

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Проблеми
удосконалювання
електричних машин
і апаратів. Теорія
і практика**

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series:
Problems of electrical
machines and apparatus
perfection. Theory
and practice**

№ 2 (4) 2020

No 2 (4) 2020

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2020

Kharkiv
NTU «KhPI», 2020

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – № 2 (4). – 48 с. – ISSN 2079-3944.

У збірнику представлені результати досліджень в електроапаратобудуванні, електромашинобудуванні, енергетиці, техніки сильних електричних і магнітних полів, теоретичної електротехніки, електричних станцій та мереж, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців.

The publication is devoted to the results of research in electrical apparatus engineering, electrical engineering, energy, technology of strong electric and magnetic fields, theoretical electrical engineering, power stations and networks, as well as on the fundamental aspects of modern technology.

For scientists, high school lecturers, graduate students, students and professionals.

Свідectво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
КВ № 23781-13621Р від 14 лютого 2019 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України. Наказ № 886 (додаток 4) від 02.07.2020 р.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика», включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в базу журналів відкритого доступу DOAJ (Directory of Open Access Journals), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується в наукометричній базі Index Copernicus та пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://pema.khpi.edu.ua/>

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Редакційна колегія
Головний редактор:
Байда Є. І., д-р техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Харків,
Україна
Відповідальний секретар:
Варшамова І. С., ст. викладач, НТУ «ХПІ», Україна
Члени редколегії:
Баранов М. І., д-р техн. наук, с.н.с., НДПКИ "Молнія" НТУ
"ХПІ", Харків, Україна;
Кропачек О. Ю., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків,
Україна;
Плюгін В. Є., д-р техн. наук, проф., ХНУМГ, Харків,
Україна;
Середь О. Г., канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ", Харків,
Україна;
Шевченко С. Ю., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків,
Україна;
Clemens Markus, Prof. Dr., Bergische Universität Wuppertal,
Wuppertal, Germany;
Dolezel Ivo, Prof., University of West Bohemia. Plzen, Czech
Republic;
Gurevich Vladimir, Honorary Prof., Senior specialist of Central
Electric Lab., Israel Electric Corporation, Haifa, Israel;
Kasolis Fotios, Dr., Bergische Universität Wuppertal,
Wuppertal, Germany.
Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 7 від 29.12.2020 р.

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"
Editorial staff
Editor-in-chief:
Baïda E. I., dr. tech. sc., Ph. D. (Eng.), NTU "KhPI", Ukraine
Executive secretary:
Varshamova I. S., NTU "KhPI", Ukraine
Editorial staff members:
Baranov M. I., dr. tech. sc., prof, SRPDI "Molniya" NTU
"KhPI", Ukraine;
Kropachok O. Yu., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine;
Pliugin V. E., dr. tech. sc., prof., O.M.Beketov National
University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine;
Sereda O. G., Ph. D. (Eng.), NTU "KhPI", Ukraine;
Shevchenko S. Yu., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine;
Clemens Markus, Prof. Dr., Bergische Universität Wuppertal,
Wuppertal, Germany;
Dolezel Ivo, Prof., University of West Bohemia. Plzen, Czech
Republic;
Gurevich Vladimir, Honorary Prof., Senior specialist of Central
Electric Lab., Israel Electric Corporation, Haifa, Israel;
Kasolis Fotios, Dr., Bergische Universität Wuppertal,
Wuppertal, Germany.

О. М. ГРЕЧКО, В. О. ЗЕЛЕНСЬКИЙ

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД З ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ТА ЗАСОБІВ БОРОТЬБИ З НЕПРИПУСТИМИМИ ВІДХИЛЕННЯМИ НАПРУГИ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ У ПОБУТОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Вступ. Одним з шляхів підвищення рівня професійної підготовки інженерів-електромеханіків, що навчаються у вищих навчальних закладах України є використання в учбовому процесі сучасного інноваційного комутаційного обладнання, апаратури захисту, вимірювання та сигналізації тощо. Це дає можливість студентам набути високого рівня підготовки, що дозволить їм підвищити фахову компетентність, сприятиме їх професійному розвитку, надасть можливість стати кваліфікованими спеціалістами у подальшому житті. Даний напрямок розвитку навчання потребує значного фінансового вливання, яке не може бути реалізовано за рахунок державних коштів. На кафедрі «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» вдалось знайти альтернативні джерела фінансування – за рахунок коштів міжнародного гранту та спонсорської допомоги від низки електротехнічних компаній України. Продовженням обраного вектору розвитку є розробка лабораторної роботи з дослідження причин виникнення неприпустимих відхилень напруги мережі живлення у побутових приміщеннях та сучасних засобів боротьби з цим небезпечним явищем. **Актуальність.** Необхідність вивчення студентами проблеми захисту побутових споживачів від неприпустимих відхилень напруги у мережі живлення пов'язана з тим, що цього потребує сьогоденна ситуація, що склалась з технічним станом внутрішньо будинкових розподільчих мереж, який у більшості випадків є вкрай незадовільним. Неприпустимі відхилення напруги у побутовій мережі, в залежності від їх рівня, можуть призводити до скорочення термінів роботи коштового електрообладнання, виходу їх з ладу, а також до можливого їх займання. Тому ознайомлення на практиці студентів з причинами виникнення неприпустимих відхилень напруги у побутовій мережі, навчання їх засобам боротьби з цим явищем є актуальним завданням. **Мета.** Проектування та виготовлення лабораторного стенду для дослідження причин виникнення та засобів боротьби з неприпустимими відхиленнями напруги мережі живлення у побутових приміщеннях. **Результати.** Розроблений лабораторний стенд дає можливість студентам наочно розглянути процеси, що відбуваються загалом у трифазній електричній мережі після обриву нейтрального N провідника, та кількісно проаналізувати рівень провалів напруги і перенапруг при несиметричному навантаженні. Сучасні реле напруги для захисту побутових споживачів ZUBR D32 та ADECS ADC-0110-32, що застосовуються у розробленому лабораторному стенді, дозволяють студентам ознайомитись із особливостями їх монтажу, налаштування, експлуатації та функціонування. **Обговорення.** Розроблений на кафедрі «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» лабораторний стенд із дослідження причин виникнення та засобів боротьби з неприпустимими відхиленнями напруги мережі живлення у побутових приміщеннях дозволить підвищити фахову компетентність студентів, сприятиме їх професійному розвитку, та надасть можливість стати кваліфікованими спеціалістами у подальшому житті.

Ключові слова: лабораторний стенд, лабораторна робота, побутова мережа живлення, неприпустимі відхилення напруги мережі живлення, обрив нейтрального провідника.

А. М. ГРЕЧКО, В. А. ЗЕЛЕНСКИЙ

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СРЕДСТВ БОРЬБЫ С НЕДОПУСТИМЫМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ В БЫТОВЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Введение. Одним из путей повышения уровня профессиональной подготовки инженеров-електромехаников, обучающихся в высших учебных заведениях Украины является использование в учебном процессе современного инновационного коммутационного оборудования, аппаратуры защиты, измерения и сигнализации и т.п. Это дает возможность студентам приобрести высокий уровень подготовки, что позволит им повысить профессиональную компетентность, будет способствовать их профессиональному развитию, позволит стать квалифицированными специалистами в дальнейшей жизни. Данное направление развития обучения требует значительного финансового вливания, которое не может быть реализовано за счет государственных средств. На кафедре «Электрические аппараты» НТУ «ХПИ» удалось найти альтернативные источники финансирования – за счет средств международного гранта и спонсорской помощи от ряда электротехнических компаний Украины. Продолжением избранного вектора развития является разработка лабораторной работы по исследованию причин возникновения недопустимых отклонений напряжения питания в бытовых помещениях и современных средств борьбы с этим опасным явлением. **Актуальность.** Необходимость изучения студентами проблемы защиты бытовых потребителей от недопустимых отклонений напряжения в сети питания связана с тем, что этого требует сегодняшняя ситуация, которая сложилась с техническим состоянием внутридомовых распределительных сетей, которое в большинстве случаев является крайне неудовлетворительным. Недопустимые отклонения напряжения в бытовой сети, в зависимости от их уровня, могут привести к сокращению срока службы дорогостоящего электрооборудования, выхода их из строя, а также к возможному возгоранию. Поэтому ознакомление на практике студентов с причинами возникновения недопустимых отклонений напряжения в бытовой сети, обучение их средствам борьбы с этим явлением является актуальной задачей. **Цель.** Проектирование и изготовление лабораторного стенда для исследования причин возникновения и средств борьбы с недопустимыми отклонениями напряжения питающей сети в бытовых помещениях. **Результаты.** Разработанный лабораторный стенд дает возможность студентам подробно изучить процессы, происходящие в целом в трехфазной электрической сети после обрыва нейтрального N проводника, и количественно проанализировать уровень провалов напряжения и перенапряжений при несимметричной нагрузке. Современные реле для защиты бытовых потребителей ZUBR D32 и ADECS ADC-0110-32, применяемые в разработанном лабораторном стенде, позволяют студентам ознакомиться с особенностями их монтажа, настройки, эксплуатации и функционирования. **Обсуждение.** Разработанный на кафедре «Электрические аппараты» НТУ «ХПИ» лабораторный стенд по исследованию причин возникновения и средств борьбы с недопустимыми отклонениями напряжения питающей сети в бытовых помещениях позволит повысить профессиональную компетентность студентов, способствовать их профессиональному развитию, и позволит стать квалифицированными специалистами в дальнейшей жизни.

