta\omega_k$  в соответствии с выражением (2), после преобразований получим:

$$\Delta\alpha_0 = \Delta\omega_k \Delta t + \frac{\varepsilon_m \Delta t^2}{2}.$$

Выразив из полученного уравнения  $\Delta\omega_k$ , получим:

$$\Delta\omega_k = \frac{2\Delta\alpha_0 - \varepsilon_m \Delta t^2}{2\Delta t}. \quad (3)$$

Таким образом, для косвенного определения ошибки по угловой скорости достаточно определить время, за которое угловое рассогласование  $\Delta\alpha$  электропривода изменится на величину равную  $\Delta\alpha_0$ . Для определения величин, необходимых для расчета ошибки по угловой скорости, предлагается два метода.

Первый метод [2, 5, 6] основан на подсчете количества повторяющихся во времени совпадений импульсов опорной частоты  $f_{оп}$  длительностью  $\tau_{оп}$  и частоты обратной связи  $f_{ос}$  длительностью  $\tau_{ос}$  (рис. 3) на интервале  $\Delta t = t_k - t_n$ , где  $t_n$  – время начала подсчета совпадающих импульсов, а  $t_k$  – время окончания подсчета совпадающих импульсов, т. е. время первого несовпадения  $f_{оп}$  с  $f_{ос}$ .

За время  $\Delta t$  значение  $\Delta\alpha$  изменяется при разгоне на величину, рассчитываемую заранее и равную:

$$\Delta\alpha_0 = \pm \varphi_0 \left( \frac{\tau_{оп} + \tau_{ос}}{T_{оп}} \right) = \pm \varphi_0 \sigma.$$

Введем обозначение  $N$  для количества повторяющихся во времени ситуаций совпадений им-

пульсов частот  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$  на интервале  $\Delta t$ , и  $D\Delta\omega_k$  и  $\Delta\omega_n$  – для ошибок по угловой скорости в моменты времени  $t_k$  и  $t_n$ .

С учетом зависимости интервала времени  $\Delta t$  от количества  $N$  импульсов частоты  $f_{оп}$

$$\Delta t = NT_{оп} \quad (4)$$

можно определить значение  $\Delta\omega_k$  при разгоне ЭП

$$\Delta\omega_k = \frac{2\varphi_0 \sigma - \varepsilon_m N^2 T_{оп}^2}{2NT_{оп}}. \quad (5)$$

С учетом режима торможения выражение (5) можно записать в виде:

$$|\Delta\omega_k| = \left| \frac{2\varphi_0 \sigma - \varepsilon_m N^2 T_{оп}^2}{2NT_{оп}} \right|.$$

Для получения удобной для практического применения зависимости  $\Delta\omega_k = f(N)$  целесообразно значение выражения  $\sigma = (\tau_{оп} + \tau_{ос}) / T_{оп}$  поддерживать постоянным во всем диапазоне рабочих частот вращения электропривода, что приводит к усложнению его структуры.

Второй метод [2, 5, 7] определения величин, необходимых для расчета ошибки по угловой скорости, лишен указанного недостатка и обладает большей точностью расчета  $\Delta\omega_k$ . Метод основан на подсчете количества импульсов  $N$  опорной частоты  $f_{оп}$  на интервале между двумя соседними моментами времени  $t_n$  и  $t_k$ , соответствующими приходу двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты.

Зависимость текущего значения ошибки по угловой скорости от количества импульсов  $N$  можно получить из выражения (4), с учетом того, что за время значения  $\Delta\alpha$  изменяется на  $\varphi_0$ , таким образом:

$$\Delta\alpha_0 = \varphi_0.$$

Время  $\Delta t$  определяется согласно выражению (4) так же, как и в первом методе, в этом случае

