

**О. С. НАЗАРОВА, В. В. ОСАДЧИЙ, І. А. МЕЛЕШКО, М. О. ОЛЕЙНИКОВ**

### **ІДЕНТИФІКАЦІЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ПРИ ЗАВАДАХ В ОПТИЧНІЙ СИСТЕМІ ЕНКОДЕРА**

Одними із найбільш вживаних давачів цифрових систем автоматичного керування швидкістю є енкодери. Завади в оптичній системі енкодера можуть призвести до некоректного вихідного сигналу і раптової зупинки робочого органу. Ідентифікація кутової швидкості при завадах в оптичній системі енкодера може продовжити його роботу для коректного завершення робочого циклу, що допоможе зменшити матеріальні збитки та запобігти ряду аварій наслідок раптової зупинки технологічного процесу.

**Ключевые слова:** ідентифікація, кутова швидкість, оптична система, енкодер, мікроконтролер, система автоматичного керування.

**Е. С. НАЗАРОВА, В. В. ОСАДЧИЙ, И. А. МЕЛЕШКО, Н. А. ОЛЕЙНИКОВ**

### **ИДЕНТИФИКАЦИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПРИ ПОМЕХАХ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЭНКОДЕРА**

Одними из наиболее распространенных датчиков цифровых систем автоматического управления скоростью является энкодеры. Помехи в оптической системе энкодера могут привести к некорректному выходному сигналу и внезапной остановки рабочего органа. Идентификация угловой скорости при помехах в оптической системе энкодера может продлить его работу для корректного завершения рабочего цикла, поможет уменьшить материальный ущерб и предотвратить ряд аварий вследствие внезапной остановки технологического процесса.

**Ключові слова:** ідентифікація, углова швидкість, оптична система, енкодер, мікроконтролер, система автоматичного управління.

**O. S. NAZAROVA, V. V. OSADCHYY, I. A. MELESHKO, M. O. OLEINIKOV**

### **IDENTIFICATION OF ANGULAR VELOCITY AT INTERFERENCES IN THE OPTICAL ENCODER SYSTEM**

One of the most commonly used digital speed control digital encoders is encoders. Obstacles in the optical system of the encoder can lead to an incorrect output signal and a sudden stop of the working body. The identification of the angular velocity at interferences in the optical encoder system can extend its work for the correct completion of the working cycle, which will help reduce material losses and prevent a number of accidents result-ing from the sudden stop of the technological process. The hardware part in the form of a laboratory stand for conducting a physical experiment was developed; program part for identifying angular velocity at interferences in the optical encoder system; the adequacy of the identification algorithm has been checked. An algorithm for identifying angular velocity in the presence of interference in the optical encoder system is re-installed on a specially designed laboratory stand. The conducted studies have shown that the error between the results of the work of the damaged and normal encoders does not exceed 1%. The proposed software and hardware complex for the investigation of encoder signals can be used in the laboratory practice of disciplines related to metrology, information and measurement systems, as well as with systems of automatic control of technological processes.

**Keywords:** identification, angular velocity, optical system, encoder, microcontroller, automatic control system.

**Вступ.** Вимірювання швидкості обертання виконавчих механізмів або їх позиціонування відносно початкового положення шляхом визначення кутового положення вала двигуна або осі обертання є однією з найбільш розповсюджених задач при розробці та дослідженні систем автоматизації. На сьогодні у різних галузях промисловості існує досить велика кількість цифрових систем автоматичного керування (САК) швидкістю виконавчого механізму [1, 2]. Для якісної роботи цих систем необхідно мати коректні дані про частоту обертання. Найбільш розповсюдженим давачем у таких системах є інкрементний енкодер. У разі його пошкодження технологічний процес буде порушено, що може призвести до аварій і значних матеріальних збитків. Тому розробка методу ідентифікації кутової швидкості при завадах у оптичній системі енкодера, що дозволить завершити певний етап технологічного процесу у робочому режимі, уникнувши аварії, є актуальною.

