

УДК 62-83: 681.532.55

**Косвенный метод определения ошибки  
по угловой скорости электропривода  
на основе эталонного импульсного сигнала  
изменяемой частоты\***

**А.В. БУБНОВ<sup>1</sup>, В.А. ЕМАШОВ<sup>2</sup>, А.Н. ЧЕТВЕРИК<sup>3</sup>, А.Н. ЧУДИНОВ<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> 644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: bubnov-av@bk.ru

<sup>2</sup> 644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет, кандидат технических наук. E-mail: jadasster@gmail.com

<sup>3</sup> 644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет. E-mail: alina.an@mail.ru

<sup>4</sup> 644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет, кандидат технических наук E-mail: chudinov\_al@mail.ru

В настоящее время электромеханические системы лазерного сканирования находят широкое применение при создании моделей реальных объектов для различных отраслей промышленности, снятии рельефа местности и т. д. Узел электромеханической развертки таких систем целесообразно строить на базе синхронно-синфазного электропривода (ССЭ), реализованного на основе принципа ФАПЧ, который обеспечивает высокую точность регулирования в режиме стабилизации угловой скорости. В ряде применений требуется изменение частоты вращения исполнительного устройства. В этом случае происходят потери информации в сканирующей системе на время переходного процесса отработки изменения сигнала задания частоты вращения. Для уменьшения потерь информации требуется применять более сложные способы управления, которые возможны только при высокой точности измерения динамических параметров электропривода. В данной работе приводится описание нового метода косвенного определения рассогласования по частоте вращения электропривода в режимах работы с максимальным ускорением при разгоне и торможении. Известные методы косвенного измерения не позволяют оценивать рассогласования по частоте вращения синхронно-синфазного электропривода с высокой точностью на ранних этапах разгона (торможения) электропривода. Методы прямого измерения либо значительно сложнее в реализации (дороже), либо не обеспечивают необходимую точность измерения при приближении угловой скорости электропривода к заданной. В статье предложен метод косвенного определения рассогласования по частоте вращения электропривода, который заключается в логической обработке порядка следования импульсов с выхода импульсного датчика частоты вращения электропривода и импульсов дополнительного импульсного сигнала, частота которого изменяется (подстраивается) по мере приближения угловой скорости электропривода к заданной. Данный метод позволяет обеспе-

---

\* Статья получена 15 июня 2015 г.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований по проекту № 14-08-31109.

чить заданную достаточно высокую точность определения рассогласования по угловой скорости на большей части участка разгона (торможения) электропривода.

**Ключевые слова:** синхронно-синфазный электропривод, фазовая автоподстройка частоты, угловая скорость, прецизионный электропривод, рассогласование, заданная точность, система управления, косвенное измерение, импульсный датчик частоты вращения

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-4-118-127

## ВВЕДЕНИЕ

Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ) находят широкое применение в обзорно-поисковых и сканирующих системах и устройствах, в системах технического зрения современных робототехнических комплексов, системах автоматического визуального контроля продукции, установках фото-телеграфной и видеозаписывающей аппаратуры, копировальных установках, что обусловлено их высокими точностными показателями, широким диапазоном регулирования угловой скорости и высоким быстродействием.

Синхронно-синфазный электропривод строится на основе двухконтурной схемы (рис. 1). Астатизм по частоте вращения и высокая точность регулирования электропривода по углу обеспечиваются внутренним контуром синхронизации, построенным на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1–7]. Контур синхронизации электропривода (фазовой автоподстройки частоты вращения – ФАПЧВ) включает в себя логическое устройство сравнения (ЛУС), корректирующее устройство (КУ), электродвигатель (ЭД) и импульсный датчик частоты (ИДЧ).

