

Ю.С. ГРИЩУК, В.М. ЛЕЩЕНКО, М.Г. ПАНТЕЛЯТ, В.В. ВАРВ'ЯНСЬКА, О.І. ШЕВЛЮГА

СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ НА БАЗІ ARM-МІКРОКОНТРОЛЕРА

Розглянуті питання модернізації стендів для дослідження електричних апаратів, шляхом застосування сучасних ARM-мікроконтролерів, які мають високу продуктивність при невисокій їх вартості, наднизьке енергоспоживання (джерело живлення напругою 1,8-3,6 В), високу перешкодостійкість і надійність в роботі. Відзначена актуальність завдання, вирішення якого потребує розробки сучасного дослідного стенду. На основі аналізу технічних вимог до електричних апаратів, та методів їх випробувань і досліджень визначені фізичні, електричні та інші параметри, які пропонуються контролювати в процесі їх експериментальних випробувань і досліджень. Розглянуті існуючі стенди та їх принципові схеми для комутаційних, теплових та інших досліджень електричних апаратів, їх граничної комутаційної здатності, із застосуванням різних систем керування. Проведено аналіз стендів з мікроконтролерним керуванням дослідженнями електричних апаратів, наведені їх переваги та особливості застосування. Запропонована заміна існуючих дослідних стендів та системи вимірювання, контролю і керування на модернізований стенд. Розроблена структурна схема стенда, виконаного на базі 32-х розрядного ARM-мікроконтролера, вибрані її елементи та побудовано алгоритм роботи, що дає можливість автоматизувати процес експериментальних досліджень електричних апаратів, з послідовним обробленням результатів та передачею в комп'ютер для подальшого аналізу і оформлення. Все це дозволить суттєво скоротити строки проведення випробувань і експериментальних досліджень електричних апаратів, оброблення отриманих результатів та підвищити їх економічну ефективність.

Ключові слова: стенд; дослідження електричних апаратів; мікроконтролер; автоматизована система контролю параметрів і керування.

Ю.С. ГРИЩУК, В.М. ЛЕЩЕНКО, М.Г. ПАНТЕЛЯТ, В.В. ВАРВ'ЯНСКАЯ, А.И. ШЕВЛЮГА

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА БАЗЕ ARM-МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

Рассмотрены вопросы модернизации стендов для исследования электрических аппаратов, путем применения современных ARM-микроконтроллеров, которые имеют высокую производительность при невысокой их стоимости, сверхнизкое энергопотребление (источник питания напряжением 1,8-3,6 В), высокую помехоустойчивость и надежность в работе. Отмечена актуальность задачи, решение которой требует разработки современного исследовательского стенда. На основе анализа технических требований к электрическим аппаратам, и методов их испытаний и исследований, определены физические, электрические и другие параметры, которые предлагается контролировать в процессе их экспериментальных испытаний и исследований. Рассмотрены существующие стенды и их принципиальные схемы для коммутационных, тепловых и других исследований электрических аппаратов, их предельной коммутационной способности, с применением различных систем управления. Проведен анализ стендов с микроконтроллерным управлением исследованиями электрических аппаратов, приведены их преимущества и особенности применения. Предложена замена существующих исследовательских стендов и системы измерения, контроля и управления на модернизированный стенд. Разработана структурная схема стенда, выполненного на базе 32-х разрядного ARM-микроконтроллера, выбраны ее элементы и построен алгоритм работы, что дает возможность автоматизировать процесс экспериментальных исследований электрических аппаратов, с последующей обработкой результатов и передачей в компьютер для дальнейшего анализа и оформления. Все это позволит существенно сократить сроки проведения испытаний и экспериментальных исследований электрических аппаратов, обработки полученных результатов и повысить их экономическую эффективность.

Ключевые слова: стенд; исследования электрических аппаратов; микроконтроллер; автоматизированная система контроля параметров и управления.