Ключевые слова: лабораторный стенд, лабораторная работа, бытовая сеть питания, недопустимые отклонения напряжения питания, обрыв нейтрального проводника.

О. М. GRECHKO, V. O. ZELENSKYI

LABORATORY BENCH FOR THE STUDY OF THE CAUSES AND MEANS OF COMBATING UNACCEPTABLE DEVIATIONS OF THE SUPPLY VOLTAGE IN DOMESTIC PREMISES

Introduction. One of the ways to improve the level of professional training of electrical engineers studying in higher educational institutions of Ukraine is to use in the educational process modern innovative switching equipment, protection, measurement and signaling equipment, etc. This gives students the opportunity to acquire a high level of training, which will allow them to improve their professional competence, contribute to their professional development, and allow them to become qualified specialists in later life. This direction of development of training requires a significant financial investment, which cannot be realized at the expense of public funds. At the Department of Electrical Apparatus of NTU «KhPI» it was possible to find alternative sources of funding – at the expense of an international grant and sponsorship from a number of electrical companies in Ukraine. The continuation of the selected vector of development is the development of laboratory work to study the causes of the occurrence of unacceptable deviations in the supply voltage in household premises and modern means of combating this dangerous phenomenon. **Relevance.** The need for students to study the problem of protecting household consumers from unacceptable voltage deviations in the power supply network is due to the fact that this is required by the current situation, which has developed with the technical condition of in-house distribution networks, which in most cases is extremely unsatisfactory. Unacceptable voltage deviations in the household network, depending on their level, can lead to a reduction in the service life of expensive electrical equipment, their failure, as well as a possible fire. Therefore, acquainting students in practice with the reasons for the occurrence of unacceptable voltage deviations in the household network, teaching them how to combat this phenomenon is an urgent task. **Purpose.** Design and manufacture of a laboratory stand for researching the causes of occurrence and means of dealing with unacceptable deviations in the supply voltage in domestic premises. **Results.** The developed laboratory stand allows students to study in detail the processes occurring in general in a three-phase electrical network after the break of the neutral N conductor, and to quantitatively analyze the level of voltage dips and overvoltages under asymmetrical load. Modern relays for the protection of household consumers ZUBR D32 and ADECS ADC-0110-32, used in the developed laboratory bench, allow students to familiarize themselves with the features of their installation, configuration, operation and functioning. **Discussion.** A laboratory stand developed at the Department of Electrical Apparatuses of NTU «KhPI» to study the causes of occurrence and means of combating unacceptable deviations of the supply voltage in household premises will increase the professional competence of students, contribute to their professional development, and will allow them to become qualified specialists in later life.

Key words: laboratory stand, laboratory work, household power supply, unacceptable deviations of the supply voltage, breakage of the neutral conductor.

Вступ. Підвищення рівня професійної підготовки інженерів-електромеханіків є загальним і завжди актуальним завданням для вищих навчальних закладів (ВНЗ) України, в яких проводиться навчання за відповідними електротехнічними спеціальностями. Одним з шляхів виконання цього завдання є використання в учбовому процесі, наприклад, при виконанні лабораторних робіт, сучасного комутаційного обладнання, апаратури захисту, вимірювання та сигналізації тощо. Це надасть можливість студентам набути високого рівня компетентності, що дозволить їм по закінченні ВНЗ знайти гідне місце роботи з відповідним рівнем заробітної плати.

На превеликий жаль, з причини катастрофічного браку коштів ВНЗ не в змозі самостійно проводити модернізацію лабораторій електротехнічних кафедр та оновлення її матеріально-технічної бази. Не була винятком і кафедра «Електричні апарати» НТУ «ХПІ», до якої відносяться і автори цієї статті.

Шляхом виходу з цього скрутного становища є пошук альтернативних джерел фінансування. Як показано в [1], на кафедрі «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» докорінне переобладнання навчальної лабораторії вдалось досягти за рахунок:

- 1) коштів гранту Фонду Александра фон Гумбольдта на загальну суму 20 тисяч Євро;
- 2) спонсорської допомоги від низки електротехнічними компаній України.

Завдяки отриманню сучасної комутаційної, захисної, вимірювальної та сигнальної апаратури з'явилась можливість впровадити до навчального процесу біля 15 нових лабораторних робіт з дослідження сучасних електричних апаратів та іншого електрообладнання.

Продовженням обраного вектору на модернізацію навчальної лабораторії кафедри «Електричні апарати» та забезпечення проведення навчального процесу на сучасному рівні є розробка ще однієї лабораторної роботи з дослідження причин виникнення неприпустимих відхилень напруги мережі живлення у побутових приміщеннях та сучасних засобів боротьби з цим небезпечним явищем.

Актуальність теми. Необхідність вивчення сту-

дентами проблеми захисту побутових споживачів від неприпустимих відхилень напруги у мережі живлення пов'язана з тим, що цього потребує сьогоденна ситуація, що склалась з технічним станом внутрішньо будинкових розподільчих мереж [2], який у більшості випадків є вкрай незадовільним. У вільному медійному доступі можна знайти безліч прикладів [3-5], коли замість належних 220 В у розетці споживача виникає небезпечне відхилення напруги, яке, в залежності від його рівня, може призвести до скорочення термінів роботи електрообладнання, виходу їх з ладу, а також, іноді, до можливого їх займання [6-9]. Тому ознайомлення на практиці студентів з причинами виникнення неприпустимих відхилень напруги у побутовій мережі, а також навчання їх засобам боротьби з цим явищем є, безумовно, актуальним завданням. До того ж огляд і аналіз публікацій показав відсутність у відкритому доступі опису подібних лабораторних робіт на інших електротехнічних кафедрах ВНЗ України.

Тому **метою даної роботи** є проектування та виготовлення лабораторного стенду для дослідження причин виникнення та засобів боротьби з неприпустимими відхиленнями напруги мережі живлення у побутових приміщеннях.

Слід зазначити, що в даній роботі буде акцентовано увагу саме на відхиленнях напруги та засобах боротьби з ними, та не будуть розглянуті питання стосовно способів захисту людини від ураження електричним струмом у випадку прямих і непрямих дотиків, що детально розглянуті в [10, 11].

Аналіз причин виникнення неприпустимих відхилень напруги мережі живлення у побутових приміщеннях. Згідно [п. 1.7.61, 12] живлення електроустановок напругою до 1 кВ у житлових будинках слід виконувати з використанням системи уземлення TN-S. На жаль більшість житлового фонду України спроектовано із використанням системи уземлення TN-C [11, 12], що не відповідає новим вимогам ПУЕ, адже експлуатація таких будівель почалась ще до введення у дію нових положень.

Відомо, що у системах уземлення TN-C поєднання

робочого нейтрального провідника (N провідника) та захисного уземлювального провідника (PE провідника) в одному провіднику (PEN провіднику) відбувається в усій системі (рис. 1,а). Недоліком системи уземлення TN-C є те, що по PEN провіднику у випадку несиметричного навантаження (що зазвичай і характерно для побутових споживачів у житлових будинках) протікає як номінальний струм (у випадку номінального режиму), так і аварійний струм (у випадку перенавантаження або ж короткого замикання). А якщо додати до цього значне збільшення навантаження на мережу за рахунок використання потужних побутових електроприладів (кондиціонерів, електроводонагрівачів, прасок, електрочайників тощо), то сумарна термічна дія струму завдає значного впливу на місця приєднання PEN провіднику. У разі відсутності догляду за станом розподільної мережі з боку енергопостачальних організацій це з часом призводить до погіршення електричного контакту, збільшення перехідного опору, підгоряння проводу, і, як наслідок, – до обриву PEN провідника (рис. 1, б).