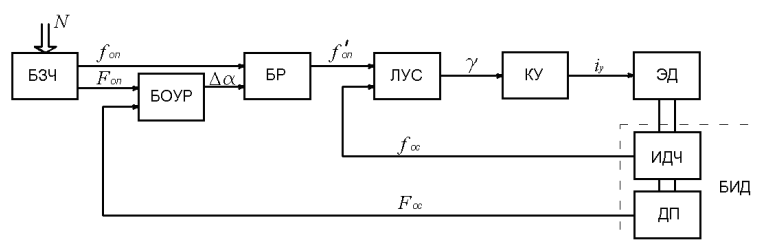


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

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

Управление внешним и внутренним контурами осуществляется от блока задания частоты (БЗЧ), формирующего импульсные сигналы  $f_{оп}$  и  $F_{оп}$ . Опорная частота  $f_{оп}$  определяется кодом задания  $N$ . Частота опорных импульсов угловой привязки  $F_{оп}$  связана с опорной частотой  $f_{оп}$  через коэффи-

циент деления  $N$  цифрового делителя частоты, входящего в состав БЗЧ, и определяется как

$$F_{\text{оп}} = f_{\text{оп}}(m/z),$$

где  $m$  – количество граней призмы узла ОМР;  $z$  – количество радиальных ме-ток ИДЧ.

## 1. КОСВЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ ПО УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

В настоящее время применяются различные способы регулирования ССЭ, при этом многие из них основаны на принципе последовательной стыковки во времени процессов синхронизации и фазирования [8, 9] (сначала осуществляется синхронизация электропривода на заданной частоте вращения, а затем фазирование). При этом в электроприводе обеспечивается высокая точность регулирования в режимах стабилизации угловой скорости по сравнению с цифровыми электроприводами (замкнутая система автоматического регулирования – САУ), но не обеспечивается качественное регулирование в переходных режимах работы электропривода (разомкнутая САУ) при изменении задания по частоте вращения. Эти особенности не позволяют обеспечить максимально высокие динамические показатели регулирования электропривода.

Ряд способов регулирования ССЭ построен на основе организации процесса фазирования до синхронизации, что приводит к значительному улучшению динамических показателей качества регулирования [8, 10].

Для реализации этих способов необходимо непрерывно измерять угловую ошибку  $\Delta\alpha$  электропривода, что делается с помощью БОУР, и с высокой точностью измерять ошибку по угловой скорости  $\Delta\omega$ , что является одной из самых серьезных проблем регулирования электропривода [11]. Для определения ошибки по угловой скорости ССЭ в режимах разгона и торможения используется метод косвенного определения ошибки по частоте вращения, основанный на логической обработке взаимного порядка следования импульсов опорной частоты  $f_{\text{оп}}$  и частоты  $f_{\text{ос}}$  в канале обратной связи [12, 13]. Данный метод позволяет дискретно определять значение переменной состояния  $\Delta\omega$  САУ при прохождении изображающей точкой на фазовом портрете линий с координатами  $\Delta\alpha = \varphi_0/2 + n\varphi_0$ , где  $\varphi_0 = 2\pi/z$ , что соответствует прохождению двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя импульсами другой.

Проведенный в работе [13] анализ этого метода показал, что на ранних этапах разгона (торможения) электропривода рассогласование по угловой скорости определяется с недостаточной точностью. Результаты анализа приведены на рис. 2, 3 в виде зависимости относительной погрешности измерения угловой скорости от отношения угловой скорости  $\omega$  электропривода к заданному значению  $\omega_z$ . На рис. 3 показан в увеличенном масштабе отрезок графика рис. 2, соответствующий интервалу  $0,9 < \omega/\omega_z < 1,0$ . Точки на графиках соответствуют максимальной погрешности определения угловой скорости на некотором временном интервале. Эффективность применения косвенного способа определения рассогласования по угловой скорости для измере-

ния частоты вращения электропривода повышается при приближении частоты вращения вала к опорной частоте задающего сигнала.

Для высокоточного регулирования ССЭ необходимо удерживать относительную погрешность в пределах  $\pm 0,02\%$  [14]. Из рис. 3 видно, что искомая точность достигается при