В залежності від технологічних потреб для вимірювання частоти обертання використовують абсолютні та інкрементні оптичні енкодери. Останні доречні у тому випадку, коли збереження абсолютного кутового положення вала при відключенні живлення не потріб-

не. До основних переваг цих енкодерів відносяться також їхня простота, надійність і відносно низька вартість. Відомі декілька видів причин виходу з ладу енкодерів [3]. По-перше, знос підшипників, що викликаний не відповідністю умов використання, наприклад, високим рівнем вібрації, перевищенням допустимої кутової швидкості та терміну служби. По-друге, збій в електричній системі. По-третє, збій в оптичній системі, передумовами якого є, наприклад, внутрішнє забруднення і невідповідність температурному режиму експлуатації. Ця робота присвячена зменшенню впливу завад в оптичній системі енкодера на точність ідентифікації кутової швидкості.

Більша частина досліджень роботи енкодерів спрямована на підвищення їх якісних характеристик [4], ідентифікацію напрямку обертання та знаходження кількісних показників частоти обертання за допомогою математичної моделі інкрементного енкодера [5]. Для підвищення точності вимірювань проводять додаткову обробку даних: при підрахунку реєструють зміну сигналу як по передньому, так і по задньому фронту для різних комбінацій сигналів енкодера за допомогою блоків високошвидкісних лічильників ПЛК і користувацьких програм [6]; визначають систематичні

похибки при вимірюванні частоти обертання та вводять у програму коефіцієнти поправки [7].

Досліджено точність методу визначення фази з індукційного датчика кута повороту залежно від розрядності вхідних цифрових даних, які отримані з датчика за допомогою аналого-цифрового перетворювача [8]. Але без належної уваги залишилися питання ідентифікації кутової швидкості при раптовій появі завад у оптичній системі енкодера, що спричиняє матеріальні і технологічні складності, пов'язані з виходом з ладу енкодера та пошуку шляхів виходу із таких ситуацій.

**Мета роботи** – підвищення точності ідентифікації кутової швидкості при завадах в оптичній системі інкрементного енкодера, що дозволить подовжити час використання цих енкодерів для коректного завершення робочого циклу.

Завдання дослідження: розробка апаратної частини у вигляді лабораторного стенда для проведення фізичного експерименту; розробка програмної частини для ідентифікації кутової швидкості при завадах в оптичній системі енкодера; перевірка адекватності алгоритму ідентифікації.

**Матеріали і результати дослідження.** Одним з проявів завад у оптичній системі енкодера є пропуск частини імпульсів, що призводить до зменшення результату вимірювання кутової швидкості відносно істинного значення при класичному методі її вимірювання. В той же час пропуск імпульсів призводить до зміни періоду деяких з них та появи періодичності у сигналі з енкодера, що може бути використано для опосередкованого вимірювання кутової швидкості через період обертання валу енкодера.

Опосередковані вимірювання – вимірювання, при яких шукане значення величини знаходять на підставі відомої функціональної залежності між цією величиною та вихідними величинами, що оцінюються прямими вимірюваннями. Опосередковані вимірювання переважно виконують у разі, якщо не існує засобів прямого вимірювання величини або немає доступу до величини, щоб здійснити прямі вимірювання, а також у разі, якщо навіть існують засоби прямого вимірювання, однак якість результату може бути низькою.

Вибір методів збору та обробки даних спостережень в значній мірі залежить від того, яке фізичне явище досліджується та від мети яка досягається обробкою [9]. Однак в загальному виді виділяють такі основні етапи: збір даних; реєстрація (в тому числі передача); попередня обробка; оцінка основних властивостей; аналіз; побудова моделі; використання моделі. Кожний з цих етапів потребує виконання послідовності операцій, яка зображена на рис. 1. При зборі даних використовуються первинні вимірювальні перетворювачі, які перетворюють енергію з однієї форми в іншу. Після цього відбувається реєстрація даних, тобто запис отриманих значень величин на носій.

Етап підготовки даних (попередня обробка) до детального аналізу включає: редагування – виключення аномальних сигналів, зниження рівня шумів та інше; перетворення з аналогової форми подання в цифрову.

