

М. С. НИКОНОВ, І. І. БОРЗЕНКОВ, І. Л. ЛЕБЕДИНСЬКИЙ

РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ ЗБОРУ ТА АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В реальних умовах експлуатації електричних мереж виникають режими, що характеризуються відхиленням своїх параметрів від номінальних значень. Особливо важливими з точки зору експлуатації електричного обладнання є відхилення амплітуди та частоти напруги мережі живлення. Допустимі та граничні значення відхилення цих параметрів нормуються у відповідності з державними стандартами. Для розрахунку основних параметрів якості електроенергії недостатньо знати тільки методи їх розрахунку. Для визначення напруги та частоти основної гармоніки потрібні додаткові алгоритми. Таким алгоритмом є дискретне перетворення Фур'є. Даний алгоритм створений для проведення аналізу сигналів. Але цей алгоритм не знайшов широкого застосування при розрахунках коефіцієнтів Фур'є у сучасних програмних комплексах. Причиною є значна витрата часу та ресурсів комп'ютера на визначення коефіцієнтів Фур'є, що зменшує привабливість такого підходу. У зв'язку з цим, доцільно використовувати алгоритм швидкого перетворення Фур'є. Цей алгоритм використовує властивості періодичності тригонометричної функції, що дозволяє скоротити кількість операцій множення. Результати використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є є аналогічними дискретному, але кількість операцій необхідна для обчислення в рази менша. Разом з тим алгоритми швидкого та дискретного перетворення Фур'є можуть давати досить значну похибку у визначенні оцінки частоти. Дане відхилення пов'язане з кратністю часу між вимірами сигналу та його періоду. У випадку коли період аналогового сигналу не кратний відстані між вимірами дискретизованого сигналу, для зменшення похибки у визначенні частоти основного сигналу необхідно використовувати додатковий метод Квіна. У зв'язку з цим розробка алгоритмів та програмного комплексу для автоматизованих вимірювальних систем показників якості електричної енергії з використанням цифрових приладів збору та обробки даних у реальному часі є актуальною задачею.

Ключові слова: мікроконтролер, National Instruments USB-6009, MATLAB, швидке перетворення Фур'є, вимірювальна система, аналіз даних, показники якості електроенергії.

Н. С. НИКОНОВ, И. И. БОРЗЕНКОВ, И. Л. ЛЕБЕДИНСКИЙ

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В реальных условиях эксплуатации электрических сетей возникают режимы, характеризующиеся отклонением своих параметров от номинальных значений. Особенно важными с точки зрения эксплуатации электрического оборудования является отклонение амплитуды и частоты напряжения питания. Допустимые и предельные значения отклонения этих параметров нормируются в соответствии с государственными стандартами. Для расчета основных параметров качества электроэнергии недостаточно знать только методы их расчета. Для определения напряжения и частоты основной гармонической нужны дополнительные алгоритмы. Таким методом является дискретное преобразование Фурье. Данный алгоритм создан для проведения анализа сигналов. Но этот алгоритм не нашел широкого применения при расчетах коэффициентов Фурье в современных программных комплексах. Причиной является значительный расход времени и ресурсов компьютера на определение коэффициентов Фурье, что уменьшает привлекательность такого подхода. В связи с этим, целесообразно использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье. Этот алгоритм использует свойства периодичности тригонометрической функции, что позволяет сократить количество операций умножения. Результаты использования алгоритма быстрого преобразования Фурье аналогичны дискретному, но количество операций необходимых для вычисления в разы меньше. Вместе с тем алгоритмы быстрого и дискретного преобразования Фурье могут давать достаточно значительную погрешность в определении оценки частоты. Данное отклонение связано с кратностью времени между измерениями сигнала и его периода. В случае если период аналогового сигнала кратный расстоянию между измерениями дискретизованного сигнала, для уменьшения погрешности в определении частоты основного сигнала необходимо использовать дополнительный метод Квина. В связи с этим разработка алгоритмов и программного комплекса для автоматизированных измерительных систем показателей качества электрической энергии с использованием цифровых приборов сбора и обработки данных в реальном времени является актуальной задачей.