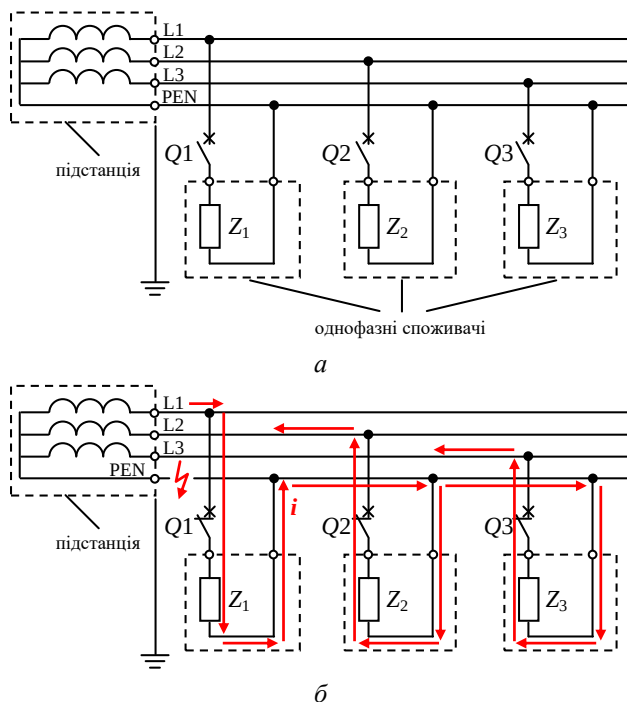


Рис. 1. Системи уземлення TN-C (а – нормальний стан, б – аварійний стан у разі обриву PEN провідника)

У цьому випадку, в залежності від повного опору навантаження Z_1 , Z_2 , Z_3 (більш потужні увімкнені електроприлади мають менший опір, а менш потужні електроприлади – більший опір) у мережі живлення побутових споживачів будуть спостерігатись певні рівні відхилення напруги (або перенапруги або провалів напруги [6, 10]), причому на більш потужному увімкненому навантаженні виникатиме провал напруги, а на менш потужному навантаженні з'явиться перенапруга.

Така ж сама ситуація з відхиленням напруги буде спостерігатись при обриві N провідника у разі використання систем уземлення TN-S (рис. 2,а) або TN-C-S

(рис. 2,б). Система TN-S, в якій застосовуються спеціальні п'ятипровідні кабелі і передбачається розділення робочого нейтрального N провідника та захисного уземлювального PE провідника в усій системі, вважається найбільш безпечною з усіх систем з точки зору захисту від ураження електричним струмом, а ось від відхилень напруги такі заходи не рятують.

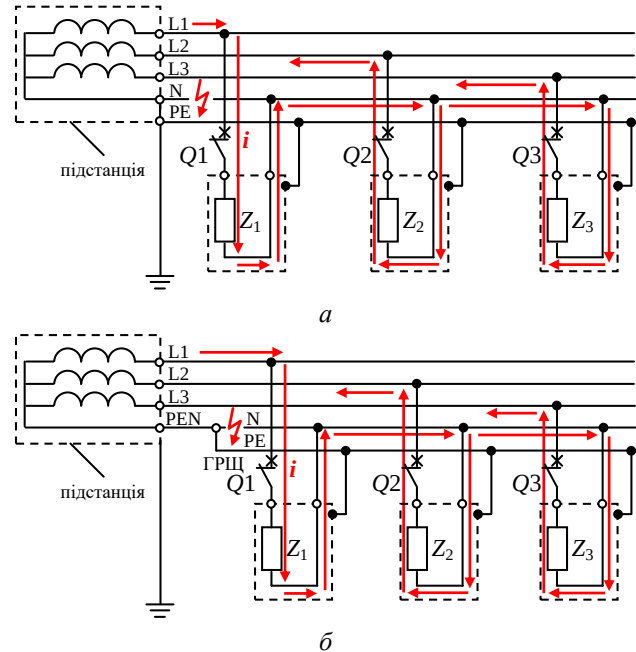


Рис. 2. Шлях протікання струмів у системах уземлення TN-S (а) та TN-C-S (б) у разі обриву N провідника

Синтезом систем TN-C та TN-S є чотирипровідна система уземлення TN-C-S, у якій розділення PEN провідника на робочий нейтральний N провідник та на захисний уземлювальний провідник PE відбувається на вводі у житловий будинок у груповому розподільному щиті (ГРЩ). Це дає змогу використовувати, по-перше, більш дешеві чотирипровідні кабелі, що йдуть від підстанцій, а, по-друге, організувати способи захисту людини від ураження електричним струмом у випадку прямих і непрямих дотиків. Але, так само, ці заходи не рятують від небезпечних відхилень напруги у разі обриву N провідника.

Отже, як бачимо, незалежно від різновиду системи уземлення у разі обриву N провідника на ділянці від підстанції до розподільних пристроїв і квартирних або поверхових щитків на навантаженні однофазних споживачів будуть спостерігатись певні рівні відхилення напруги.

Загальний огляд засобів боротьби від неприпустимих відхилень напруги в мережі живлення. На теперішній час існують різні рішення щодо боротьби з неприпустимими відхиленнями напруги в мережі живлення у побутових приміщеннях, серед яких можна виділити найбільш поширені, а саме:

- застосування пристроїв, що підвищують якість електроенергії [6] – обмежувачі імпульсних перенапруг, стабілізатори напруги, джерела безперебійного живлення;
- застосування спеціальних електричних апаратів

захисту [7-9] – автоматичні перемикачі фаз; модульні автоматичні відмикачі з розчіплювачами мінімальної і максимальної напруги; реле напруги.

Основними недоліком першої групи – пристроїв, що підвищують якість електроенергії, – є значні габаритні розміри і відносно висока вартість, що суттєво обмежує їх застосування побутовими споживачами.

Відносно другої групи – спеціальних електричних апаратів захисту, – то слід зазначити, що автоматичні перемикачі фаз застосовуються у трипровідній мережі живлення, та можуть встановлюватись для захисту споживачів, що мешкають у приватному секторі, котеджах тощо, та є не актуальними для захисту саме побутових однофазних споживачів.

Щодо використання модульних автоматичних відмикачів з розчіплювачами мінімальної і максимальної напруги, то, як показано в [7], основними їх недоліками є:

- відсутність функції автоматичного повторного увімкнення при стабілізації напруги в мережі;
- фіксовані значення рівнів напруги і часу спрацьовування розчіплювачів, які є значно меншими за гранично допустимі рівні як відхилення напруги, так і їх тривалості (особливо при підвищеній нарузі), що може викликати помилкові відключення споживачів при короточасних відхиленнях напруги в межах допустимих рівнів.

Виходячи з цього, найбільш поширеним засобом боротьби від неприпустимих відхилень напруги в мережі живлення побутових однофазних споживачів є застосування реле напруги.

Як детально проаналізовано у роботах [8, 9], реле напруги класифікуються за багатьма критеріями, мають широкі функціональні можливості, певні переваги та недоліки, та виробляються багатьма як закордонними, так і вітчизняними електротехнічними компаніями.

Розробка лабораторного стенду. Зважаючи на вартість реле напруги від різних виробників та беручи до уваги обмежені фінансові можливості, для розробки лабораторного стенду обрані два типи реле напруги для захисту побутових однофазних споживачів електричної енергії від неприпустимих відхилень напруги в мережі живлення, що широко представлені на електротехнічному ринку України, а саме:

- реле напруги ZUBR D32 [13] – рис. 3,а;
- реле напруги ADECS ADC-0110-32 [14] – рис. 3,б.

Технічні характеристики реле напруги ZUBR D32 (надалі – ZUBR) наведені у табл. 1, а реле напруги ADECS ADC-0110-32 (надалі – ADECS) – у табл. 2.

Конструкційною основою стенду є 4 з'єднані між собою певним чином деталі з ДСП із загальними габаритними розмірами (Д×Ш×В) 900×450×600 мм, причому для проведення різних дослідів у лабораторній роботі використовуються обидві сторони стенду, що відрізняються одна від одної.



Рис. 3. Реле напруги ZUBR D32 (а) та ADECS ADC-0110-32 (б)

Таблиця 1 – Технічні характеристики реле напруги ZUBR D32

№	Параметр	Значення
1	Напруга живлення, В	100-400
2	Межі напруги, В	- верхня 220-280 - нижня 120-210
3	Номинальний струм, А	32
4	Максимальний струм упродовж 10 хв, А	40
5	Час вимикання при перевищенні напруги, с	<0,05
6	Час вимикання при зниженні напруги, с	<1,2
7	Час затримки при увімкненні, с	3-600
8	Номинальна повна потужність навантаження, кВА	7,0
9	Маса, г	210
10	Габарити (Д×Ш×В), мм	70×53×85
11	Перетин проводу для підключення, мм ²	<16
12	Електрична зносостійкість, циклів	<10 000
13	Механічна зносостійкість, циклів	<100 000
14	Ступінь захисту	IP20

Таблиця 2 – Технічні характеристики реле напруги ADECS ADC-0110-32

№	Параметр	Значення
1	Напруга живлення, В	100-400
2	Межі напруги, В	- верхня 245-280 - нижня 150-195
3	Максимальний струм навантаження, А	32
4	Мінімальний час вимикання, с	0,02
5	Час затримки при вимиканні, с	0,005-600
6	Час затримки при увімкненні, с	10-990
7	Максимальна похибка виміру напруги, %	1
8	Діапазон виміру струму, А	1-100
9	Похибка виміру струму, %	5
10	Маса, г	155
11	Габарити (Д×Ш×В), мм	95×53×66
12	Ступінь захисту	IP20

Перша із сторін стенду (рис. 4) призначена для проведення досліджень з паралельного (ліва частина стенду) і послідовного (права частина стенду) підключення навантаження до однофазного джерела живлення. Принципова схема першої сторони стенду наведена на рис. 5.