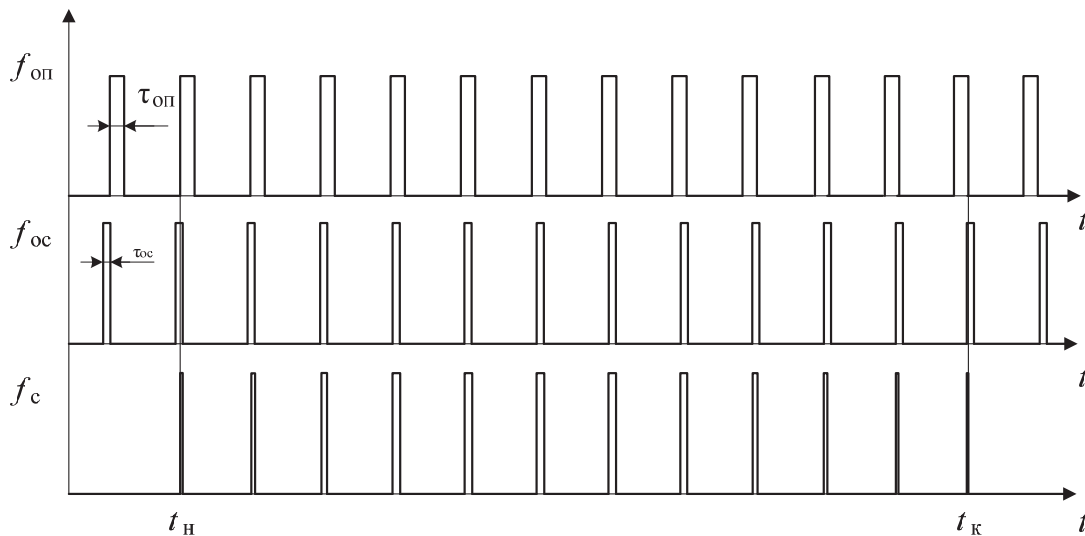


Рис. 3. Временные диаграммы импульсов  $f_{оп}$ ,  $f_{ос}$  и  $f_c$

$$|\Delta\omega_{\kappa}| = \left| \frac{2\varphi_0 - \varepsilon_m N^2 T_{\text{оп}}^2}{2NT_{\text{оп}}} \right|. \quad (6)$$

В последнем из предложенных выше методов косвенного определения ошибки по угловой скорости для вычисления этой величины использовался подсчет импульсов опорной частоты, которые формируются путем деления частоты импульсов, поступающих с высокочастотного кварцевого генератора. Для обеспечения максимальной точности косвенного определения ошибки по угловой скорости при определении временного интервала, за который угловое рассогласование  $\Delta\alpha$  электропривода изменится на величину равную  $\varphi_0$ , целесообразно подсчитывать непосредственно импульсы с выхода высокочастотного кварцевого генератора [2].

При частоте кварцевого генератора  $f_{\Gamma}$  уравнение (6), с учетом того, что  $\Delta t = T_{\Gamma} N$ , примет следующий вид:

$$|\Delta\omega_{\kappa}| = \left| \frac{2\varphi_0 - \varepsilon_m N^2 T_{\Gamma}^2}{2NT_{\Gamma}} \right|. \quad (7)$$

Использование высокочастотного кварцевого генератора для определения временного интервала  $\Delta t$  позволяет с высокой точностью определить значения ошибки по угловой скорости  $\Delta\omega_{\kappa}$  и устранить зависимость определяемой величины от заданной угловой скорости.

В выражения (5)–(7) входит величина максимального углового ускорения  $\varepsilon_m$  электропривода, поэтому для повышения точности косвенных методов определения ошибки по угловой скорости целесообразно вычислять реальное ускорение электродвигателя [8] в режимах разгона и торможения электропривода.

На рис. 4 представлен участок фазового портрета работы электропривода, изображающий две последовательных обработки угловой ошибки  $\Delta\alpha = \varphi_0$  – участки АВ и ВС. Оба участка изображающая точка проходит с ускорением  $\varepsilon_p$  за промежутки времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , соответственно,  $\Delta\omega_{\kappa 1}$  и  $\Delta\omega_{\kappa 2}$  – начальные значения ошибки по угловой скорости для каждого участка, а  $\Delta\omega_{\kappa 1}$  и  $\Delta\omega_{\kappa 2}$  – конечные. При этом  $\Delta\omega_{\kappa 1} = \omega_{\kappa 2}$ .

Считая ускорение на участке АС постоянным, можно определить ускорение на участке ВС:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta\omega_{\kappa 1} - \Delta\omega_{\kappa 2}}{\Delta t_2}.$$

Используя выражение (3), получим:

$$\varepsilon_p = \frac{\frac{2\varphi_0 - \varepsilon_p \Delta t_1^2}{2t_1} - \frac{2\varphi_0 - \varepsilon_p \Delta t_2^2}{2t_2}}{\Delta t_2}. \quad (8)$$

В результате математических преобразований уравнения (8) получаем следующее выражение

$$\varepsilon_p = \frac{2\varphi_0(\Delta t_2 - \Delta t_1)}{\Delta t_1 \Delta t_2 (\Delta t_2 + \Delta t_1)},$$

с учетом того, что  $\Delta t = T_{\Gamma} N$

$$\varepsilon_p = \frac{2\varphi_0(N_2 - N_1)}{T_{\Gamma}^2 N_1 N_2 (N_2 + N_1)}.$$

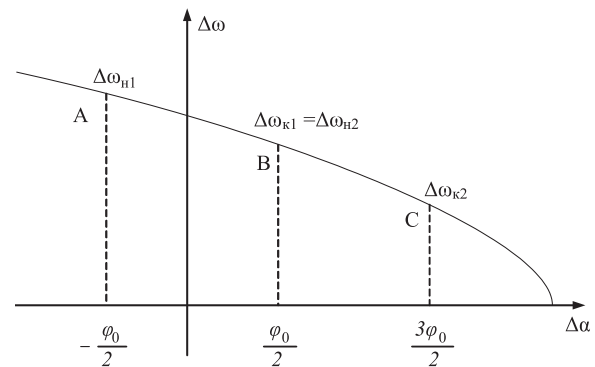


Рис. 4. Фазовый портрет работы электропривода

Проводя аналогичные вычисления для режима торможения электродвигателя с ускорением  $\varepsilon_r$ , получим выражение, отличающееся от случая разгона ЭП только наличием знака минус. Тогда в общем виде можем записать, что угловое ускорение движения электродвигателя будет находиться по формулам:

$$|\varepsilon_p| = \left| \frac{2\varphi_0(\Delta t_2 - \Delta t_1)}{\Delta t_1 \Delta t_2 (\Delta t_2 + \Delta t_1)} \right|$$