$$\omega/\omega_3 = 0,98. \quad (1)$$

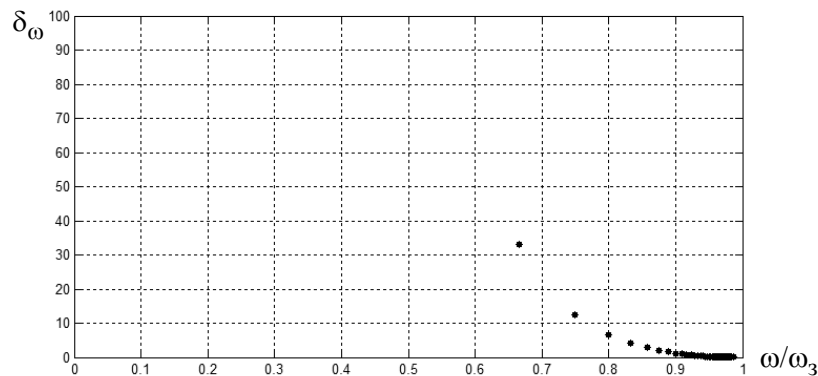


Рис. 2. Относительная погрешность измерения угловой скорости при  $n = 500$  об/мин ( $0 < \delta_\omega < 100$ ;  $0 < \omega/\omega_3 < 1$ )

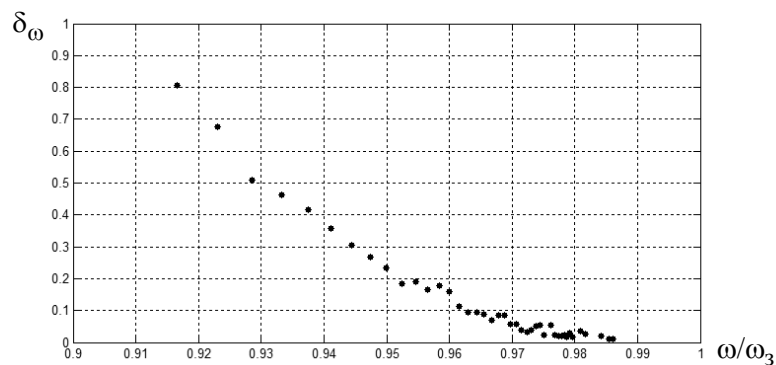


Рис. 3. Относительная погрешность измерения угловой скорости при  $n = 500$  об/мин ( $0 < \delta_\omega < 1$ ;  $0,9 < \omega/\omega_3 < 1$ )

Можно сделать вывод о целесообразности применения этого метода определения рассогласования по угловой скорости только при угловой скорости  $\omega$  электропривода, близкой к заданному значению  $\omega_3$ . Это не позволяет использовать данный метод для организации способов регулирования ЭП, представленных в работе [8].

Целью статьи является усовершенствование метода косвенного определения рассогласования по угловой скорости ССЭ.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать следующий метод определения рассогласования по угловой скорости ЭП.

Введем дополнительный сигнал с подстроечной частотой  $f_{п}$ , значение которой в начале регулирования предлагается принять равным половине минимального значения опорной частоты  $f_{оп \min}$ , соответствующей минимальной угловой скорости диапазона регулирования ЭП:

$$f_{п1} = 0,5 f_{оп \min} . \quad (2)$$

Далее для определения рассогласования по угловой скорости  $\Delta\omega$  (рис. 4) используется метод, описанный в работе [13], где искомое значение находилось по формуле

$$|\Delta\omega| = \left| \left( 2\varphi_0 - \varepsilon_m N^2 T_{оп}^2 \right) / (2NT_{оп}) \right| , \quad (3)$$

где  $N$  – количество импульсов опорной частоты между двумя последовательными ситуациями прихода двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя импульсами другой;  $T_{оп}$  – период следования импульсов опорной частоты;  $\varepsilon_m = 10 \text{ рад/с}^2$ .

Для реализации предлагаемого метода заменим опорную частоту  $f_{оп}$  на  $f_{п1}$ , тогда выражение (3) примет вид

$$|\Delta\omega_{пi}| = \left| \left( 2\varphi_0 - \varepsilon_m N_{пi}^2 T_{опп1}^2 \right) / (2N_{пi}T_{опп1}) \right| \quad (4)$$