Ключевые слова: микроконтроллер, National Instruments USB-6009, MATLAB, быстрое преобразование Фурье, измерительная система, анализ данных, показатели качества электроэнергии.

N. S. NIKONOV, I. I. BORZENKOV, I. L. LEBEDYNSKY

DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT SYSTEM AND SOFTWARE PRODUCT TO COLLECT AND ANALYSE ELECTRICITY QUALITY PARAMETERS

In the real operating conditions of electrical networks, there are modes of operation characterised by deviations of their parameters from their nominal values. Of particular importance for the operation of electrical equipment are variations in the amplitude and frequency of the supply voltage. The permissible and limit deviations of these parameters are regulated in accordance with national standards. To calculate the main power quality parameters it is not sufficient to know only the methods of their calculation. Additional algorithms are needed to determine fundamental harmonic voltages and frequencies. Such a method is the discrete Fourier transform. This algorithm is designed for signal analysis. However, this algorithm was not widely used in calculating Fourier coefficients in modern software packages. The reason is that it takes much time and computer resources to determine the Fourier coefficients which reduces the attractiveness of this approach. For this reason, it is advisable to use the fast Fourier transform algorithm. This algorithm uses the periodicity properties of the trigonometric function, which allows reducing the number of multiplication operations. The results of using the fast Fourier transform algorithm are similar to the discrete Fourier algorithm, but the number of operations required for calculation is several times less. At the same time, fast and discrete Fourier transform algorithms can give quite a significant error in determining the frequency estimate. This deviation is related to multiplicity of time between signal measurements and its period. If the period of the analogue signal is a multiple of the sampled signal measurement distance, an additional Quin method must be used to reduce the error in determining the frequency of the main signal. In this regard, the development of algorithms and software complex for automated measurement systems of electrical power quality indicators using digital data acquisition and processing devices in real time is an urgent task.

Keywords: microcontroller, National Instruments USB-6009, MATLAB, fast Fourier transform, measurement system, data analysis, power quality indicators.

© М. С. Ніконов, І. І. Борзенков, І. Л. Лебединський, 2021

Вступ. Зважаючи на світову тенденцію по якійшій електричній енергії, сьогодні стає актуальною задача по контролю якості електроенергії відповідно до нормативних документів. Так, відхилення кожного параметра електроенергії може призвести до серйозних наслідків як-от збільшення втрат енергії, перегрів електричного обладнання, яке пришвидшує старіння ізоляції та ймовірність аварії, помилкове спрацювання автоматичних вимикачів та пристроїв релейного захисту.

Для опису вимог та контролю якості електроенергії в нашій країні існує ряд нормативних документів як-от ДСТУ EN 50160:2014 [1] та ГОСТ 13109-97 [2]. Тому, сьогодні компанії як «Satec» [3] вже пропонують якісні прилади та програмне забезпечення для аналізу електричної енергії. Прилади здатні з високою точністю фіксувати відхилення та робити записи і звіти із зазначенням точної дати та часу. У зв'язку з цим розробка автоматизованих вимірювальних систем показників якості електричної енергії з використанням цифрових приладів збору та точна якісна обробка даних в реальному часі сьогодні є актуальною задачею [4–6].

Мета статті. Метою роботи є розробити аналог програмного комплексу для вимірювання на автоматизованого комп'ютерного аналізу основних показників якості електроенергії у відповідності до нормативних документів [1, 2].

Основний матеріал. У даній роботі за допомогою електронного приладу збору даних фірми National Instrument USB-6009 [7] та програмного пакету MatLAB розроблено вимірювальну систему для визначення основних показників якості електроенергії: відхилення амплітуди напруги та частоти у відповідності до ДСТУ [1].

Для розрахунку основних параметрів якості електроенергії недостатньо знати тільки методи їх розрахунку у відповідності з нормативними документами [1, 2]. Для визначення напруги та частоти основної гармоніки потрібні додаткові алгоритми. Таким алгоритмом є швидке перетворення Фур'є (ШПФ) [8]. Це саме той алгоритм який доцільно використовувати коли проводимо аналіз сигналу за допомогою цифрової техніки.