Yu.S. GRISHCHUK, V.M. LESHCHENKO, M.G. PANTELYAT, V.V. VARVIANSKA, O.I. SHEVLIUHA

A STAND FOR RESEARCH OF ELECTRICAL DEVICES BASED ON ARM-MICROCONTROLLER

The issues of modernization of stands for research of electrical devices by using modern ARM- microcontrollers, which have high performance at low cost, ultra-low power consumption (power supply voltage of 1.8-3.6 V), high noise immunity and reliability are considered. The urgency of the problem, the solution of which requires the development of a modern research stand, is noted. On the basis of the analysis of technical requirements to electric devices, and methods of their tests and researches physical, electric and other parameters which are offered to control in the course of their experimental tests and researches are defined. The existing stands and their schematic diagrams for switching, thermal and other researches of electric devices, their maximum switching capacity, with application of various control systems are considered. The analysis of stands with microcontroller control of researches of electric devices is carried out, their advantages and features of application are presented. It is proposed to replace the existing research stands and measurement, control and management system with an upgraded stand. The structural circuit of the stand based on 32-bit ARM microcontroller is developed, its elements are selected and the algorithm is built, which allows to automate the process of experimental research of electrical devices, with subsequent processing of results and transfer to computer for further analysis and design. All this will significantly reduce the time of testing and experimental research of electrical devices, processing the results and increase their economic efficiency.

Key words: stand; research of electrical devices; microcontroller; automated system of parameter control and monitoring.

Вступ. Розробка нових електричних апаратів з покращеними захисними і техніко-економічними характеристиками потребує проведення великої кількості комутаційних, теплових та інших експериментальних випробувань і досліджень. В зв'язку з цим виникає необхідність в розробці нових стендів для досліджень електричних апаратів, електропобутової техніки та іншого електротехнічного устаткування, із застосуванням сучасних мікроконтролерів (МК).

У останній час визначилася тенденція широкого використання, в системах автоматизованого керуван-

ня технічними об'єктами або процесами, контрольно-дослідницьким та іншим обладнанням, сучасних ARM-мікроконтролерів. Це стало можливим завдяки таким їх якостям: як велика швидкодія та продуктивність, істотно малі розміри та маса, низька споживана потужність і вартість.

В даний час серед всіх ARM-мікроконтролерів безперечним лідером по кількості різновидів його модифікацій є 32-х розрядне сімейство мікроконтролерів STM32.

Метою даної роботи є розробка лабораторного

стенда для досліджень і випробувань електричних апаратів, на базі ARM-мікроконтролера, сімейства STM32, що дозволить автоматизувати процес їх проведення, скоротити терміни експериментальних досліджень і випробувань, підвищити достовірність результатів та економічну ефективність. Все це вказує на актуальність та практичну доцільність і корисність даної роботи.

Огляд і аналіз технічних вимог до електричних апаратів. Електричний апарат – електротехнічний пристрій, призначений для зміни, регулювання, вимірювання та контролю електричних і неелектричних параметрів різних пристроїв, машин, механізмів тощо, а також для їх захисту від надструмів і перенапруг при неприпустимих, або аварійних режимах роботи та захисту людей, майна і довкілля в процесі виробництва, транспортування, перетворення, розподілення та споживання електричної енергії.

Основними функціями електричних апаратів є комутація, керування, контроль, обмеження та захист технічних об'єктів. Вони використовуються в системах захисту електричних мереж, в пуско-регулювальних пристроях, що застосовуються в різних виробничих процесах (особливо швидкоплинних), транспортних засобах, системах автоматизації і телемеханіки, зв'язку, тощо.

Кількість видів електричних апаратів неспинно росте. Для різних потреб використовуються різні апарати. У відповідності з їх класифікацією, за призначенням, типами, видом і величиною струму і напруги, конструкцією і таке інше, до них ставляться відповідні технічні вимоги та зазначаються методи їх випробувань для різних режимів роботи і правила улаштування [1, 2].

До конструктивних видів сучасних апаратів різного призначення, пред'являються різні технічні вимоги [1, 2]. Однак існують і деякі загальні вимоги незалежно від призначення, застосування або конструкції апаратів. Вони залежать від умов експлуатації, режимів роботи, необхідної надійності і таке інше.