Коротко розглянемо принцип роботи схеми. При підключенні стенду за допомогою вилки XP1 до стаціонарного столу із розеткою живлення XS1 напруга через увімкнений двополосний відмикач Q1 подається на дві паралельно з'єднані розетки XS2, до яких студенти мають можливість підключити навантаження різної потужності (лампи розжарювання або ж електропобутові прилади – праску, фен, чайник тощо) та за допомогою цифрового комбінованого амперметр-вольтметра PA1-PV1 наочно встановити струм і напругу у колі навантаження.

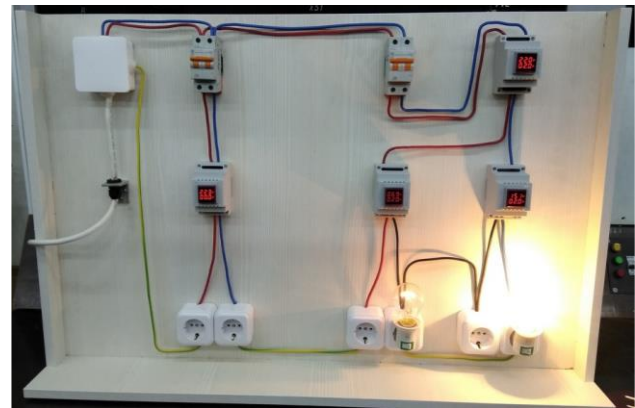


Рис. 4. Перша сторона стенду

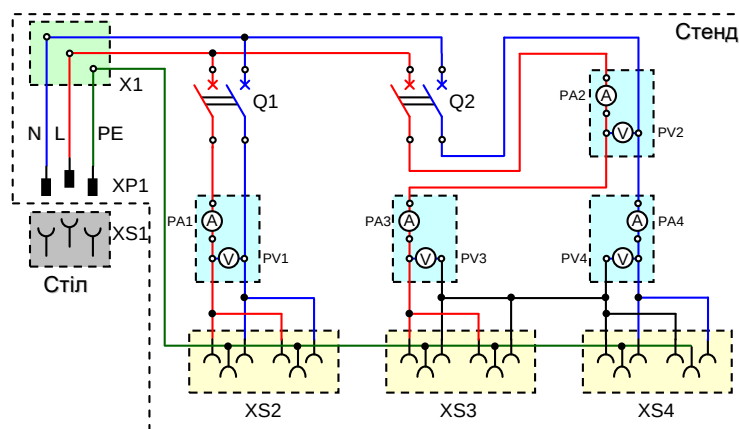


Рис. 5. Принципова схема першої сторони стенду з дослідження паралельного і послідовного підключення навантаження до однофазного джерела живлення

Аналогічним чином функціонує і права частина стенду для дослідження послідовного підключення навантаження до однофазного джерела живлення. Через увімкнений двополосний відмикач Q2 напруга подається на послідовно з'єднані розетки XS3, XS4. Причому існує можливість виміряти струм і напругу як окремо в розетках XS3, XS4 (за допомогою амперметр-вольтметрів PA3-PV3 та PA4-PV4), так і у загальному колі за допомогою амперметр-вольтметра PA2-PV2. Підключаючи послідовно навантаження різної потужності можна наочно встановити, що на більш потужному увімкненому навантаженні виникатиме провал напруги, а на менш потужному навантаженні з'явиться перенапруга.

Дані досліді є відносно простими і необхідність їх проведення студентами полягає у наочності результатів дослідження та у підготовці до проведення більш складних дослідів, у яких використовується друга сторона стенду (рис. 6). На ній розміщено обладнання для дослідження процесів, що виникають у трифазній мережі електропостачання із системою уземлення TN-C-S у разі обриву N провідника. Як бачимо, розроблений лабораторний стенд являє собою макет ділянки реальної схеми розподілу електропостачання у житлових багатоповерхових будинках, коли до кожної з трьох фаз А, В, С рівномірно підключаються однофазні споживачі – квартири (права частина стенду на

рис. 6). Принципова схема другої сторони стенду наведена на рис. 7.

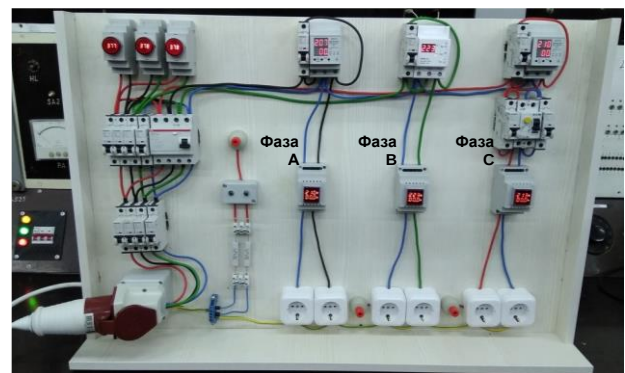


Рис. 6. Друга сторона стенду

Розглянемо принцип роботи схеми. Лабораторний стенд через п'ятиконтактний роз'єм XP2 за допомогою гнучкого кабелю з роз'ємами XP1 – XS2 підключається до стаціонарного столу із п'ятиконтактною розеткою трифазного джерела живлення XS1. Через чотириполюсний відмикач Q1, розташований на столі, трифазна напруга подається на лабораторний стенд через чотири однополюсні відмикачі Q2 – Q5, а загоряння сигнальних ламп HL1 – HL3 свідчить про наявність напруги у кожній з фаз, яка вимірюється вольтметрами PV1 – PV3.

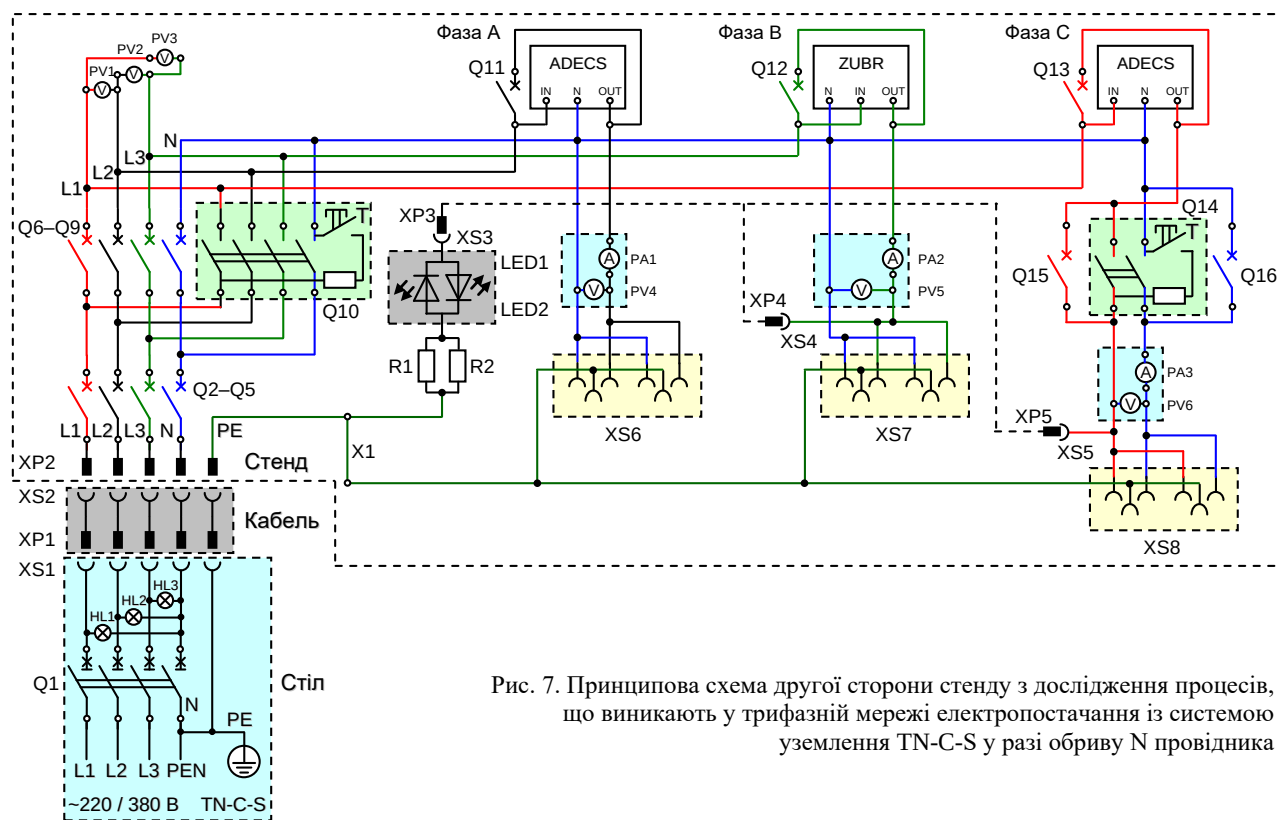


Рис. 7. Принципова схема другої сторони стенду з дослідження процесів, що виникають у трифазній мережі електропостачання із системою уземлення TN-C-S у разі обриву N провідника

Обрив нейтрального N провідника у розробленому лабораторному стенді імітується шляхом вимикання відмикача Q5.

