

УДК 681.5

DOI 10.52167/1609-1817-2023-124-1-230-236

Калабаева А.¹, Вуйчик В.², Кашаганова Г.³, Тогжанова К.⁴ Сарыбаева Ж.¹

¹ Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

² Люблинский технический университет, Люблин, Польша

³ Университет Туран, Алматы, Қазақстан

⁴ Алматинский технологический университет, Алматы, Қазақстан

E.mail: a.kalabaeva@list.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗГОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. Выполнены экспериментальные исследования для адаптивной системы автоматического управления разгонными характеристиками ЭМП, позволяющее осуществлять высокоточное измерение угловых скоростей ЭМП, идентифицировать значения моментов инерции и сопротивления, а также проводить автоматическую синхронизацию в условиях отклонения как значений моментов, так и значений частоты вращения, ведомого ЭМП от ведущего ЭМП. Также проведены экспериментальные исследования разгонных характеристик двух синхронно вращающихся ЭМП, которые подтверждают справедливость разработанных теоретических и практических предложений, а также работоспособность построенной САУ асинхронностью вращения ЭМП.

Ключевые слова. Электромеханические преобразователи, адаптивная система, системы автоматического управления, разгонные характеристики, идентификация.

Введение.

Разработка и исследование системы автоматического управления электромеханическими преобразователями (ЭМП), позволяющей получить своевременную и достоверную информацию о частотах вращения и фактическом состоянии (идентификации) параметров ЭМП, является одним из компонентов стратегии повышения эффективности промышленных технологических комплексов, снижения затрат на их обзор в процессе эксплуатации. Очень часто в технических системах возникает необходимость в автоматическом управлении частотами вращения ЭМП, а также необходимость в точной синхронизации частот вращения роторов нескольких ЭМП, например, при прокате металлов или обдирке алмазов. При этом от точности синхронизации частот вращения роторов нескольких ЭМП очень сильно зависит качество производимой продукции. Современный уровень вычислительных средств позволяет более полно реализовать естественную потенциально высокую информативность о параметрах ЭМП, что раскрывает дополнительные возможности в создании новых методов и алгоритмов идентификации параметров ЭМП, преобразования частот вращения роторов ЭМП, методов обработки информации и подходов в проектировании САУ.

Материалы и методы.

Экспериментальные исследования угловых скоростей ведущего и ведомого ЭМП измеряемых с использованием ТП с возможностью изменения режимов работы в зависимости от значений частот вращения (низких, средних, высоких), а также их асинхронности вращения при работе на различных частотах вращения приведены в таблице 1.1.

Графические представления трех независимых экспериментальных исследований синхронизации частот вращения ЭМП в зависимости от заданных частот вращения приведены на рисунке 1.1.

Проведённые экспериментальные исследования разгонных характеристик двух синхронно вращающихся ЭМП, которые приведенные в таблице 1.1 и изображены на рисунке 1.1 свидетельствуют о том, что асинхронность вращения в диапазоне работы от 0 до 110 Гц изменяется хаотично (случайным образом), причем на нижних частотах она имеет меньшее значение, а на максимальных частотах – появляется тенденция к ее увеличению. В общем, можно считать, что асинхронность вращения ЭМП изменяется незначительно, то есть адаптивный алгоритм синхронизации частот вращения с наблюдающим средством идентификации достаточно быстро справляется с возникающей асинхронностью за счет использования разработанного высокоточного ТП, который позволяет менять режимы работы в зависимости от диапазона изменения угловых скоростей.

Таблица 1.1 – Экспериментальные исследования асинхронности вращения ЭМП

Задана частота, Гц	Частота вращения ЭМП, об/ мин.		Асинхронность вращения ЭМП, об/мин.
	Ведущего	Ведомого	
5	210	211	-1
10	520	522	-2
15	689	688	-4
20	1100	1105	-5
25	1410	1405	+5
30	1695	1705	+10
35	2000	2007	+7
40	2400	2410	-10
45	2510	2516	-6
50	2800	2793	+7
55	3200	3211	-11
60	3455	3447	+8
65	3720	3708	+12
70	4040	4055	-15
75	4210	4196	+14
80	4450	4434	+16
85	4780	4795	-15
90	4925	4943	-18
95	5265	5245	+20
100	5520	5542	-22
105	5676	5650	+26
110	5993	5968	+25