В залежності від апарата та методів досліджень або випробувань визначається конкретна кількість параметрів і характеристик які необхідно досліджувати або випробувувати.

Огляд і аналіз різних електричних апаратів (автоматичних вимикачів, плавких запобіжників, контакторів, реле, і ін.) та технічних вимог до них, вказує на дуже широкий перелік параметрів, які повинні перевірятись і досліджуватись при проведенні різних випробувань і досліджень. До таких параметрів відносяться: номінальний струм і напруга, струм перевантаження, струм короткого замикання, напруга на виводах апаратів, на контактах та на електричній дузі, інтеграл Джоуля, час відключення, температура на виводах апаратів, температура контактів, плавких елементів, швидкість руху дуги в дугогасній решітці, або в дугогасній камері і таке інше. Все це вказує на необхідність використання широкого спектру необхідних датчиків які дозволяють з необхідною точністю

відслідковувати зміну цих параметрів в процесі досліджень або випробувань.

Велика кількість дослідних параметрів електричних апаратів потребує автоматизації досліджень процесів комутації і інших маловивчених процесів та розробки відповідних мікроконтролерних дослідних стендів.

Огляд і порівняльний аналіз лабораторних стендів. *Лабораторний макет (ЛМ) МК51* призначений для придбання навичок програмування мікроконтролера 8051 (МК51) і створення систем логічного керування об'єктами [3]. Він виконаний на 8-ми розрядному мікроконтролері який має такі технічні характеристики: тактова частота - 11 МГц; об'єм ОЗП програм на платі МК - 8 Кб; об'єм ОЗП даних МК - 8 Кб. *Удосконалений лабораторний стенд МК51* виконаний на базі мікроконтролера 1830BE31 (західний аналог 80C31BH-Intel), він відноситься до серії МК MCS-51 фірми Інтел (США) [3]. Основними недоліками цих стендів є відсутність в МК розвинутої периферії, низька швидкодія і продуктивність. *Програмно-налагоджувальний стенд «AVR – мікролаб»* призначений для моделювання й налагодження мікропроцесорних пристроїв на базі 8-ми розрядних МК фірми Atmel і може бути використаним для автоматизації керування об'єктами і їх дослідженнями та в навчальних цілях [3]. Аналіз цих та інших, представлених в [3, 4] стендів і МК вказує на ряд таких їх недоліків, як низькі швидкодію і продуктивність, та високе енергоспоживання. Наведені результати аналізу мікроконтролерних стендів та проведений огляд і аналіз схем силових стендів для дослідження потужнострумових електричних апаратів на граничну комутаційну здатність, наведених в [6, 7], вказують на актуальність розроблення стенда на базі сучасного, високопродуктивного, з наднизьким енергоспоживанням ARM-мікроконтролера серії STM32.

Розробка лабораторного стенду на базі мікроконтролера STM32. Структурна схема автоматизованої системи керування стендом для випробувань та досліджень електричних апаратів виконана на базі мікроконтролера STM32F4, зображена на рис. 1 і включає в себе: аналогові датчики контрольованих параметрів DA1–D12, які є первинними перетворювачами струму, температури та інших параметрів в напругу; та дискретні датчики DD1–DDN; пристрої узгодження і обміну УСО1–УСО3, які включають виконавчі пристрої силової установки, що задають режим випробувань або досліджень; ARM-мікроконтролер серії STM32F4; компаратори K1–K3, виходи яких об'єднані за "АБО" з вихідними сигналами керуючого мікроконтролера які складають паралельний захисний контур при виникненні аварійних ситуацій. Передача даних і обмін між МК та комп'ютером (ПК) здійснюється через USB порт. Через ПК можна змінювати режими випробувань або досліджень, а також приймати, запам'ятовувати, відображати і документувати отримані результати.