где  $N_{пi}$  – количество импульсов подстроечной частоты  $f_{п1}$  между двумя последовательными ситуациями прихода двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя импульсами другой;  $T_{опп1}$  – период следования импульсов подстроечной частоты  $f_{п1}$ ;  $\Delta\omega_{пi}$  – рассогласование между подстроечной угловой скоростью  $\omega_{п1} = (f_{п1}2\pi)/z$  и измеряемой угловой скоростью  $\omega$

$$\Delta\omega_{пi} = \omega - \omega_{п1} . \quad (5)$$

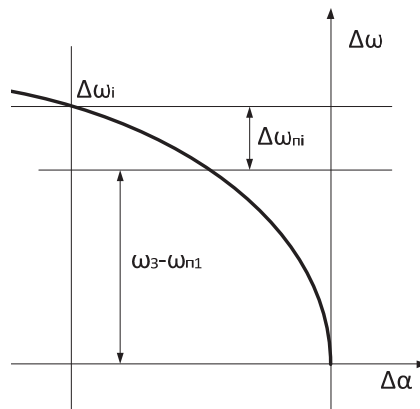


Рис. 4. Фазовый портрет разгона электропривода

Тогда рассогласование по угловой скорости будет рассчитываться по формуле

$$\Delta\omega_i = (\omega_3 - \omega_{п1}) + \Delta\omega_{пi}. \quad (6)$$

Данный расчет повторяется в момент прохождения двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя импульсами другой до тех пор, пока выполняется условие  $\omega < \omega_{п1}$ .

Чтобы установить относительную погрешность измерения  $\omega$  в пределах  $\pm 0,02\%$ , необходимо изменить частоту  $f_{п1}$  на величину  $|\Delta f_{п1}| \leq 0,02 f_{п1}$  (рис. 1), как только угловая скорость  $\omega$  ЭП достигает значения  $\omega_{п1}$ . При этом следует учитывать шаг используемого в устройстве делителя тактовой частоты. Тогда подстроечная частота на следующем этапе определения рассогласования по угловой скорости вычисляется по формуле

$$f_{п2} = f_{п1} + \Delta f_{п1}. \quad (7)$$

Для расчета  $\Delta\omega_i$  на новой подстроечной частоте и определения следующей подстроечной частоты приведем формулы (4)–(7) к общему виду:

$$|\Delta\omega_{пi}| = \left| \left( 2\varphi_0 - \varepsilon_m N_{пi}^2 T_{оппj}^2 \right) / (2N_{пi} T_{оппj}) \right|, \quad (8)$$

$$\Delta\omega_{пi} = \omega - \omega_{пj}, \quad (9)$$

$$\Delta\omega_i = (\omega_3 - \omega_{пj}) + \Delta\omega_{пi}, \quad (10)$$

$$f_{п(j+1)} = f_{пj} + \Delta f_{пj}. \quad (11)$$

Таким образом, в процессе выхода на заданную скорость для обеспечения заданной точности измерения рассогласования по угловой скорости цикл повторяется многократно (рис. 5). Расчет осуществляется по формулам (8)–(11) до тех пор, пока

$$f_{п(j+1)} < f_{оп}. \quad (12)$$

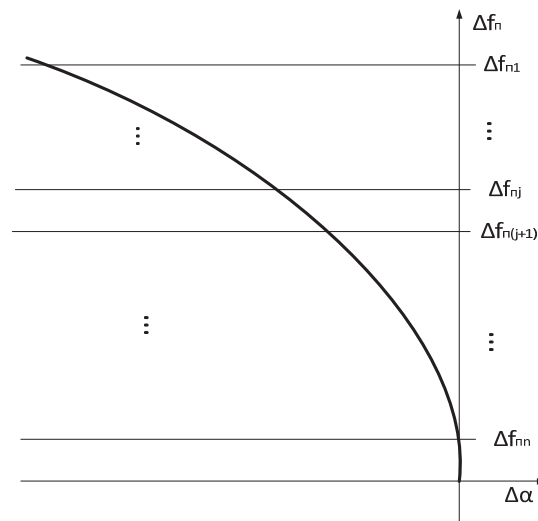


Рис. 5. Фазовый портрет разгона электропривода

Как только условие (12) перестает выполняться,  $f_{п(j+1)}$  устанавливается равным  $f_{оп}$ , после чего значение подстроечной частоты не меняется, пока  $\omega_3$  постоянно.

Описанный выше метод предлагается использовать для усовершенствования блока определения частотного рассогласования (БОЧР) в устройстве для фазирования вращающегося вала электродвигателя (рис. 6) [15].