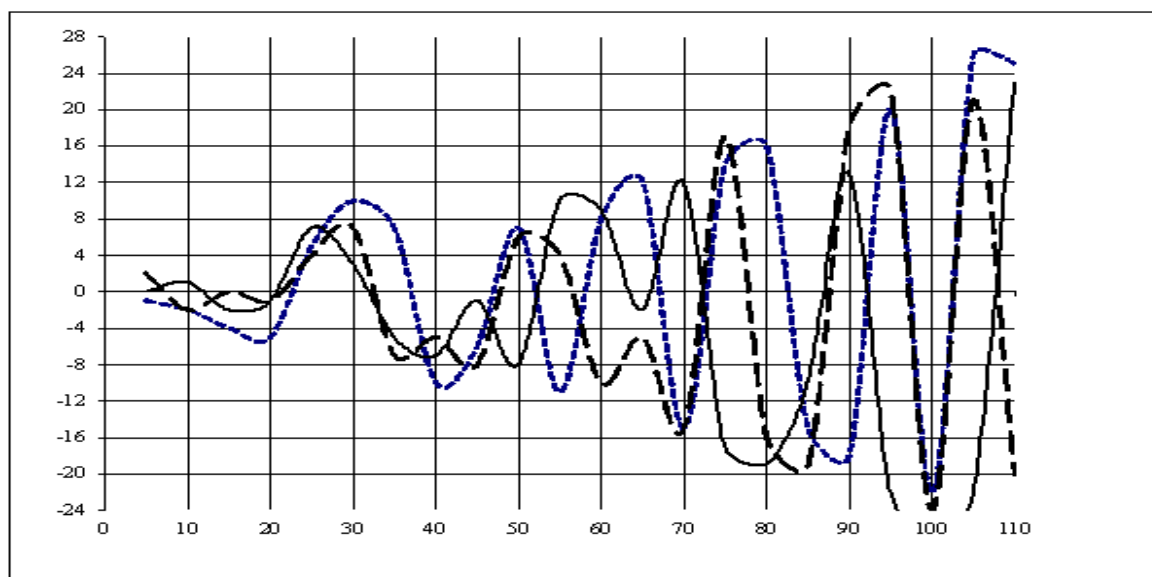


Рисунок 1.1 – Экспериментальные исследования работы САУ ЭМП на разных частотах

Максимальный диапазон изменения частот вращения ЭМП не может превышать 6000 об/мин (так как дальше идет провал моментной характеристики, а также резкий износ подшипниковых узлов), а проведенные многократные измерения (1000 измерений) асинхронности вращения ЭМП на максимальной угловой скорости (6000 об/мин), показали, что максимальная абсолютная асинхронность (разность между разгонными характеристиками ЭМП) не превышает 28 об/мин. Поэтому можно считать, что экспериментальная погрешность синхронизации в диапазоне работы от 0 до 6000 об/мин составляет:

$$\gamma = (|\Delta_{max}|/N_{max}(28/6000)) \cdot 100\% = 0,47\%. \quad (1.1)$$

Проанализировав полученные экспериментальные данные разгонных характеристик ЭМП при их автоматической синхронизации можно сделать выводы о том, что асинхронность вращения роторов ЭМП является периодически-нестационарной, т.е. их статические характеристики изменяются в диапазоне изменения угловых скоростей, характеризующемся инерционными процессами в ЭМП. Также можно сказать, что экспериментальные исследования неплохо совпадают с результатами математического моделирования, проведенного в разделе 2. Погрешность синхронизации угловых скоростей в соответствии с экспериментальными данными не превышает 0,47%, что при изменении частот вращения от 0 до 6000 об/мин в 3 – 4 раза точнее по сравнению с известными САУ ЭМП.

Экспериментальные исследования погрешностей измерения угловой скорости.