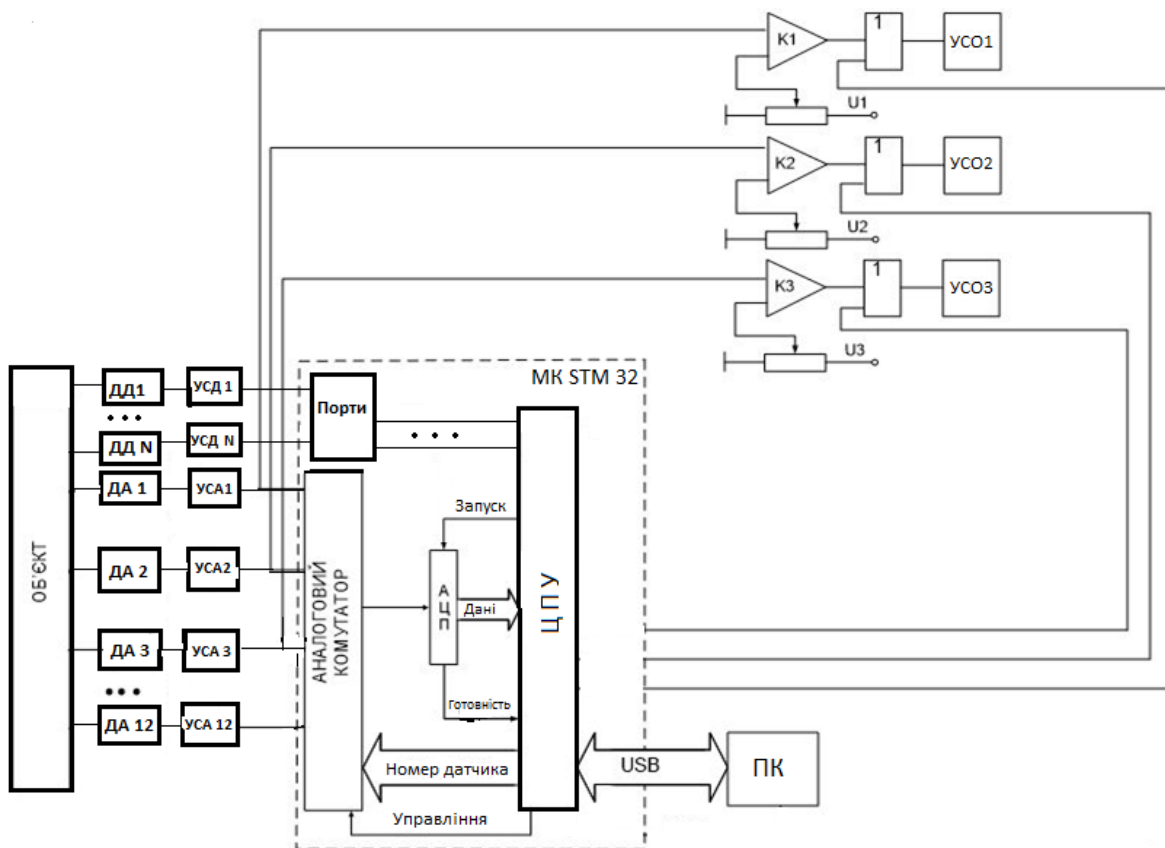


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи керування стендом для випробувань та досліджень електричних апаратів

До об'єкту дослідження підключені аналогові датчики ДА1–ДА12, які через узгоджуючі схеми УСА1–УСА12 підключені до аналогового комутатора МК, та передбачені дискретні датчики ДД1–ДДN (наприклад, для контролю стану об'єкту дослідження та інше), які через узгоджуючі схеми УСД1–УСДN підключені до портів МК. В якості 12 аналогових датчиків вибрані: три аналогових датчики струму – (ДА1–ДА3); три аналогових датчики напруги – (ДА4–ДА6); три аналогових датчики температури на контактах – (ДА7–ДА9); три аналогових датчики температури на виводах автоматичного вимикача – (ДА10–ДА12). Всього схема передбачає підключення 24 аналогових і дискретних датчиків. Алгоритм роботи схеми наведено на рис. 2.