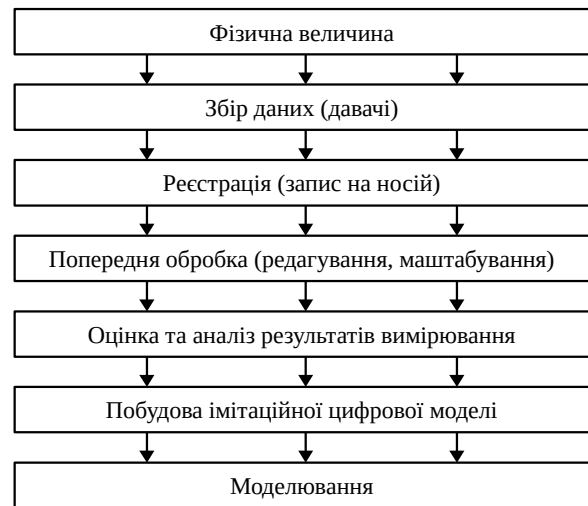


Рисунок 1 – Основні етапи збору та обробки даних спостережень стану об'єкту

Побудова імітаційної моделі на комп'ютері та її використання, дозволяє досліджувати алгоритми обробки вимірювальної інформації, тестувати системи автоматичного керування, при цьому не зашкоджуючи здоров'ю та життю людини [10].

Для реалізації мети дослідження було розроблено лабораторний стенд [11] (рис. 2), що являє собою розгорнуту будову енкодера.

Диск приводиться у рух за допомогою двигуна (Д) постійного струму RF-300CA-181 5,9В, який живиться від блока живлення (БЖ) HY1502D 0-15В, 0-2А. На валу двигуна встановлений тримач для CD-диску. На диску зображено решітку, за допомогою якої встановлюється відповідна помилка у оптичній системі енкодера. При його обертанні датчик реєструє кожну риску на диску та посилає сигнал до мікроконтролера (МК) ADuC841. Після чого отримані дані обробляються на персональному комп'ютері (ПК). Слід зазначити, що змінюючи CD-диски, які мають різне розташування міток, можна емулювати відповідні пошкодження в оптичній системі інкрементного енкодера.

Відомо, що на виході інкрементного енкодера є два сигнали у вигляді імпульсних послідовностей, які зміщені одна відносно одної за фазою. На підставі вказаних сигналів система керування розраховує частоту та напрям обертання валу. Сигнали на виході енкодера при обертанні валу в одному напрямку і в протилежному напрямку показані на рис. 3.

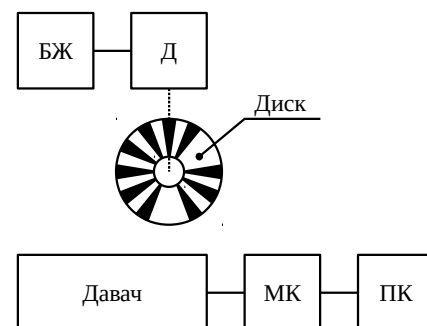


Рисунок 2 – Структурна схема стенду

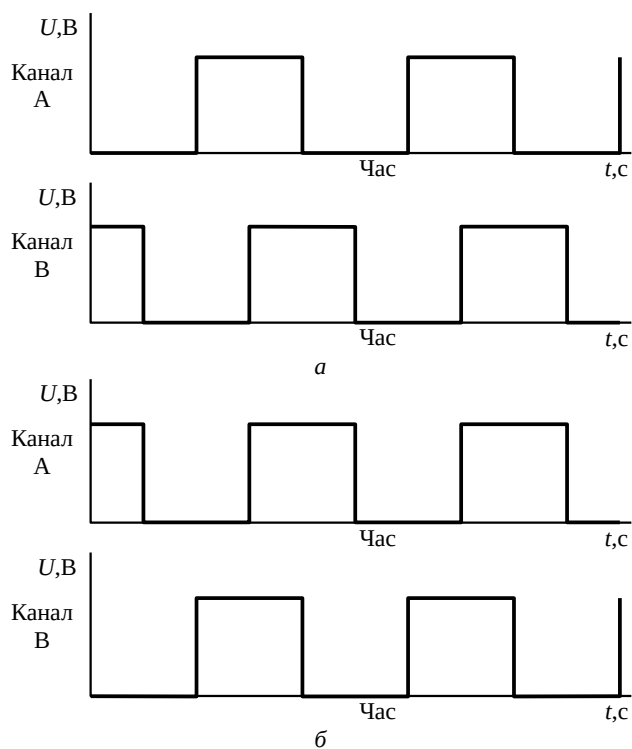


Рисунок 3 – Умовне зображення сигналу на виході енкодера:  
(а) при обертанні вала в одному напрямку,  
(б) в протилежному напрямку

При виникненні завад в оптичній системі сигнал на виході пошкодженого енкодера відрізняється від сигналу справного енкодера (рис. 3). Наприклад, втрача окремого імпульсу сигналу В (рис. 4).