Экспериментальные исследования погрешностей измерения угловых скоростей проводились на частотах вращения 1000, 3000, 6000 об/мин, которые задавались с помощью частотных регуляторов. В ходе экспериментальных исследований погрешности измерения угловой скорости в качестве образцового средства измерения первого разряда был использован электронный тахометр 7ЕЗ. Основные характеристики ЧП, следующие: диапазон воспроизведения частоты вращения – 0...500 Гц, относительная погрешность воспроизведения частоты вращения не превышает 0.02%.

Эксперимент проводился по следующим условиям: воспроизводимая угловая скорость высоко стабильна, поэтому $|\varepsilon_{MAX}| \approx 0$; изменение шага квантования происходило

программном путём пропуска полученных значений исходного кода АЦП; АЦП запускается МК с частотой кварцевого резонатора 8000 кГц; законы распределения получены на основе серии из 1000 измерений.

Экспериментально полученные законы распределения при изменении угловой скорости не различаются между собой, их графики при различных значениях шага квантования приведены на рисунке 1.2. Экспериментальные значения среднеквадратических отклонений погрешности измерения угловой скорости приведены в таблице 1.2.

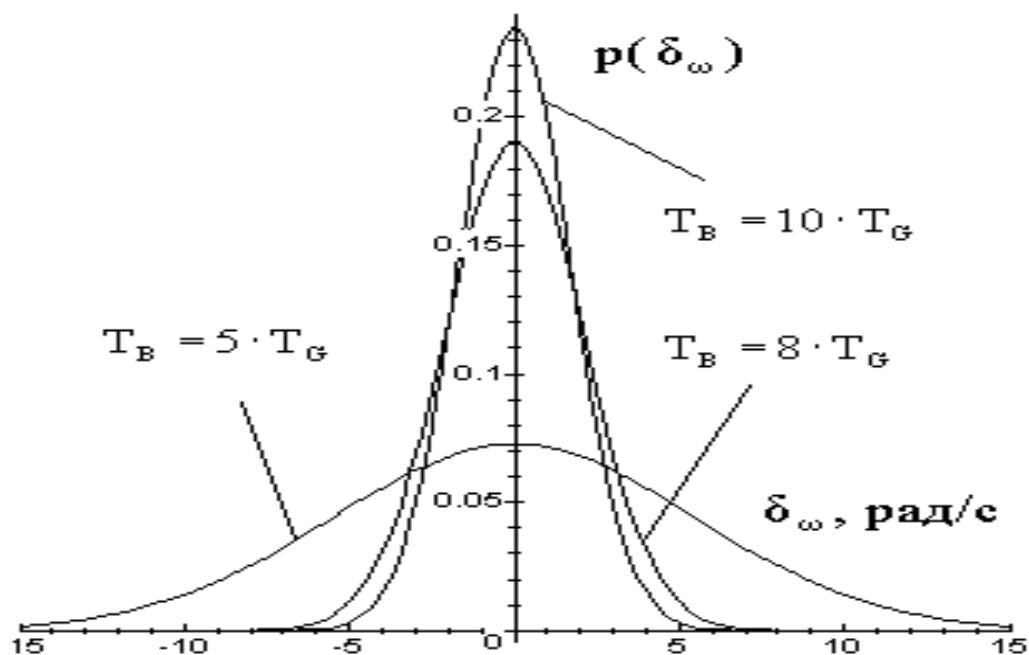


Рисунок 1.2 – Экспериментально полученные законы распределения погрешности измерения угловой скорости при разных значениях шага дискретизации

Таблица 1.2 - СКВ погрешности измерения угловой скорости

Период дискретизации	Среднеквадратическое отклонение
$5 \cdot T_G$	5.5246 рад/с
$8 \cdot T_G$	2.1113 рад/с
$10 \cdot T_G$	1.7234 рад/с

Поскольку погрешность квантования АЦП по сравнению с погрешностью ТП настолько мала, что ею можно пренебречь, то точность ИК угловой скорости в первую очередь будет выражаться точностью первичного измерительного преобразователя [69-74]. Поэтому, анализируя экспериментально полученные законы распределения, изображенные на рисунке 1.2 можно сделать выводы о том, что с увеличением времени измерения на одной и той же частоте, уменьшается вероятность появления больших погрешностей, то есть уменьшается СКВ.