Вибір мікроконтролера. Мікроконтролер, як основний елемент автоматизованої системи керування стендом, вибирається виходячи з характеру наступних досліджуваних процесів і умов досліджень або випробувань: швидкості протікання досліджуваних процесів; кількості досліджуваних параметрів і частоти опитування датчиків; завдань з переробки інформації і вимог щодо надійності; наявності програмного забезпечення та засобів налагодження; умов експлуатації [3-5].

При дослідженні потужнострумів електричних апаратів (автоматичних вимикачів, швидкодіючих та інших плавких запобіжників і ін.) на граничну комутаційну здатність, згідно силових схем стендів наведених в [6, 7], для забезпечення необхідної точності визначення результатів, частоту опитування аналого-

вих датчиків змінного струму і напруги визначаємо згідно теореми Котельникова. Для отримання результатів з точністю в межах до 0,5% мінімальна кількість опитувань аналогових датчиків струму і напруги повинна становити не менше 200 за період при частоті 50 Гц.

Згідно з вимогами до МК і умовами дослідного завдання, мікроконтролер повинен постійно здійснювати поточний контроль зазначених дослідних параметрів, що відображають його робочий стан, їх обробляти, передавати в ПК та забезпечувати аварійне відключення, залежно від їх поточних значень.

Виходячи з умов завдання в якості мікроконтролера для автоматизованої системи керування стендом доцільно вибрати ARM-мікроконтролер сімейства STM32, основні характеристики якого наведені в [8-11].

Основа функціональної схеми мікроконтролера STM32, що наведена в [8], складає багаторівнева 32-бітна матриця шин, яка зв'язує між собою основні вузли і пристрої. До них відносяться: 32-розрядний центральний процесор (ЦПУ), що включає АЛП, акумулятор з розширювачем, регістр слова стану, блок регістрів спеціальних функцій, пристрій керування і синхронізації, які розміщені всередині кристала МК; пам'ять програм – виконана у формі флеш-пам'яті і пам'ять даних – ОЗП місткістю до 192 Кбайт, які складають резидентну пам'ять; до 9 паралельних портів введення-виведення (ВВ); 17 таймерів 16-ти та 32-ох розрядних; два сторожових таймери; три 12-бітних АЦП на 24 входи та два 12-бітних ЦАП; велика кількість інших видів периферії та інше [8-11].