Далі трифазна напруга через чотириполюсний апарат (відмикач) захисту від різницевих струмів Q10 із різницеvim струмом спрацьовування $I_{\Delta n} = 300$ мА подається до однофазних споживачів. Наявність у схемі апарату захисту від різницевих струмів Q10 йде у розріз із реальними схемами електропостачання до однофазних споживачів, але його присутність у схемі дозволяє розширити перелік дослідів, що проводяться, та змодельовати ситуацію із захистом трифазних споживачів при обриві N провідника, наприклад, у замиському будинку, котеджі тощо, де на увід може подаватись саме трифазна напруга. Апарат захисту від різницевих струмів Q10 може бути зашунтований за допомогою чотирьох однополюсних відмикачів Q6 – Q9. У цьому випадку схема електропостачання однофазних споживачів набуває типовий вигляд.

У правій частині стенду спроектовано підключення однофазних споживачів до кожної з трьох фаз A, B, C. Відмінність складу кожного з підключень полягає:

- у застосуванні у фазах A і C реле напруги ADECS, а у фазі B – реле напруги ZUBR;
- у захисті, підключених до фази C, однофазних споживачів шляхом застосування двополюсного апарату захисту від різницевих струмів Q14 із різницеvim струмом спрацьовування $I_{\Delta n} = 30$ мА, який може бути, у разі необхідності, для проведення певних дослідів, зашунтований двома однополюсними відмикачами Q15, Q16. У цьому випадку відмінність підключень полягатиме лише у типі реле напруги, що застосовується.

Для дослідження процесів, які відбуваються у навантаженні кожної з фаз у випадку, якщо воно не захищене за допомогою реле напруги, передбачені три однополюсні відмикачі Q11 – Q13, які в увімкненому стані шунтують відповідні реле напруги.

Як і раніше, за допомогою цифрових комбінованих амперметрів-вольтметрів (PA1-PV4, PA2-PV5, PA3-PV6) вимірюються значення струму і напруги у кожній з фаз, а до подвійних розеток XS6 – XS8 є можливість підключити навантаження різної потужності.

У розробленому стенді існує можливість дослідити спрацьовування апаратів захисту від різницевих струмів Q10 і Q14. Для цього з лінійних провідників фаз B і C, а саме – з розеток XS7, XS8 виведені контрольні точки-роз'єми XS4, XS5. За допомогою шунтуючих провідників XP3 – XP4 (або XP3 – XP5) ці контрольні точки-роз'єми підключаються до роз'єму XS3, послідовно з яким встановлено два світлодіоди LED1, LED2, що з'єднані зустрічно-паралельно, та два керамічні резистори, що з'єднані паралельно, та з'єднані із захисним уземлювальним провідником PE. Параметри резисторів розраховано таким чином, щоб при їх підключенні через шунтуючий провідник до одного з лінійних провідників відбувалось одночасне загоряння обох світлодіодів LED1, LED2, що імітують дотик людини до лінійного провідника та протікання через його тіло струму (світлодіоди, що світяться, певним чином нагадують «очі людини»). При спрацьовуванні апаратів захисту від різницевих струмів Q10 і/або Q14 світлодіоди LED1, LED2 згасають, що свідчить про знеструмлення навантаження та припинення протікання струму через тіло людини.

Приклади проведення досліджень. Перед почат-

ком дослідження до подвійних розеток XS6 – XS8 необхідно підключити симетричне навантаження, наприклад, лампи розжарювання однакової потужності. Відмикачами Q11 – Q13 шунтуємо усі реле напруги (в даному стані вони грають роль вольтметрів), відмикачами Q15, Q16 також шунтуємо апарат захисту від різницевого струму Q14, а відмикачами Q6 – Q9 – апарат захисту від різницевого струму Q10. Далі подаємо на схему трифазну напругу через відмикачі Q2 – Q5. Оскільки нейтральний N провідник через увімкнений відмикач Q5 присутній на схемі, то у такому початковому стані ніякої аварійної ситуації не спостерігається, а всі вимірювальні прилади з урахуванням похибки показують відповідні значення напруги і струму. Якщо навіть в даний момент вимкнути відмикач Q5, змодельовавши тим самим обрив нейтрального N провідника, то і в цьому випадку ніяких змін не відбудеться, оскільки навантаження у фазах А, В, С є однаковим. Якщо ж до розеток XS6 – XS8 підключити навантаження різної потужності, тобто змодельувати несиметричне навантаження, що і характерно для побутових споживачів у житлових будинках, та обірвати при цьому нейтральний N провідник, вимкнувши відмикач Q5, то вольтметри на фазах із більш потужним навантаженням покажуть провал напруги, а вольтметри на фазах із менш потужним навантаженням відповідно покажуть перенапругу. Очевидно, що рівні провалів і перенапруг залежатимуть від співвідношення потужностей навантаження у фазах.

Надалі вводимо до схеми реле напруги, вимикаючи відмикачі Q11 – Q13, причому не обов'язково вводити у роботу відразу усі реле напруги – можна залишити якусь із фаз «незахищеною». Задаючись межами напруги, при якому спрацьовують реле, проводимо дослідження щодо рівня захисту навантаження від провалів напруги і перенапруг у «захищених» і «незахищених» споживачів.

Вимкнувши відмикачі Q15, Q16 у фазі С та увівши до схеми апарат захисту від різницевого струму Q14, моделюємо дотик людини до лінійного провідника – апарат спрацьовує, знеструмлюючи навантаження у фазі С. Якщо ж повторити такий дослід у фазі В, навантаження якої не захищене апаратом захисту від різницевого струму, то можна наочно побачити необхідність довгої тривалості протікання струму через «тіло людини», що у випадку реальної ситуації в житті може бути смертельно небезпечним.

Наостанок, вимкнувши відмикачі Q6 – Q9 подаємо на схему трифазну напругу, увімкнувши апарат захисту від різницевого струму Q10. При одночасно увімкнених двох апаратах захисту від різницевого струму Q10 і Q14 можна дослідити селективність їх спрацьовування, що полягає у вимиканні найближчого до місця аварії (дотику) апарату.

Висновки.

Завдяки розробленому на кафедрі «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» лабораторному стенду студенти електротехнічних спеціальностей можуть досліджувати причини виникнення та засоби боротьби з неприпустимими відхиленнями напруги мережі живлення у

побутових приміщеннях.

Лабораторний стенд дає можливість студентам наочно розглянути процеси, що відбуваються загалом у трифазній електричній мережі після обриву нейтрального N провідника, та кількісно проаналізувати рівень провалів напруги і перенапруг при несиметричному навантаженні.

Сучасні реле напруги для захисту побутових споживачів ZUBR D32 та ADECS ADC-0110-32, що застосовуються у розробленому лабораторному стенді, дозволяють студентам ознайомитись із особливостями їх монтажу, налаштування, експлуатації та функціонування.

Таким чином, розроблений на кафедрі «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» лабораторний стенд із дослідження причин виникнення та засобів боротьби з неприпустимими відхиленнями напруги мережі живлення у побутових приміщеннях дозволить підвищити фахову компетентність студентів, сприятиме їх професійному розвитку, та надасть можливість стати кваліфікованими спеціалістами у подальшому житті.