Работа метода пояснена блок-схемой (рис. 7), где  $\omega_{3k}$  – новое значение  $\omega_3$  после изменения.

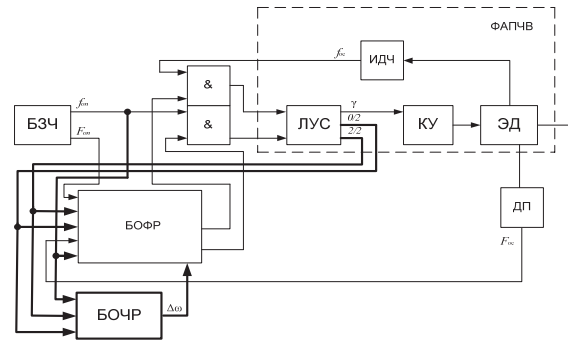


Рис. 6. Устройство для фазирования вращающегося вала электродвигателя

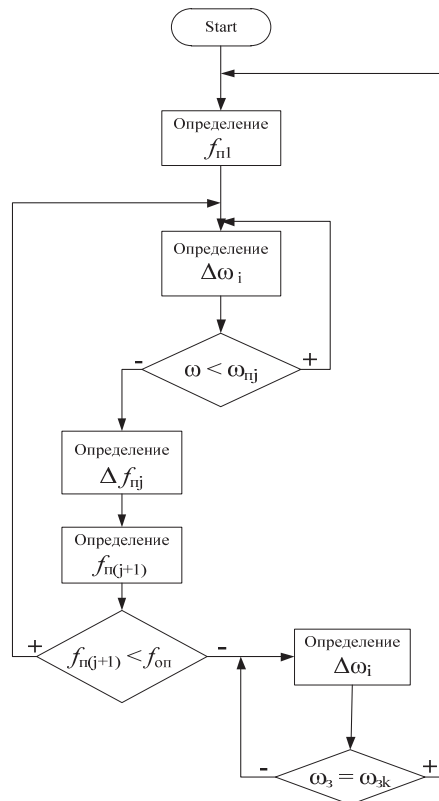


Рис. 7. Алгоритм работы итерационного метода определения рассогласования по угловой скорости с заданной точностью

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная в статье методика позволяет определять рассогласование по угловой скорости на ранних этапах разгона (торможения), что было невозможно при использовании известных ранее методов. Данный метод позволяет периодически менять значение дополнительной подстроечной частоты, соблюдая условие

$$\omega_{\Pi}/\omega_3 \geq 0,98.$$

Таким образом, сохраняется необходимое для высокоточного регулирования значение точности в пределах  $\pm 0,02\%$ .

Кроме того, в настоящий момент коллективом кафедры ведется разработка и других способов решения поставленной задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Best R.E. Phase-locked loop design, simulation and applications. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill, 2003. – P. 109–114.
2. Hsieh G.C., Hung J.C. Phase-locked loop techniques. A survey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1996. – Vol. 43, iss. 6. – P. 609–615. – doi: 10.1109/41.544547.
3. Sen P.C., Macdonald M.L. Stability analysis of induction motor drives using phase-locked loop control system // IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation. – 1980. – Vol. IECI-27, iss. 3. – P. 147–155. – doi: 10.1109/TIECI.1980.351668.
4. Prasad E.S.N., Dubey G.K., Prabhu S.S. High-performance DC motor drive with phase-locked loop regulation // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1985. – Vol. IA-21, iss. 1. – P. 192–201. – doi: 10.1109/TIA.1985.349680.
5. Трахтенберг Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с.
6. Бубнов А.В., Бубнова Т.А., Федоров В.Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: монография. – Омск: ОмГТУ, 2010. – 104 с.
7. Бубнов А.В., Чудинов А.Н. Улучшение показателей качества регулирования электропривода сканирующих систем: монография. – Омск: ОмГТУ, 2012. – 92 с.
8. Bubnov A.V., Emashov V.A., Chudinov A.N. The methods of preliminary phasing adjustment of the rotor speed and position control electric drive // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Омск: IEEE, 2014. – P. 1–4. – doi: 10.1109/Dynamics.2014.7005648.
9. Бубнов А.В., Бубнова Т.А. Способы фазирования электропривода с фазовой синхронизацией // Электротехника. – 2010. – № 5. – С. 2–8.
10. Бубнов А.В., Чудинов А.Н., Емашов В.А. Квазиоптимальный по быстродействию синхронно-синфазный электропривод для сканирующих систем: монография. – Омск: ОмГТУ, 2013. – 120 с.
11. Brock S., Zawirski K. New approaches to selected problems of precise speed and position control of drives // Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – 2012. – P. 6291–6296. – doi: 10.1109/IECON.2012.6389020.
12. 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.
13. Measurement methods for angular acceleration and errors for angular velocity of synchro-phase electric drive / A.V. Bubnov, V.A. Emashov, A.N. Chudinov, A.N. Alpysova // Measurement Technique. – 2014. – Vol. 57, iss. 8. – P. 860–865. – doi: 10.1007/s11018-014-0549-2.
14. High-quality microprocessor system for position, velocity, and acceleration measurements of electric drives / O.V. Veselov, A.V. Eremon, A.O. Veselov, A.N. Nikashkin // Measurement Technique. – 1999. – Vol. 42, iss. 4. – P. 383–389. – doi: 10.1007/BF02504401.
15. Патент 2475932, Российская Федерация, МПК H 02 P 5/52, G 05 D 13/62. Способ фазирования вращающегося вала электродвигателя и устройство для его осуществления / А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов, В.А. Емашов. – № 2011137915/07; заявл. 14.09.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.