Результаты.

Оценка неопределенности результатов измерения при автоматическом управлении асинхронностью вращения, в результате чего установлено, что расширенная неопределенность асинхронности вращения ЭМП находится в пределах от 0.7 до 18

об/мин, то есть составляет ± 9 об/мин, а относительная расширенная неопределенность не превышает 0.3%. Проведенные исследования подтверждают то, что разработанный алгоритм адаптивной синхронизации угловых скоростей ЭМП при отклонении электромагнитных и механических параметров от норм автоматически изменяет (перенастраивает) коэффициенты ПИД-регулятора, то есть адаптируется. Наблюдающее средство идентификации, которое воспроизводит переменные состояния параметров ЭМП, также идентифицирует внешние воздействия и неизвестные параметры ЭМП, которые не подлежат прямым измерениям. Наблюдающее средство идентификации выполнено с самонастройкой по идентифицируемым параметрам за счет ввода интеграторов, входные сигналы которых представляют собой разность измеренных и оцененных значений переменных составляющих ЭМП. Такие адаптивные алгоритмы управления параметрами удобны в тех случаях, когда нужный параметр нестационарного объекта нужно непрерывно подстраивать путем изменения передаточного коэффициента системы.

Обсуждение.

Проведенные экспериментальные исследования разгонных характеристик ЭМП подтверждают справедливость разработанных теоретических и практических предложений, а также работоспособность построенной САУ асинхронностью вращения ЭМП.

Заключение.

Экспериментальные исследования отклонений разгонных характеристик во время синхронизации ЭМП и установлено, что разгонные характеристики при измерении на одних и тех же частотах, в разные моменты времени меняется случайным образом. Проведенные многократные исследования асинхронности вращения показали, что максимальная асинхронность вращения при автоматическом управлении не превышает 0,4% в диапазоне изменения частот вращения от 0 до 6000 об/мин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лассан В. Л. Измерение угловых скоростей. – М.: Машиностроение, 1969. – 28 с.
- [2] Monteiro M. et al. Angular velocity and centripetal acceleration relationship // Smartphones as Mobile Minilabs in Physics. – Springer, Cham, 2022. – С. 107-111.
- [3] Андрощук В.В. Анализ погрешностей цифровых тахометров // Измерительная техника. – 1979. – №7. – С. 32-34.
- [4] Kavanagh R. C. Improved digital tachometer with reduced sensitivity to sensor nonideality //IEEE transactions on industrial electronics. – 2000. – Т. 47. – №. 4. – С. 890-897.
- [5] Galvan E., Torralba A., Franquelo L. G. ASIC implementation of a digital tachometer with high precision in a wide speed range //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1996. – Т. 43. – №. 6. – С. 655-660.
- [6] Lee H. W., Huang, K. Y., Peng, H. T., & Liu, C. H. A real time error measuring device for meso-scale machine tools //Sensors and Actuators A: Physical. – 2016. – Т. 244. – С. 213-222.
- [7] Аксененко М. Д., Баранчиков М. Л. Приемники оптического излучения: Справочник. - М.: Радио и связь, 1987. - 296 с.
- [8] Справочник по приемникам оптического излучения / В.А. Волков, В.К. Вялов, Л.Г. Гассанов и др.; Под. Ред. Л.З. Криксунова и Л.С. Кременчугского. - К.: Техніка, 1985. - 216 с.

- [9] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – Geneva: ISO, 1993. – 101 p.
- [10] ISO/IEC, GUIDE 98-3:2008(E), "Uncertainty of Measurement—Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", 2012.
- [11] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement—Part 6: Developing and Using Measurement Models, Paris, France, 2020.
- [12] Giacomo P. The expression of Experimental Uncertainties (Recommendation INC-1), BIMP // Metrologia. – 1981. - №11. – P. 73.
- [13] МИ 2552-99. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». – Санкт-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999. – 27 с.