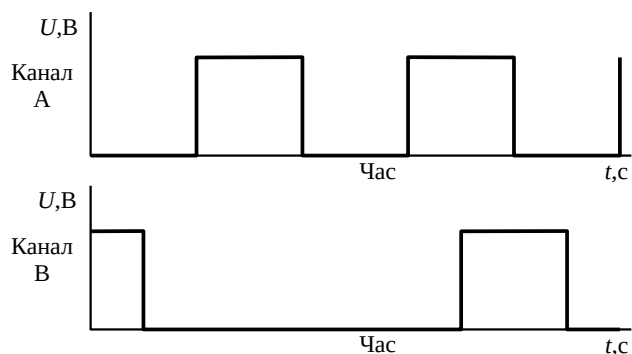


Рисунок 4 – Умовне зображення сигналу з деякою помилкою в каналі В

В ході дослідження з використанням розробленого стенда [12] двигун, відповідно для трьох фізичних експериментів, живився напругами  $U = 2В, 2,5В, 3В$ . Сигнали з датчика у результаті обробки мікроконтролером перетворюються у значення проміжків часу між сусідніми імпульсами (рис. 5).

Вказані значення надходять до персонального комп'ютера через USB-інтерфейс і зберігаються у вигляді електронних таблиць Microsoft Excel. Цим масивам даних присвоюються змінні –  $v2, v25, v3$ , кількість точок кожного масиву –  $i = 1 \dots 150$  (рис. 5).

Далі ці масиви даних впроваджуються у середовище Mathcad і будуються три графіка сигналів з датчика (рис. 6).

	1		1		1
1	60	16	60	31	59
2	60	17	58	32	60
3	59	18	60	33	63
4	60	19	63	34	60
5	63	20	61	35	66
6	60	21	66	36	63
7	66	22	63	37	131
8	63	23	131	38	193
9	131	24	192	39	63
10	193	25	63	40	65
11	63	26	65	41	65
12	65	27	65	42	129
13	65	28	129	43	59
14	127	29	59	44	60
15	61	30	60	45	58
16	...	31	...	46	...

Рисунок 5 – Дані зі стенду для напруги 2В

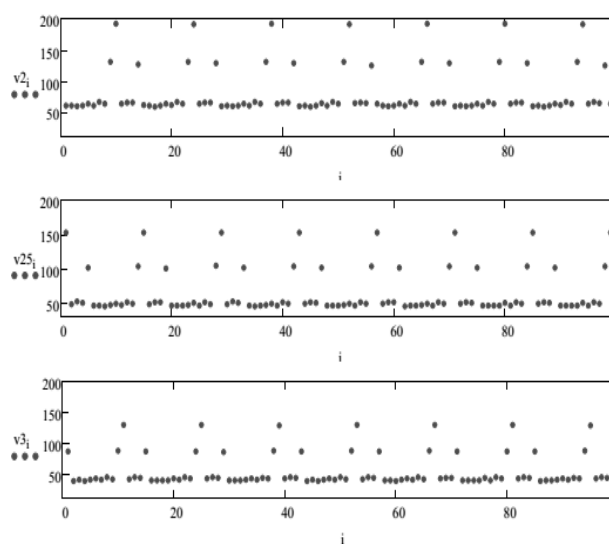


Рисунок 6 – Графіки періодів імпульсів для напруг 2В, 2,5В та 3В.