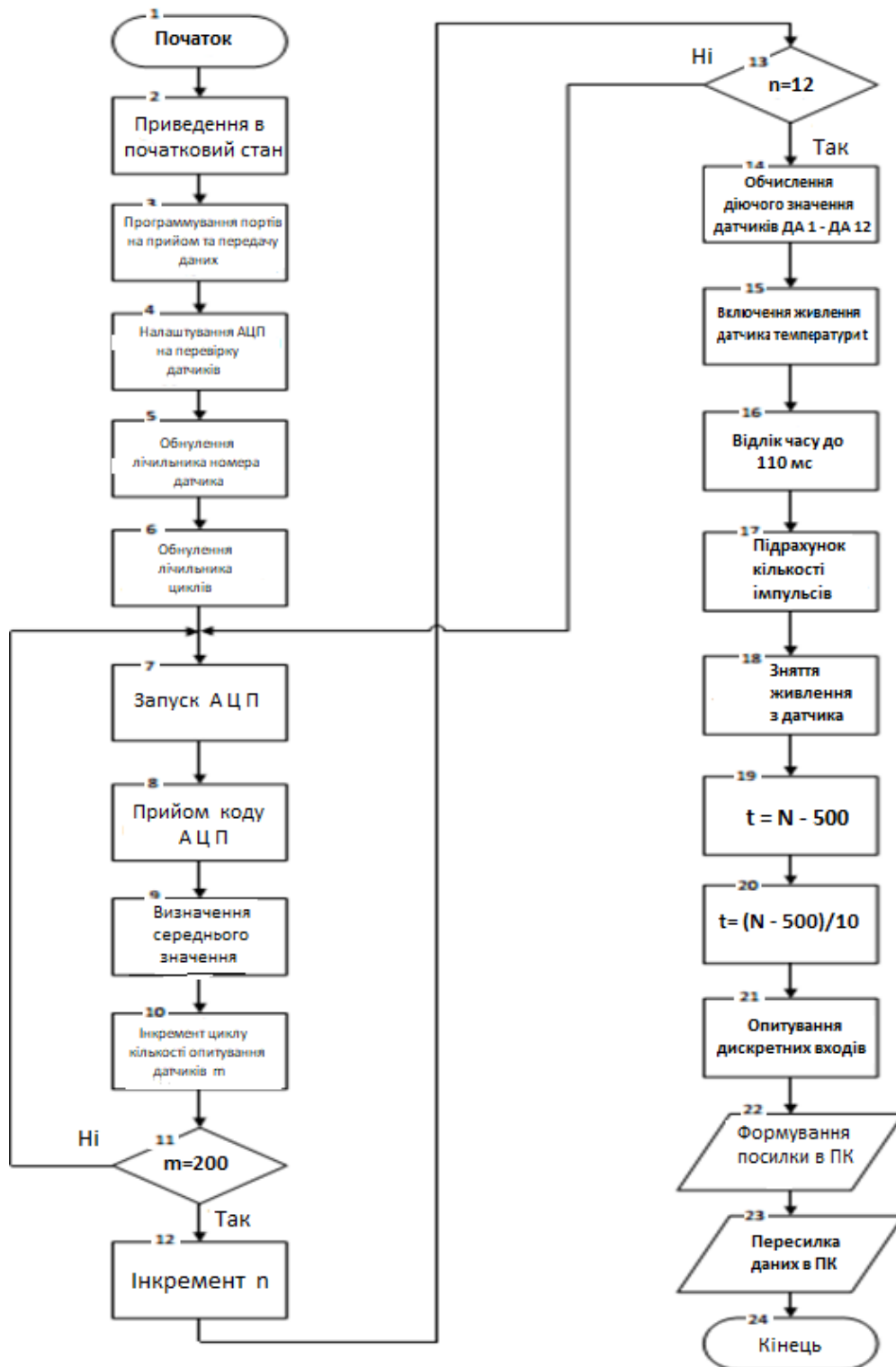


Рис. 2. Алгоритм роботи схеми автоматизованої системи керування технологічним процесом дослідження електричних апаратів

Ці мікроконтролери широко представлені на ринку та добре забезпечені програмним продуктом і засобами програмування та налагодження. Система на базі цього мікроконтролера здатна опитувати датчики з періодом 100 мкс, чого цілком достатньо для зняття поточних значень параметрів з необхідною точністю та забезпечення автоматизованого керування і захисту при аварійних ситуаціях. Мікроконтролер, відповідно до алгоритму, наведеному на рис. 2 і записаної в

пам'ять програми, керує процесом досліджень або випробувань, шляхом опитування із заданою періодичністю датчиків згідно з алгоритмом керування. Він з необхідною періодичністю оновлює керуючі слова на своїх вихідних портах. Деяка частина керуючого слова може інтерпретуватися як сукупність прямих двійкових сигналів керування, що через схеми формувачів сигналів (підсилювачі потужності, реле, оптрони та інше) або пристрої зв'язку з об'єктом (УСО1–УСО3)

надходять на виконавчі механізми, або пристрої силової установки. Компаратори К1–К3 є паралельним апаратним контуром для захисту від аварійних режимів в випадках виходу МК із ладу.

Висновки. Розроблена структурна схема автоматизованої системи стенда на базі МК STM32F4 та алгоритм її роботи дозволяють автоматизувати технологічний процес керування експериментальними дослідженнями або випробуваннями електричних апаратів, суттєво скоротити терміни і витрати на їх проведення, підвищити економічну ефективність і точність результатів.