Список літератури

1. Клименко Б.В., Чепелюк О.О., Пантелют М.Г. Сучасна лабораторія – сучасна освіта: докорінне переобладнання навчальної лабораторії кафедри «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – № 1. – С. 76-86. Режим доступу: <http://pema.khpi.edu.ua/article/view/2079-3944.2019.1.13/187172>. doi: 10.20998/2079-3944.2019.1.13.
2. Чепелюк А.А., Хлобыстин А.Л. О влиянии технического состояния внутридомовых распределительных сетей на электробезопасность бытовых однофазных потребителей электрической энергии // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2011. – № 60. – С. 46-53. Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/17458/1/vestnik_HPI_2011_60_Chepelyuk_O_vliyanii.pdf.
3. У Чернігові через перевантаження електромережі у мешканців під'їзду на вулиці Белова, 12-А згоріли електроприлади. Електронний ресурс: <https://cn.suspilne.media/news/7053>.
4. Компенсацію за згорілі прилади вимагають жителі Солом'янського району. Електронний ресурс: <https://www.youtube.com/watch?v=pKK9COeqkV4>.
5. У жителів Луцька серед ночі погоріла вся побутова техніка. Електронний ресурс: <https://www.youtube.com/watch?v=y5r9E37BU4>.
6. Чепелюк А.А., Хлобыстин А.Л. Анализ проблемы защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2012. – № 28. – С. 54-64. Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/10025/1/vestnik_HPI_2012_28_Chepelyuk_Analiz.pdf.
7. Чепелюк А.А. Анализ функциональных особенностей защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети модульными автоматическими выключателями с расцепителями минимального и максимального напряжения // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2013. – № 35 (1008). – С. 24-31. Режим доступу: <http://pema.khpi.edu.ua/article/view/19405/17005>.
8. Чепелюк А.А. Анализ функциональных особенностей реле напряжения с фиксированными параметрами срабатывания и автоматическим повторным включением для защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2013. – № 65 (1038). – С. 53-62. Режим досту-

- пу: <http://pema.khpi.edu.ua/article/view/22650/20270>.
9. Чепелюк А.А. К вопросу классификации реле напряжения для защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2014. – № 41 (1084). – С. 25-36. Режим доступу: <http://pema.khpi.edu.ua/article/view/44800/40988>.
 10. Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
 11. Клименко Б.В. Электричні апарати. Загальний курс: навчальний посібник (видання друге, допрацьоване та доповнене). – Харків: Вид-во «Точка», 2013. – 400 с.
 12. Правила улаштування електроустановок. – Х. : «Форт», 2017. – 760 с.
 13. ZUBR D32. Технический паспорт. Инструкция по установке и эксплуатации. Электронный ресурс: http://www.zubr.ua/files/zubr_d16-63_ua_vd56_200304.pdf.
 14. Реле напряжения ADECS ADC-0110-32. Инструкция по установке и эксплуатации. Электронный ресурс: https://storage.ua.prom.st/1224020_instruktsiya_po_ekspluatatsii_adc0110_11_v2_lq.pdf.
- References (transliterated)**
1. Klymenko B.V., Chepeliuk O.O., Pantelyat M.G. Modern laboratory – modern education: radical re-equipment of the educational laboratory of the «Electrical Apparatus» department of the NTU «KhPI». *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2019, no. 1, pp. 76-86. (Ukr). doi: 10.20998/2079-3944.2019.1.13.
 2. Chepelyuk A.A., Khlobystin A.L. Influence of technical conditions in intrahouse distributive networks on the electrical security of household single-phase consumers of electric energy. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2011, no. 60, pp. 46-53. Available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/17458/1/vestnik_HPI_2011_60_Chepelyuk_O_vliyanii.pdf. (Rus).
 3. <https://cn.suspilne.media/news/7053>. (Ukr).
 4. <https://www.youtube.com/watch?v=pKK9COeqkV4>. (Ukr).
 5. <https://www.youtube.com/watch?v=y5r9E37BJU4>. (Ukr).
 6. Chepeljuk A.A., Khlobystin A.L. Protection of household single-phase consumers against inadmissible deviations of the power line voltage. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2012, no. 28, pp. 54-64. Available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/10025/1/vestnik_HPI_2012_28_Chepelyuk_Analiz.pdf. (Rus).
 7. Chepeliuk O.O. Analysis of functional peculiarities of domestic single-phase customers protection for inadmissible voltage deviations in supply main by modular circuit breakers with undervoltage and overvoltage releases. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2013, no. 35 (1008), pp. 24-31. Available at: <http://pema.khpi.edu.ua/article/view/19405/17005>. (Rus).
 8. Chepeliuk O.O. The analysis of the functional characteristics of the voltage relay with fixed parameters of operation and automatic reclosing-eat to protect domestic single-phase electricity consumers from harmful voltage variations in the mains. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2013, no. 65 (1038), pp. 53-62. Available at: <http://pema.khpi.edu.ua/article/view/22650/20270>. (Rus).
 9. Chepeliuk O.O. On the question of the classification of the voltage relay for the protection of domestic single-phase consumers from unacceptable voltage fluctuations in the mains. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2014, no. 41 (1084), pp. 25-36. Available at: <http://pema.khpi.edu.ua/article/view/44800/40988>. (Rus).
 10. 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).
 11. Klymenko B.V. *Elektrychni aparaty. Zahalnyi kurs: navchalnyi posibnyk (vydannia druhe, dopratsovane ta dopovnene)* [Electrical apparatus. General course: study guide. 2nd edition, revised and enlarged]. Kharkiv, Tochka Publ., 2013. 400 p. (Ukr).
 12. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations]. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
 13. ZUBR D32. Available at: http://www.zubr.ua/files/zubr_d16-63_ua_vd56_200304.pdf. (Rus).
 14. ADECS ADC-0110-32. Available at: https://storage.ua.prom.st/1224020_instruktsiya_po_ekspluatatsii_adc0110_11_v2_lq.pdf. (Rus).

Надійшла (received) 20.03.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Гречко Олександр Михайлович (Гречко Александр Михайлович, Grechko Oleksandr Myhaylovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-8585>; e-mail: a.m.grechko@gmail.com.

Зеленський Валерій Олександрович (Зеленский Валерий Александрович, Zelenskyi Valeriy Oleksandrovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: avivaleraz@gmail.com.

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 пропонується 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 автоматики 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 вживанні 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.

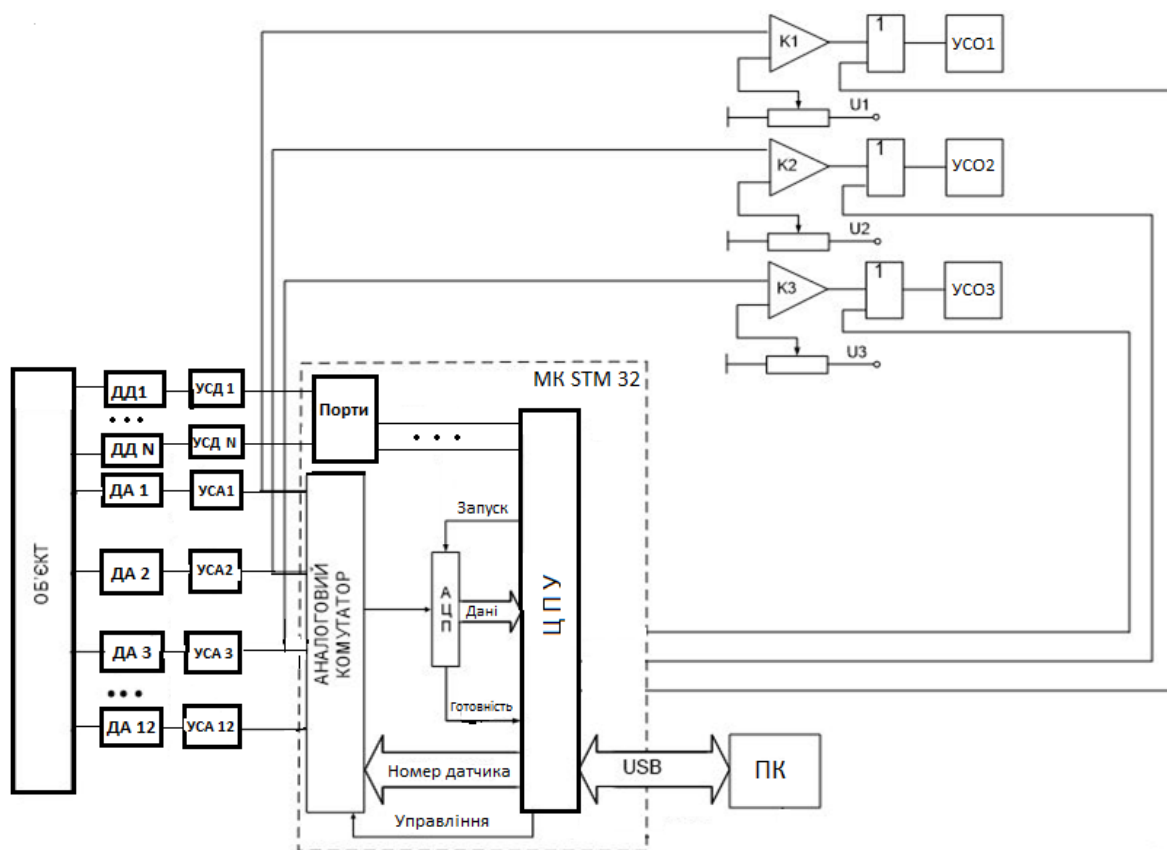


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи керування стендом для випробувань та досліджень електричних апаратів

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 потужнострумових 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].