Для виявлення періодичності сигналу у масиві періодів імпульсів виділяємо  $m$  послідовних діапазонів по  $n$  елементів у кожному та визначаємо середнє значення –  $mid_k$

$$mid_k = \frac{a_k + a_{(n+k)} + a_{(2n+k)} + \dots + a_{((m-1) \cdot n + k)}}{m} \quad (1)$$

де  $a$  – елемент масиву;

$k = 0, 1 \dots (n-1)$  – порядковий номер елементів виділених діапазонів  $m$ .

У середовищі Mathcad визначаємо середнє квадратичне відхилення –  $Q_k$

$$Q_k = \frac{S_k}{n}, \quad (2)$$

$$S_k = \sqrt{\sum_k \left( (a_k - mid_k)^2 + (a_{(n+k)} - mid_k)^2 + (a_{(2n+k)} - mid_k)^2 + \dots + (a_{((m-1) \cdot n + k)} - mid_k)^2 \right)} \quad (3)$$

Будуємо графік залежності  $Q_k = f(n)$ , на якому у разі пошкодження в оптичній системі енкодера присутні мінімуми, які свідчать про періодичність сигналу. Для експериментальних даних, що відповідають значенням напруги живлення 2, 2.5 та 3В проводимо розрахунки у середовищі Mathcad згідно формул (1 ÷ 3).

Результати обчислень для  $m = 5$  наведені на рис. 7.

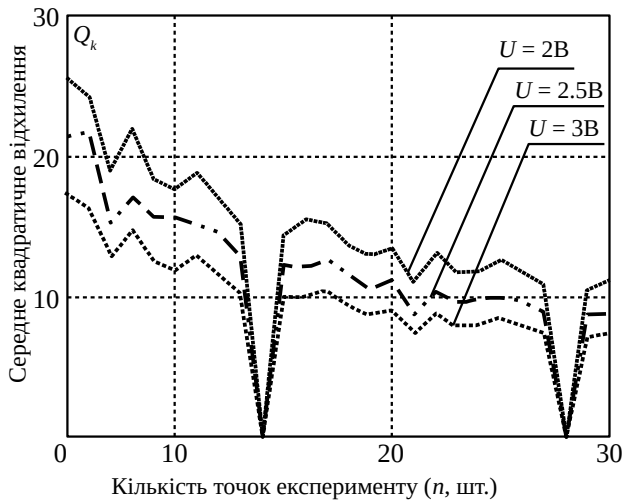


Рисунок 7 – Умовне зображення сигналу з деякою помилкою в каналі В

Вимірюємо частоту обертання диска за допомогою тахометра «Digital tachometer DT-2234C» (табл. 1) та порівнюємо її з розрахованою частотою пошкодженого енкодера (табл. 2).

Таблиця 1 – Частота обертання диску, виміряна тахометром

Напруга, В	Диск				
	1	2	3	4	5
2	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
2,5	44,7	44,7	44,7	44,7	44,7
3	52,7	52,7	52,7	52,7	52,7

Таблиця 2 – Частота обертання диску, розрахована за допомогою алгоритму

Напруга, В	Диск				
	1	2	3	4	5
2	36,0	35,6	36,9	36,9	35,2
2.5	45,1	44,7	45,4	44,8	44,5
3	53,9	53,5	52,8	53,3	53,1

На рисунках 8 і 9 зображені результати роботи енкодера без застосування корекції сигналу і з використанням алгоритму. Частота обертання диску, виміряна тахометром зображена у вигляді ліній, а частота, розрахована за алгоритмом – у вигляді точок.

Таким чином, у разі виникнення завад в оптичній системі енкодера запропонований метод ідентифікації кутової швидкості енкодера дає змогу правильно визначити вимірювану кутову швидкість і коректно завершити робочий цикл.

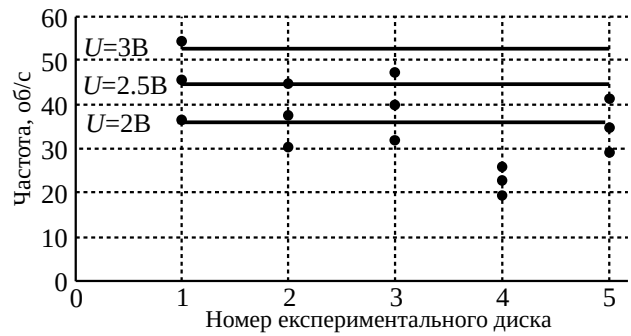


Рисунок 8 – Результати роботи енкодера без ідентифікації сигналу



Рисунок 9 – Результати ідентифікації кутової швидкості енкодера

**Висновки.** Використання методу ідентифікації кутової швидкості при наявності завад у оптичній системі енкодера дає змогу продовжити на певний час роботу енкодера у разі виникнення несправностей у його оптичній системі, що дозволить уникнути ряду аварій та матеріальних збитків, внаслідок раптової зупинки технологічного процесу.