Однак, метод ШПФ має один недолік – велику похибку у визначенні оцінки частоти. Дане відхилення пов'язане із кратністю часу між вимірами сигналу та його періоду [9]. У випадку, коли період аналогового сигналу не кратний відстані між вимірами дискретизованого сигналу, то метод ШПФ дає не точні результати для вищих гармонік. Іншими словами, ШПФ не може точно визначити частоту коли його максимум не співпадає з максимумом спектра напруги. Тому, у роботі були додатково враховані дані обмеження у процедурі визначення основних показників якості електроенергії.

Апаратна частина проекту. Для реалізації вимірювальної системи використовується мікроконтролер для збору та передачі даних на персональний комп'ютер та схема пониження напруги, представлена на рис. 1.

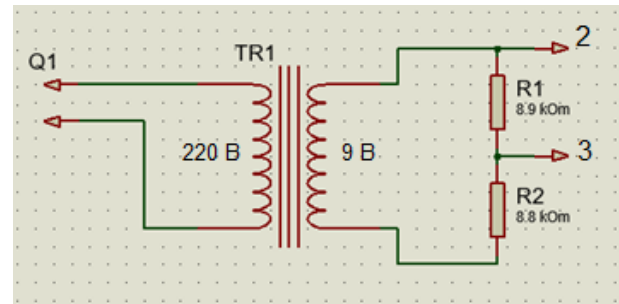


Рисунок 1 – Однофазна вимірювальна електрична схема напруги мережі

Для вимірювання діючого значення напруги використовується понижувальний трансформатор 220/9 В. Даний трансформатор додатково створює гальванічну розв'язку системи. Крім того, додатково використовується дільник напруги із резисторів R_1 та R_2 (рис. 1). Вимірювальні виводи підключаються до терміналів мікроконтролера 2 та 3, які у свою чергу представляють аналогові входи AI0 та AI4 [7].

Для збору та передачі даних на персональний комп'ютер використовується плата для збору даних USB-6009 (рис. 2) [7].



Рисунок 2 – Загальний вигляд плит збору даних USB-6009

Приєднання до комп'ютера відбувається за допомогою інтерфейсу full-speed USB та містить у собі вісім каналів входу аналогового сигналу (AI), два канали генерації аналогових сигналів (AO), 12 каналів цифрового входу або виходу (DIO) та 32-розрядний лічильник [10]. Крім того, USB-6009 має інші характеристики. До них відносяться: розширення при аналоговому вході (необхідно для точності вимірювання значень); максимальна частота дискретизації (точність розрахунку неосновних гармонік залежить від даного параметра, відповідно чим більша величина, тим точніше та більшу гармоніку можна розрахувати).

Відповідно до [7, 10] існує дві схеми підключення для виконання вимірювання сигналів:

- диференційна схема;
- схема із загальним проводом.

У даній роботі використовується диференційна схема (рис. 3) [10].

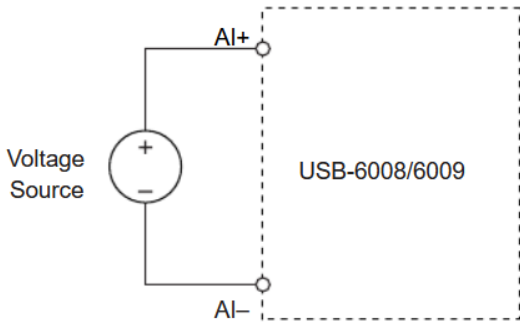


Рисунок 3 – Підключення сигналів за диференційною схемою

При диференційному підключенні вимір напруги проводиться у діапазоні 20 В. Однак, максимальна напруга на кожному із контактів не повинна перевищувати 10 В відносно GND.

Потрібно також пам'ятати, що подача сигналу з амплітудою понад 10 В на будь-який із контактів призводить до обмеження вимірюваного сигналу.

Для реалізації вимірювальної системи розроблено вимірювальну систему та програмне забезпечення, блок-схема якого наведена на рис. 4.