REFERENCES*

- [1] Lissan V. L. Izmerenie uglovyh skorostej. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 28 s.
- [3] Androshhuk V.V. Analiz pogreshnostej cifrovyyh tahometrov // Izmeritel'naja tehnika. – 1979. – №7. – S. 32-34.
- [7] Aksenenko M. D., Baranochnikov M. L. Priemniki opticheskogo izlucheniya: Spravochnik. - M.: Radio i svjaz', 1987. - 296 s.
- [8] Spravochnik po priemnikom opticheskogo izlucheniya / V.A. Volkov, V.K. Vjalov, L.G. Gassanov i dr.; Pod. Red. L.Z. Kriksunova i L.S. Kremenchugskogo. - K.: Tehnika, 1985. - 216 s.
- [13] МИ 2552-99. GSI. Primenenie «Rukovodstva po vyrazheniju neopredelennosti izmerenij». – Sankt-Peterburg: VNIIM im. D.I. Mendeleeva, 1999. – 27 s.

Айдана Калабаева, докторант, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, a.kalabaeva@list.ru

Вальдемар Вуйцик, т.ғ.д., профессор, Люблин техникалық университеті, Люблин, Польша, waldemar.wojcik@pollub.pl

Гулжан Кашаганова, PhD, Тұран Университеті, Алматы, Қазақстан, guljan_k70@mail.ru

Күлжан Тогжанова, PhD, доцент, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, togzhanova_kuljan@mail.ru

Жаксыгул Сарыбаева, ф-м.ғ.к., ассистент-профессор, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, zh.sarybaeva@alt.edu.kz

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКАЛЫҚ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРДІҢ ҮДЕТКІШ СИПАТТАМАЛАРЫН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. ЭМТ-дің үдеткіш сипаттамаларын автоматты басқарудың адаптивті жүйесі үшін эксперименттік зерттеулер жүргізілді, бұл ЭМТ-дің бұрыштық жылдамдықтарын жоғары дәлдікпен өлшеуге, инерция мен қарсылық моменттерінің мәндерін анықтауға, сондай-ақ момент мәндерінің де, айналу жиілігінің мәндерінің де ауытқуы жағдайында автоматты синхрондауды жүргізуге мүмкіндік береді. жетекші ЭМТ-ден басқарылатын электромеханикалық түрлендіргіштер. Сондай-ақ, екі синхронды айналатын ЭМТ-дің үдеткіш сипаттамаларына эксперименттік зерттеулер жүргізілді, олар әзірленген теориялық және практикалық ұсыныстардың дұрыстығын, сондай-ақ ЭМТ-дің айналу асинхрондылығын автоматты басқару жүйелерінің жұмыс қабілеттілігін растайды.

Түйінді сөздер. Электромеханикалық түрлендіргіштер, адаптивті жүйе, автоматты басқару жүйелері, үдеткіш сипаттамалары, сәйкестендіру.

Aidana Kalabaeva, doctoral student, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, a.kalabaeva@list.ru

Waldemar Wojcik, doctor of Technical Sciences, professor, Lublin Technical University, Lublin, Poland, waldemar.wojcik@pollub.pl

Gulzhan Kashaganova, PhD, Turan University, Almaty, Kazakhstan, guljan_k70@mail.ru

Kulzhan Togzhanova, PhD, docent, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, togzhanova_kuljan@mail.ru

Zhaksygul Sarybayeva, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, zh.sarybaeva@alt.edu.kz

EXPERIMENTAL STUDIES OF ACCELERATION CHARACTERISTICS OF ELECTROMECHANICAL CONVERTERS

Annotation. Experimental studies have been carried out for an adaptive automatic control system for the acceleration characteristics of EMC, which allows for high-precision measurement of the angular velocities of EMC, identification of the values of moments of inertia and resistance, as well as automatic synchronization under conditions of deviation of both the values of moments and the values of the rotational speed of the driven EMC from the leading EMC. Experimental studies of the acceleration characteristics of two synchronously rotating EMC have also been carried out, which confirm the validity of the developed theoretical and practical proposals, as well as the operability of the built automatic control systems for asynchronous rotation of EMC.

Keywords. Electromechanical converters, adaptive system, automatic control systems, acceleration characteristics, identification.