Алгоритм для ідентифікації кутової швидкості при наявності завад у оптичній системі енкодера перевірено на спеціально розробленому лабораторному стенді. Проведені дослідження показали, що похибка між результатами роботи пошкодженого та справного енкодерів не перевищує 1%.

Запропонований програмно-апаратний комплекс для дослідження сигналів енкодерів можна використовувати у лабораторному практикумі дисциплін, пов'язаних з метрологією, інформаційно-вимірювальними системами, а також з системами автоматичного керування технологічними процесами.

Планується подальша робота над алгоритмом, розширення експерименту та робота над іншими видами пошкоджень енкодера.

#### Список літератури

1. Дорошенко А. Л., Михальський В. М., Шаповал І. А. Дослідження алгоритму керування швидкістю повністю керованої машини подвійного живлення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, № 27(1249). С. 53 – 57.
2. Осадчий В. В., Назарова Е. С., Брылистый В. В., Савилов Р. И. Исследование системы управления позиционным электроприводом с дискретным датчиком положения. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, № 27(1249). С. 146 – 149.
3. Почему не ломаются энкодеры LEINE&LINDE. URL: [http://meandr.ru/leine\\_linde](http://meandr.ru/leine_linde). (дата обращения 21.05.2019).

4. AVR. Учебный Курс. Инкрементальный энкодер. URL: <http://easyelectronics.ru/avr-uchebnyj-kurs-inkrementalnyj-encoder.html>. (дата обращения 21.05.2019).
5. Incze I. I., Negrea Alin, Imecs Maria, Szabó Csaba. Incremental Encoder Based Position and Speed Identification: Modeling and Simulation. *Acta Universitatis Sapientiae. Series: Electrical and Mechanical Engineering*. Cluj-Napoca: Sapientia Hungarian University of Transylvania, 2010, Vol. 2. pp. 27 – 39.
6. Аль-Тибби В., Поздняков А. Подключение инкрементного энкодера к ПЛК. *Современные технологии автоматизации*. Москва: ООО «СТА-ПРЕСС». 2015, № 1. С. 76 – 83.
7. Albrecht C., Klöck J., Martens O. Schumacher W. Online Estimation and Correction of Systematic Encoder Line Errors. *Machines*, 2017. Vol. 5, issue 1. 15 p.; DOI:10.3390/machines5010001.
8. Мороз В., Оксентюк В., Болкот П., Снітков К. Вплив розрядності даних на точність визначення кута в індукційних давачках кута. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Сер.: *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016, № 840. С. 90 – 97.
9. Бендат Дж., Пирсол А. *Прикладний аналіз випадкових даних*. URL: <https://www.twirpx.com/file/94589/>. (дата обращения 21.05.2019).
10. Шеннон Р. *Имитационное моделирование систем - искусство и наука*. URL: [https://mymirknig.ru/knigi/tehnicheskie\\_nauki/19265-imitacionnoe-modelirovanie-sistem-iskusstvo-i-nauka.html](https://mymirknig.ru/knigi/tehnicheskie_nauki/19265-imitacionnoe-modelirovanie-sistem-iskusstvo-i-nauka.html). (дата обращения 21.05.2019).
11. Осадчий В. В., Назарова О. С., Морозов П. Ю. Лабораторний стенд для дослідження сигналів пошкодженого енкодера. *Тижень науки: Тези доповідей наук.-техн. конф. 18-21 квітня 2017*. Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. С. 381 – 382.
12. Назарова О. С., Осадчий В. В. Алгоритм корекції сигналу пошкодженого енкодера. *Проблеми енергосервिसозбереження в електротехнічних системах*. Наука, освіта і практика. Кременчук : КрНУ, 2018. Вип. 5. С. 14 – 16.
13. uchebnyj-kurs-inkrementalnyj-encoder.html. (accessed 21.05.2019).