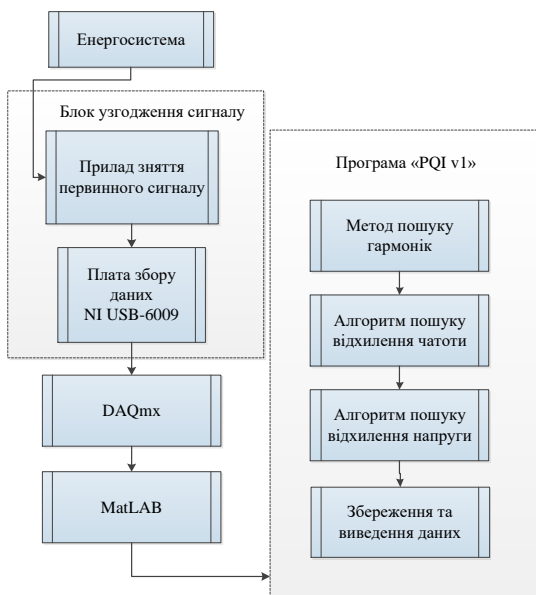


Рисунок 4 – Структурна блок-схема вимірювального комплексу

Згідно з рис. 4, даний комплекс складається із блоку узгодження та програми «PQI v1». Для передачі інформації з плати збору даних до програми використовується додаткове програмне забезпечення «DAQmx» [11], необхідне для підвищення продуктивності програми та управління сигналом використовуючи програмний комплекс MatLAB.

Блок «Програма «PQI v1»» – це програма, розроблена в програмний комплекс MatLAB [12], яка здійснює обробку вимірюного сигналу та аналіз основних показників якості електроенергії. Створений програмний продукт дозволяє проводити

автоматизований вимір напруги та розрахунок усталеного відхилення частоти та напруги у відповідності до [1, 2]

Принцип роботи програми вимірювального комплексу. Із трансформатора TR_1 (рис. 1) діюче значення напруги мережі трансформується до величини 9 В і далі через дільники напруги понижується до необхідного значення для правильної роботи аналогового входу мікроконтролера. Потім за допомогою плати USB-6009 сигнал перетворюється в цифровий вигляд. Після цього, драйвер DAQmx узгоджує сигнал із програмним комплексом MatLAB. Далі сигнал аналізується програмою «PQI v1». Принцип роботи програми «PQI v1» можна умовно описати блок-схемою (рис. 5).

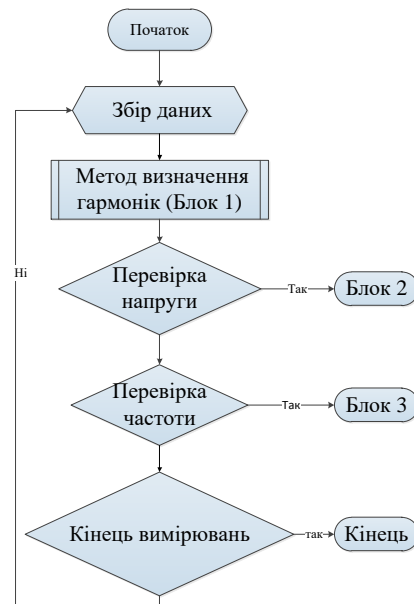


Рисунок 5 – Структурна блок-схема роботи програми «PQI v1»

Робота програми полягає у виконанні декількох алгоритмів.

Робота першого алгоритму по визначенню наявності гармонік в сигналі базується на методі ШПФ [8] та методу Квіна (Quinn's Estimator) [9]. Використання додаткового методу Квіна пов'язане із відхиленням кратності часу між вимірами сигналу до періоду вибірки [9]. Іншими словами, ШПФ не може точно визначити частоту сигналу у випадку коли його максимум не співпадає з реальним максимумом частоти спектра напруги.

У процесі перетворень отримуємо амплітудо-частотний спектр, з якого визначаємо амплітуду та частоту основної гармоніки $U_{1(1)}$ на одnoseкундному інтервалі [1]. Далі проводяться розрахунки усталеного відхилення амплітуди напруги U_y у відсотках за час усереднення, що дорівнює 60 с [1] (рис. 5 блок 2). Аналогічний підхід використовується для визначення усталеного відхилення частоти (рис. 5

блок 2). При цьому, період усереднення дорівнює значенню 20 с [1].

На рис. 6 показано результат роботи програми на довготривалому періоді роботи. Розрахунки проводяться у відповідності з [1, 2].