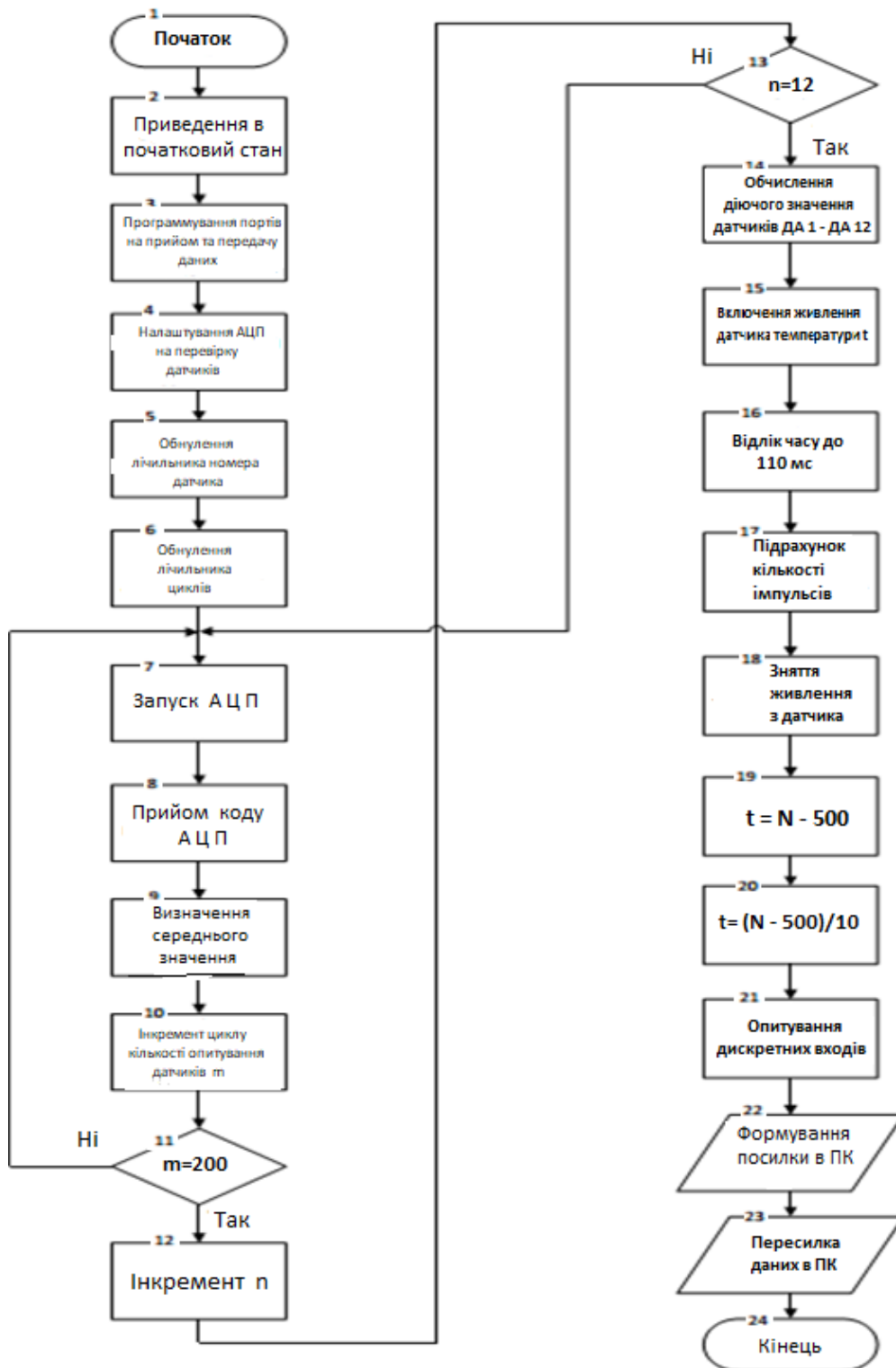


Рис. 2. Алгоритм роботи схеми автоматизованої системи керування технологічним процесом дослідження електричних апаратів

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, keruvannya 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 odnokristalnykh 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 Гарриевич, 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 біомедицинської 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.

С.О. МАКЄЄВ, С.В. ВИРОВЕЦЬ

СУЧАСНА АПАРАТУРА ТА ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

У статті розглянуті сучасні системи «розумного дама» для квартир, офісів, готелів та інших житлових комплексів. Основні напрямки автоматизації кожної з представлених систем. Управління освітленням, кліматом, шторами, управління аудіо/відео, дистанційне керування, енергетичний менеджмент, моніторинг стану, вимірювання і контроль побутової техніки. Також розглянуто програмне забезпечення для кожної з представлених систем.

Ключові слова: розумний будинок, автоматизація, програмне забезпечення, клімат, освітлення, комфорт.

С.О. МАКЕЕВ, С.В. ВЫРОВЕЦ

СОВРЕМЕННАЯ АППАРУТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМ «УМНЫЙ ДОМ»

В статье рассмотрены современные системы «умного дама» для квартир, офисов, отелей и прочих жилых комплексов. Основные направления автоматизации каждой из представленных систем. Управление освещением, климатом, шторами, управление аудио/видео, удаленное управление, энергетический менеджмент, мониторинг состояния, измерения и контроль бытовой техники. Также рассмотрено программное обеспечение для каждой из представленных систем.

Ключевые слова: умный дом, автоматизация, программное обеспечение, климат, освещение, комфорт.

S.O. MAKIEIEV, S.V. VYROVETS

MODERN APPARATUS AND EQUIPMENT OF THE "SMART HOUSE" SYSTEMS

The article deals with modern "smart lady" systems for apartments, offices, hotels and other residential complexes. The main directions of automation of each of the systems presented. Lighting, climate, curtain control, audio / video control, remote control, energy management, condition monitoring, measurement and control of household appliances. The software for each of the presented systems will also be considered.

Key words: smart home, automation, software, climate, lighting, comfort.

Вступ. Розумний будинок - це мережа приладів, яку об'єднує контролюючий пристрій. Управління цією павутиною здійснюється або безпосередньо з пульта, або зі смартфона або планшета господаря. Те, що здавалося раніше дивом і незрозумілим чином майбутнього, стає просто ще однією стороною у повсякденному житті простих споживачів. За способом управління розумні будинки можна розділити на три групи:

1. централізовані системи автоматизації;
2. розподілені або децентралізовані системи;
3. комбіновані схеми управління.

Існує ще одна класифікація систем розумний будинок. За способом передачі інформації їх можна розділити на дві групи: провідні і бездротові системи.

На рис. 1 зображені основні елементи автоматизації розумного будинку.

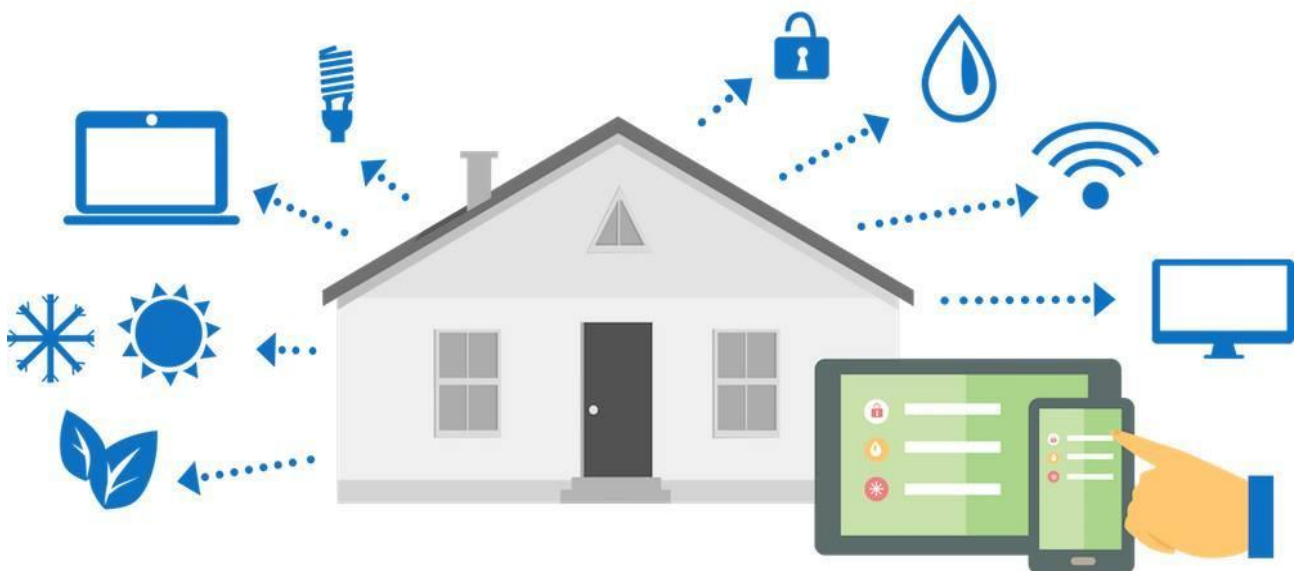


Рис. 1. Основні елементи та можливості автоматизації «розумного будинку»