Список літератури

- 1 Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Х.: «Точка», 2012. – 340 с. ISBN 978-617-669-015-3.
- 2 Правила улаштування електроустановок. ПУЕ. - Харків: Форт-2017.
- 3 Гришук Ю.С. Мікропроцесорні пристрої: навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 348с.
- 4 Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейств TinyMega фирмы "Atmel" - М.: Издат. дом "Додэка XXI", 2004. – 560 с.
- 5 Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристальных микроконтроллерах. – М.: «Энергоатомиздат», 1990 – 224 с.
- 6 Петин О.В., Щербак Е.Ф. Испытания электрических аппаратов. – М.: Высш. шк., 1985. – 215 с.
- 7 Гришук Ю.С. Основи наукових досліджень: навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 232 с.
- 8 Самый производительный микроконтроллер на ядре Cortex-M4// http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2012_5_96.pdf.
- 9 [https://pue8.ru/silovaya-elektronika/198-sistemy-vozbuzhdeniya-](https://pue8.ru/silovaya-elektronika/198-sistemy-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov.html)

- 10 <http://mirmarine.net/svm/539-sudovye-vspomogatelnye-dizel-generatory>;
- 11 <https://www.compel.ru/lib/53816>.

References (transliterated)

1. Klymenko B.V. *Elektrychni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs : navchalnyi posibnyk* [Electrical apparatus. Electromechanical switching, control and protection equipment. General course: study guide]. Kharkiv, Tochka Publ., 2012. 340 p. (Ukr).
2. *Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok. PUE.* - Kharkiv: Fort-2017.
3. Hryshchuk Yu.S. *Mikroprotsesorni prystroi: navchalnyi posibnyk* [Microprocessor devices: study guide]. Kharkiv: NTU «KhPI» Publ., 2008. 348 p. (Ukr).
4. Evstifeev A.V. *Mikrokontrollery AVR semejstv TinyMega firmy "Atmel"* [Atmel's TinyMega AVR microcontrollers]. Moscow: Izdat. dom "Dodjeka XXI", 2004. 560 p. (Rus).
5. Stashin V.V., Urusov A.V., Mologonцева O.F. *Proektirovanie cifrovyyh ustrojstv na odnokristal'nykh mikrokontrollerah* [Designing digital devices on single-chip microcontrollers] – Moscow: «Energoatomizdat», 1990. 224 p. (Rus).
6. Petinov O.V., Shherbakov E.F. *Ispytaniya jelektricheskikh apparatov* [Electrical Apparatus Tests]. Moscow: Vyssh. shk., 1985. 215 p. (Rus).
7. Hryshuk Yu.S. *Osnovy naukovykh doslidzhen: navchalnyi posibnyk* [Fundamentals of scientific research: study guide]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2008. 232 p. (Ukr).
8. http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2012_5_96.pdf.
9. <https://pue8.ru/silovaya-elektronika/198-sistemy-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov.html>;
10. <http://mirmarine.net/svm/539-sudovye-vspomogatelnye-dizel-generatory>;
11. <https://www.compel.ru/lib/53816>.

Надійшла (received) 20.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Гришук Юрій Степанович (Гришук Юрий Степанович, Hryshchuk Yuri Stepanovych) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7427-5419>; e-mail: grischukkpi@ukr.net.

Леценко Вячеслав Михайлович (Леценко Вячеслав Михайлович, Leshchenko Viacheslav Mikhailovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри автоматики і управління в технічних системах; м. Харків, e-mail: lvn@kpi.kharkov.ua

Пантеліят Михайло Гаррієвич (Пантеліят Михаил Гаррієвич, Panteliat Mikhail Garrievich) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com.

Варв'янська Вікторія Віталіївна (Варвянская Виктория Витальевна, Varvianska Viktoriia Vitaliivna), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри промислової і біомедицини електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: tvita62@gmail.com

Шевлюга Олексій Іванович (Шевлюга Алексей Иванович, Shevliuha Oleksii Ivanovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, кафедра електричних апаратів; м. Харків, e-mail: ashew415@gmail.com.