ГОСТ 13109-97		ДСТУ EN50160:2014		
№	Час	Значення, В	Delta, %	Характеристик
70	19-04 23:23:58:806	225.4800	2.4900	Норма
69	19-04 23:22:58:806	225.9100	2.6900	Норма
68	19-04 23:21:58:806	225.3700	2.4400	Норма
67	19-04 23:20:58:806	225.0000	2.2700	Норма
66	19-04 23:19:58:806	225.2900	2.4100	Норма
65	19-04 23:18:58:806	225.1500	2.3400	Норма
64	19-04 23:17:58:806	224.9900	2.2700	Норма
63	19-04 23:16:58:806	224.9400	2.2400	Норма
62	19-04 23:15:58:806	225.0000	2.2700	Норма
61	19-04 23:14:58:806	225.0000	2.2700	Норма

Рисунок 6 – Результат вимірювань та роботи програми по визначенню діючого значення напруги

Результати вимірювань зберігаються на жорсткому диску, а також виводяться в інтерфейсі програми у відповідній таблиці (рис. 6) та будується графік, як показано на рис. 7.

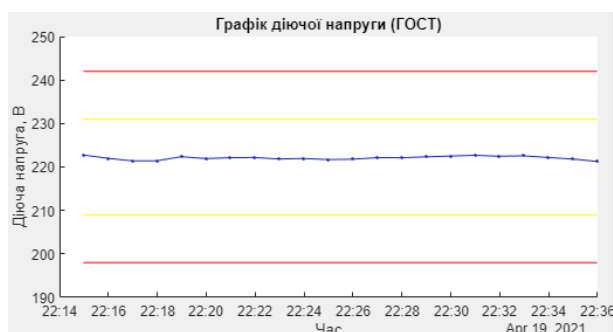


Рисунок 7 – Графік діючої напруги, побудований програмою «PQI v1»

Графік діючої напруги будується відповідно до вимог [1, 2]. Крім того, на графіку позначаються межі нормально та гранично допустимих значень, котрі побудовані жовтим та червоним кольорами відповідно.

Аналогічні вихідні дані програма виводить і для частоти досліджуваного сигналу.

Висновки. Використовуючи розроблене програмне забезпечення «PQI v1», що здійснює обробку вимірюваного сигналу та аналіз основних показників якості електроенергії у відповідності до [1, 2] дозволить проводити автоматизований вимір напруги та розрахунок усталеного відхилення частоти та напруги.

Вище зазначені параметри є основними при оцінці показників якості електричної енергії у електричних мережах нашої країни. Дане програмне забезпечення дозволяє аналізувати і фіксувати відхилення основних параметрів якості електричної енергії, на основі яких розробляються рекомендації по оптимізації режимів роботи електричних мереж для усунення небажаних

явищ для побутових споживачів та зменшення втрат електроенергії в мережах постачальника електроенергії.

Список літератури

1. ДСТУ EN 50160: 2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT) / Нац. Стандарт України. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.
2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Издательство стандартов, 1997.
3. Аналізатори якості електроенергії компанії SATEC. URL: <https://www.satec-global.com.ua/uk/> (дата звернення: 16.05.2021).
4. Lezhniuk P. D., Bondarchuk A. S., Shullie Iu. A. Investigation and implementation of the fractal properties of electric load on civilian objects in order to efficiently predict and control electrical consumption. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, no. 8 (99). P. 6–12. doi: 10.15587/1729-4061.2019.168182
5. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. No. 57. P. 302–318.
6. Мартиненко В. І., Босий Д. О. Дослідження ефективності автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії побутових споживачів. *Електрифікація транспорту*. 2018. № 15. С. 99–108.
7. USB-6009 Многофункциональное устройство ввода-вывода. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.usb-6009.html> (дата звернення: 16.05.2021).
8. Сато Ю. *Обработка сигналов. Первое знакомство*. Москва: Додека XXI, 2002. 176 с.
9. Елизаров Д. А. *Повышение точности оценки показателей несинусоидальности напряжения в электроэнергетических системах: дис. ... канд. тех. наук 05.14.02*. Омск, 2014. 154 с.
10. Руководство пользователя и технические характеристики USB-6008/6009. URL: <https://docplayer.ru/46274774-Rukovodstvo-polzovatelya-i-tehnicheskie-harakteristiki-usb-6008-6009.html> (дата звернення: 16.05.2021).
11. Технічна інформація програмного забезпечення DAQmx. URL: <https://www.ni.com/documentation/en/ni-daqmx/latest/daqmx-properties-properties/> (дата звернення: 19.05.2021).
12. Дьяконов В. П. *MATLAB. Полный самоучитель*. Москва: ДМК Пресс, 2012. 768 с.