Бубнов Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрическая техника» ОмГТУ. Основное направление научных исследований – прецизионный электропривод для сканирующих и обзорно-поисковых систем. Имеет более 170 публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: bubnov-av@bk.ru

Емашов Василий Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ. Основное направление научных исследований – прецизионный электропривод. Имеет более 30 публикаций. E-mail: jadusster@gmail.com

Четверик Алина Наилевна, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ. Основное направление научных исследований – прецизионный электропривод для сканирующих и обзорно-поисковых систем. Имеет более 20 публикаций. E-mail: alpysova.an@mail.ru

Чудинов Александр Николаевич, доцент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ. Основное направление научных исследований – прецизионный электропривод. Имеет более 40 публикаций. E-mail: chudinov\_al@mail.ru

### ***An indirect method of determining an error of the angular velocity of the electric drive based on the reference pulse signal of variable frequency\****

A.V. BUBNOV<sup>1</sup>, V.A. EMASHOV<sup>2</sup>, A.N. CHETVERIK<sup>3</sup>, A.N. CHUDINOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: bubnov-av@bk.ru

<sup>2</sup> Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation, PhD (ENG.). E-mail: jadusster@gmail.com

<sup>3</sup> Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation. E-mail: alpysova.an@mail.ru

<sup>4</sup> Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation, PhD (Eng.). E-mail: chudinov\_al@mail.ru

Nowadays electromechanical laser scanning systems are widely used in the fields of: real object 3D-modelling for various industries, terrain scanning, etc. It is reasonable to create an electromechanical scan unit of such systems based on the PLL servodrive which provides precise rotor velocity and position control in the angular velocity stabilization mode. It is necessary to change the angular velocity periodically in some applications. In this case, there are losses of information in the scanning system during the transient process of adjusting the rotation frequency reference signal change. To reduce information losses it is required to use more sophisticated control methods which are only possible with a high-precision measurement of electric drive dynamic parameters. In this paper we describe a new method for indirect determination of the error in the actuator frequency of rotation in the operating modes with maximum acceleration during acceleration and braking. The indirect measurement methods available do not allow us to estimate the error of the rotation frequency of the synchronously-inphase electric drive with high accuracy at early stages of acceleration (deceleration) of the drive. Methods of direct measurement are either quite difficult to implement (they are more expensive) or do not provide the required measurement accuracy when the actuator angular velocity is approaching the specified one. This paper proposes a method of indirect determination of the error in the actuator rotation frequency which consists in the logical processing of the sequence order of pulses from the output of the electric drive speed sensor and additional pulses of a pulse signal whose frequency is changed (adjusted) when the actuator angular velocity approaches the specified one. This method allows providing the specified sufficiently precise determination of the error in the angular velocity in most parts of the drive acceleration (deceleration) sections.