или

$$|\varepsilon_p| = \left| \frac{2\varphi_0(N_2 - N_1)}{T_{\Gamma}^2 N_1 N_2 (N_2 + N_1)} \right|.$$

#### Выводы

Предложены методы косвенного измерения ошибки по угловой скорости и углового ускорения синхронно-синфазного электропривода, основанные на анализе взаимного порядка следования импульсов опорной частоты и импульсов обратной связи в режимах насыщения логического устройства сравнения, которые могут быть использованы при проектировании синхронно-синфазных электроприводов, реализующих высокоэффективные алгоритмы управления в режимах синхронизации и фазирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнов А.В., Бубнова Т.А., Федоров В.Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: монография. – Омск: ОмГТУ, 2010. – 104 с.
2. Бубнов А.В., Чудинов А.Н. Улучшение показателей качества регулирования электропривода сканирующих систем: монография. – Омск: ОмГТУ, 2012. – 92 с.
3. Бубнов А.В., Бубнова Т.А. Способы фазирования электропривода с фазовой синхронизацией // *Электротехника*. – 2010. – № 5. – С. 2–8.
4. Бубнов А.В., Бубнова Т.А., Чудинов А.Н., Емашов В.А. Новые принципы и способы организации управления синхронно-синфазным электроприводом сканирующих систем // *Омский научный вестник*. – 2012. – № 1. – С. 192–197.
5. Бубнов А.В., Чудинов А.Н., Емашов В.А. Эффективный способ регулирования электропривода с фазовой синхронизацией // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2011. – № 5. – С. 46–49.
6. Стабилизированный электропривод: пат. 2462809 Рос. Федерация № 2011120657/07; заявл. 20.05.11; опубл. 27.09.12, Бюл. № 27. – 12 с.
7. Бубнов А.В., Емашов В.А., Чудинов А.Н. 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.
8. Бубнов А.В., Емашов В.А., Харченко Е.Ф. 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.

Поступила 16.05.2013 г.

UDC 62–83: 621.3.07

## THE DEVELOPMENT OF METHODS OF ANGULAR ACCELERATION INDIRECT MEASUREMENT AND CONTROL ERROR FOR ANGULAR SPEED OF SYNCHRONOUSLY-INPHASE ELECTRIC DRIVE

A.V. Bubnov, A.N. Chudinov, M.V. Gokova

Omsk State Technical University

*The authors have developed the methods of indirect measurement of angular speed error and angular acceleration of synchronously-inphase electric drive based on the analysis of cross sequence order of base frequency and closed loop pulses under saturated conditions of logic comparison device. Two methods are proposed to determine the angular speed error. The first one uses the calculation of a number of repetitive at the time pulse coincidences in base frequency and pulses in closed loop channel between two neighboring time moments corresponding to arrival of two pulses of one of the frequencies compared between two neighboring pulses of another frequency. The second method is based on calculation of a number of frequency pulses in reference high-frequency oscillator in the same time interval. At indirect measurement of angular acceleration the authors used the calculation of a number of frequency pulses in reference high-frequency oscillator at two neighboring time intervals of measuring angular speed error.*

### Key words:

*Synchronously-inphase electric drive, logical comparator, indirect measurement of angular speed, indirect measurement of angular acceleration, phasing, synchronization.*

## REFERENCES

1. Bubnov A.V., Bubnova T.A., Fedorov V.L. *Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya teorii sinkhronno-sinfaznogo elektroprivoda* (Current state and prospects of development of the theory synchronously-inphase electric drive). Omsk, OmGTU, 2010. 104 p.
2. Bubnov A.V., Chudinov A.N. *Uluchsheniye pokazateley kachestva regulirovaniya elektroprivoda skaniruyushchikh sistem* (The improvement in the quality control electric drive scanning systems). Omsk, OmGTU, 2012. 92 p.
3. Bubnov A.V., Bubnova T.A. *Elektrotekhnika*, 2010. 5, pp. 2–8.
4. Bubnov A.V., Bubnova T.A., Chudinov A.N., Emashov V.A. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2012. 1, pp. 192–197.
5. Bubnov A.V., Chudinov A.N., Emashov V.A. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2011. 5, pp. 46–49.
6. Bubnov A.V., Chudinov A.N., Emashov V.A. *Stabilizirovannyy elektroprivod* (The stabilized electric drive). Patent RF, no. 2462809, 2012.
7. Bubnov A.V., Emashov V.A., Chudinov A.N. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2011. 1, pp. 99–103.
8. Bubnov A.V., Emashov V.A., Kharchenko E.F. *Sposob opredeleniya ugloвого uskoreniya sinkhronno-sinfaznogo elektroprivoda* (The method for determining the angular acceleration synchronously-inphase electric drive). *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (Proc. 8<sup>th</sup> Int. Scientific and Technical Conference. The dynamics of systems, tools and machines). Omsk, 2012. 1, pp. 99–102.