References (transliterated)

1. DSTU EN 50160:2014. *Kharakterystyky napruhy elektropostachannya v elektrychnykh merezhakh zahal'noyi pryznachenosti (EN 50160:2010, IDT)* [State Standard 50160:2014. Characteristics of electricity voltage in general purpose electrical networks]. Kyiv, Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine Publ., 2014. 27 p.
2. GOST 13109-97. *Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Quality standards for electrical energy in general-purpose electricity supply systems]. Moscow, Standards Publishers Publ., 1997.
3. *Analizatory yakosti elektroenerhiyi kompaniyi SATEC* [SATEC Power Quality Analyzers]. Available at: <https://www.satec-global.com.ua/uk/> (accessed 16.05.2021).
4. Lezhniuk P. D., Bondarchuk A. S., Shullie Iu. A. Investigation and implementation of the fractal properties of electric load on civilian objects in order to efficiently predict and control electrical consumption. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, vol. 3, no. 8 (99), pp. 6–12. doi: 10.15587/1729-4061.2019.168182
5. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, no. 57, pp. 302–318.
6. Martynenko V. I., Bosyy D. O. Doslidzhennya efektyvnosti avtomatyzovanoyi systemy komertsynoho obliku elektroenerhiyi pobutovykh spozhyvachiv [Study on the efficiency of an automated commercial electricity metering system for domestic consumers]. *Elektryfikatsiya transportu*. 2018, no. 15, pp. 99–108.

7. *USB-6009 Mnogofunktional'noe ustroystvo vvoda-vyvoda* [USB-6009 Multifunction I/O Device]. Available at: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.usb-6009.html> (accessed 16.05.2021).
8. Sato Yu. *Obrabotka signalov. Pervoe znakomstvo* [Signal processing. A first introduction]. Moscow, Dodeka XXI, 2002. 176 p.
9. Elizarov D. A. *Povyshenie tochnosti otsenki pokazatelya nesinusoidal'nosti napryazheniya v elektroenergeticheskikh sistemakh: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.14.02* [Improving the accuracy of non-sinusoidal voltage indices in power systems. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Omsk, 2014. 154 p.
10. *Rukovodstvo pol'zovatelya i tekhnicheskie kharakteristiki USB-6008/6009* [USB-6008/6009 User Manual and Specifications]. Available at: <https://docplayer.ru/46274774-Rukovodstvo-polzovatelya-i-tehnicheskie-harakteristiki-usb-6008-6009.html> (accessed 16.05.2021).
11. *Tekhnichna informatsiya prohranno zabezpechennya DAQmx* [DAQmx Properties]. Available at: <https://www.ni.com/documentation/en/ni-daqmx/latest/daqmx-properties-properties-properties/> (accessed 19.05.2021).
12. Dyakonov V. P. *MATLAB. Polnyy samouchitel'*. Moscow, DMK Press Publ., 2012. 768 p.

Надійшла (received) 28.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ніконов Микола Сергійович (Никонов Николай Сергеевич, Nikonov Nikolay Sergeevich) – студент кафедри електроенергетики Сумського державного університету; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0542-7594>; e-mail: mykola.nikonov@student.sumdu.edu.ua.

Борзенков Ігор Іванович (Борзенков Игорь Иванович, Borzenkov Igor Ivanovich) – аспірант кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7775-9571>; e-mail: i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua.

Лебединський Ігор Леонідович (Лебединский Игорь Леонидович, Lebedinsky Igor Leonidovich) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедрою електроенергетики Сумського державного університету; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2843-1032>; e-mail: i.lebedinsky@etech.sumdu.edu.ua.