---

\* Received 15 June 2015.

**Keywords:** Synchronously-inphase electric drive; phase locked loop; angular velocity; precision electric drive; misalignment; specified accuracy; control system, indirect measurement, pulse speed sensor

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-4-118-127

## REFERENCES

1. Best R.E. *Phase-locked loop design, simulation and applications*. 5th ed. New York, McGraw-Hill, 2003, pp. 109–114.
2. Hsieh G.C., Hung J.C. Phase-locked loop techniques. A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, vol. 43, iss. 6, pp. 609–615. doi: 10.1109/41.544547
3. Sen P.C., Macdonald M.L. Stability analysis of induction motor drives using phase-locked loop control system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, 1980, vol. IECI-27, iss. 3, pp. 147–155. doi: 10.1109/TIECI.1980.351668
4. Prasad E.S.N., Dubey G.K., Prabhu S.S. High-performance DC motor drive with phase-locked loop regulation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, vol. IA-21, iss. 1, pp. 192–201. doi: 10.1109/TIA.1985.349680
5. Trakhtenberg R.M. *Impul'snye astaticheskie sistemy elektroprivoda s diskretnym upravleniem* [Pulsed astatic discrete controlled electric drive systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 168 p.
6. Bubnov A.V., Bubnova T.A., Fedorov V.L. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya teorii sin-khronno-sinfaznogo elektroprivoda* [High precise electric drive theory current state and development perspectives: monograph]. Omsk, OmSTU Publ., 2010. 104 p.
7. Bubnov A.V., Chudinov A.N. *Uluchshenie pokazatelei kachestva regulirovaniya elektroprivoda skaniruyushchikh sistem* [The quality indicators improving for the scanning systems electric drive]. Omsk, OmSTU Publ., 2012. 92 p.
8. Bubnov A.V., Emashov V.A., Chudinov A.N. The methods of preliminary phasing adjustment of the rotor speed and position control electric drive. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, IEEE, 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/Dynamics.2014.7005648
9. Bubnov A.V., Bubnova T.A. Sposoby fazirovaniya elektroprivoda s fazovoi sinkhronizatsiei [Methods of phasing electric drive with phase lock]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2010, no. 5, pp. 2–8. (In Russian)
10. Bubnov A.V., Chudinov A.N., Emashov V.A. *Kvazioptimal'nyi po bystrodeistviyu sinkhronno-sinfaznyi elektroprivod dlya skaniruyushchikh sistem* [Quasi-optimal in performance high-precision electric drive for scanning systems: monograph]. Omsk, OmSTU Publ., 2013. 120 p.
11. Brock S., Zawirski K. New approaches to selected problems of precise speed and position control of drives. *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 6291–6296. doi: 10.1109/IECON.2012.6389020
12. Bubnov A.V., Emashov V.A., Chudinov A.N. Sposob kosvennogo opredeleniya oshibki po chastote vrashcheniya v elektroprivode s fazovoi sinkhronizatsiei v rezhime nasyscheniya logicheskogo ustroystva sravneniya [The method of indirect determination of rotational frequency error in electric drive with phase lock in saturation mode of logical somparator]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2011, no. 1, pp. 99–103.
13. Bubnov A.V., Emashov V.A., Chudinov A.N., Alpysova A.N. Measurement methods for angular acceleration and errors for angular velocity of synchrophase electric drive. *Measurement Technique*, 2014, vol. 57, iss. 8, pp. 860–865. doi: 10.1007/s11018-014-0549-2. Translated from *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2014, no. 8, pp. 13–16.
14. Veselov O.V., Eremon A.V., Veselov A.O., Nikashkin A.N. High-quality microprocessor system for position, velocity, and acceleration measurements of electric drives. *Measurement Technique*, 1999, vol. 42, iss. 4, pp. 383–389. doi: 10.1007/BF02504401. Translated from *Izmeritel'naya Tekhnika*, 1999, no. 4, pp. 51–55.
15. Bubnov A.V., Emashov V.A., Chudinov A.N. *Sposob fazirovaniya vrashchayushchegosya vala elektrodvigatelya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Electric drive rotating shaft phasing method and device for it's implementation]. Patent RF, no. 2475932, 2013.