14. Incze I. I., Negrea Alin, Imecs Maria, Szabó Csaba. Incremental Encoder Based Position and Speed Identification: Modeling and Simulation. *Acta Universitatis Sapientiae. Series: Electrical and Mechanical Engineering*. Cluj-Napoca: Sapientia Hungarian University of Transylvania, 2010, Vol. 2. pp. 27 – 39.
15. Al'-Tibbi V., Pozdnyakov A. *Podklyuchenie inkrementnogo enkodera k PLK* [Connected incremental encoder to PLC]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizacii* [Contemporary Technologies in Automation]. Moskva: ООО «STA-PRESS». 2015, № 1. pp. 76 – 83.
16. Albrecht C., Klöck J., Martens O. Schumacher W. Online Estimation and Correction of Systematic Encoder Line Errors. *Machines*, 2017. vol. 5, issue 1. 15 p.; DOI:10.3390/machines5010001.
17. Moroz V., Oksentiuk V., Bolkot P., Snitkov K. Vplyv rozriadnosti danykh na tochnist vyznachennia kuta v induktsiynykh davachakh kuta [Influence of data bitness on accuracy of determination of angle in induction angle sensors]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Ser.: *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy* [Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Electrical Power and Electromechanical Systems]. Lviv Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2016, № 840. pp. 90 – 97.
18. Bendat Dzh., Pirsol A. *Prikladnoj analiz sluchajnykh danykh* [Applied analysis of random data: Transl. from English]. URL: <https://www.twirpx.com/file/94589/>. (accessed 21.05.2019).
19. SHennon R. *Imitacionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Simulation systems - art and science]. URL: [https://mymirknig.ru/knigi/tehnicheskie\\_nauki/19265-imitacionnoe-modelirovanie-sistem-iskusstvo-i-nauka.html](https://mymirknig.ru/knigi/tehnicheskie_nauki/19265-imitacionnoe-modelirovanie-sistem-iskusstvo-i-nauka.html). (accessed 21.05.2019).
20. Osadchyi V. V., Nazarova O. S., Morozov P. Yu. Laboratornyi stend dlia doslidzhennia syhnaliv poskodzhenooho enkodera [Laboratory bench for investigating damaged encoder signals]. *Tyzhden nauky: Tezy dopovidei nauk.-tekhn. konf. 18-21 kvitnia 2017 r., Zaporizhzhia* [Science Week: Abstracts of the Scientific and Technological Conference 18-21 april 2017]. Zaporizhzhia: ZNTU, 2017. pp. 381 – 382.
21. Nazarova O. S., Osadchyi V. V. Alhorytm korektsii syhnala poskodzhenooho enkodera [Correction algorithm for damaged encoder signal]. *Problemy enerhoresursozberezhennia v elektrotekhnichnykh systemakh*. Nauka, osvita i praktyka [Problems of energy and resource saving in electrical systems. Science, education and practice]. Kremenchuk : KrNU, 2018, Vyp. 5. pp. 14 – 16.

## References (transliterated)

Надійшла 31.05.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Назарова Олена Сергіївна (Назарова Елена Сергеевна, Nazarova Olena Serhiivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: 0000-0002-0784-7621; e-mail: nazarova16@gmail.com

**Осадчий Володимир Володимирович (Осадчий Владимир Владимирович, Osadchyy Volodymyr Volodymyrovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок; м. Запоріжжя, Україна; ORCID:0000-0002-2707-0805; e-mail: w.osadchyy@gmail.com

**Мелешко Ірина Анатоліївна (Мелешко Ирина Анатольевна, Meleshko Irina Anatoliivna)** – Національний університет «Запорізька політехніка», аспірант кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: 0000-0003-2473-5434; e-mail: iameleshko@gmail.com

**Олейников Микола Олександрович (Олейников Николай Александрович, Oleinikov Mykola Oleksandrovych)** – Національний університет «Запорізька політехніка», студент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: www.nikolay-96@ukr.net