Централізовані системи автоматизації. Схема централізованої системи передбачає наявність керуючого логічного модуля, який є «мозком» системи (рис. 2). Пристрій аналізує інформацію, що надходить з численних датчиків, і на підставі цього віддає команди приладів-виконавцям. В якості логічного модуля найчастіше використовується вільно програмований контролер з максимальною кількістю виходів. Виходячи із завдань, які вирішуватиме конкретна автоматизована система, створюється програмне забезпечення, яке встановлюється в логічний модуль, при необхідності в програму можна вносити зміни. Централізоване управління системою володіє такими перевагами:

1. можливість підключення будь-якого потрібного обладнання, в тому числі і від різних виробників;
2. можливість управління всіма підсистемами розумного будинку через загальний інтерфейс;
3. можливість створення багатоступеневих складних сценаріїв, використання циклічності.

Головним «вразливим місцем» схеми вважається недостатня надійність. Її працездатність «зав'язана» на центральному контролері. При його виході з ладу, система зупиняється. Теоретично такі прилади мають великий запас міцності, але з огляду на те, що йому доводиться працювати цілодобово протягом тривалого часу, існує ймовірність несправності.

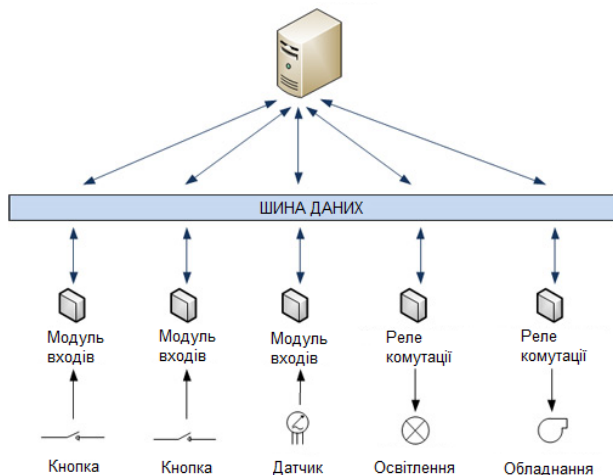


Рис. 2. Централізована система автоматизації

Розподілені або децентралізовані системи управління. Управління елементами розумного будинку здійснюється через мережу периферійних контролерів (рис. 3). Кожен з них являє собою логічний модуль з автономним живленням, який здатний функціонувати незалежно від головного комп'ютера і зберігати в пам'яті певний обсяг інформації, необхідної для управління. Кожен периферійний контролер індивідуально навчається і програмується. Єдиний керуючий центр в системі відсутній, що дає їй можливість продовжувати роботу при виході з ладу одного з периферійних логічних модулів. Неполадки можуть виникнути тільки в підключеній до нього системі. Перевагами розподіленого управління вважаються:

1. автономність роботи кожної з підсистем, що значно збільшує надійність функціонування єдиної системи розумного будинку;
2. можливість розширення та установки додаткових модулів;
3. широкий вибір елементів для створення такої схеми;
4. розподілені системи оптимальні для управління найпростішими механізмами або світлом, контролем над витокami води, газу та інше.

Єдиного інформаційного простору у такій системі немає, що істотно ускладнює діагностику конкретних приладів. Для цього доводиться або опитувати всю мережу, або використовувати пристрої, що фіксують характеристики обладнання. Недостатня гнучкість розподілених систем теж створює певні проблеми.

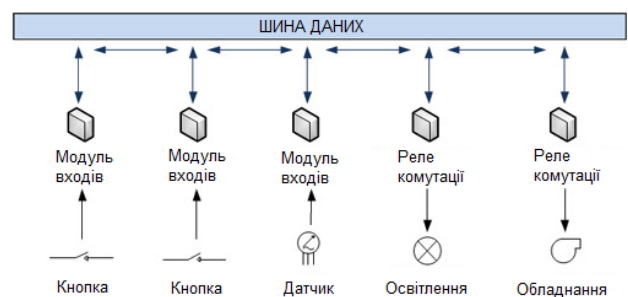


Рис. 3. Децентралізована система автоматизації

Комбіновані схеми управління. Під комбінованою схемою розуміють сукупність централізованих і розподілених систем з декількома керуючими центрами (рис. 4). Найчастіше така схема включає провідну централізовану систему, яка приймає рішення, і кілька допоміжних децентралізованих і централізованих підсистем. Саме так створюється більшість сучасних розумних будинків. Схема об'єднує два основних типи систем і максимально нівелює їх недоліки. Переваги такого рішення очевидні. Налагодження кожної з підсистем знає суттєвого спрощення, а надійність підвищується, оскільки провідний контролер відстежує працездатність кожної ділянки системи.

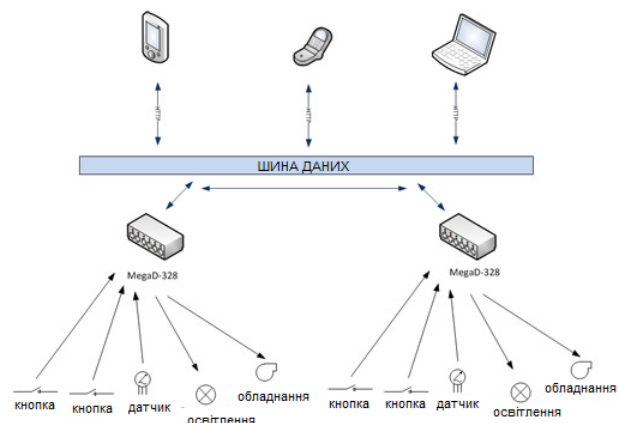


Рис. 4. Комбінована система автоматизації

Провідні системи розумного будинку. Провідна система являє собою сукупність пристроїв, об'єднаних в мережу за допомогою кабельних з'єднань. Такі системи відрізняються широким спектром послуг, що користувачеві можливостей, оскільки випускається велика кількість різних комплектуючих для провідних схем. Функціонал цих пристроїв максимально широкий. Провідні системи надійні, сигнал проходить по кабелю, що виключає можливість його переривання. Система характеризується високою швидкістю інформаційного обміну. Провідна схема дозволяє досить легко інтегрувати додаткові модулі. Для передачі інформації можуть використовуватися такі шини:

1. RS-232/422/485. Старіша з існуючих шин. Характеризується найбільшим часом відгуку. Застосовується для автоматизації побутової техніки, кондиціонерів, контролерів воріт і т.д.

2. Ethernet. Універсальний варіант, інтегрується з існуючими мережами, що одночасно є гідністю і недоліком. Щоб уникнути проблем, варто фізично розділити мережу на дві лінії: для автоматизації та для передачі даних. У системах Ethernet зазвичай стає шиною, що зв'язує всі підсистеми.

3. Силова лінія. Найбільш перспективне рішення для масового користувача, оскільки присутня скрізь, де проведено електрику. Розроблено спеціальні протоколи для її використання, наприклад X10 або більш сучасний Insteon.

4. Власна шина. Розробляється виробником спеціально для власної продукції. Зазвичай більш надійна, ніж аналоги. Гідність такого рішення - шина автоматизації відділяється від загальної мережі.

Основним недоліком дротових систем є складний і трудомісткий монтаж. В ході його проведення доводиться прокладати кабель, що пов'язано з необхідністю руйнувати стіни, демонтувати ділянки підлоги. Тому провідні схеми доцільно проектувати і встановлювати на етапі будівництва або хоча б капремонту.

Бездротові системи розумного будинку. У бездротовому розумному будинку передачі інформації всередині системи використовується радіосигнал (рис. 5).



Рис. 5. Елемент бездротової системи розумного будинку

На відміну від аналогів провідного типу можуть встановлюватися дуже швидко, з мінімальним втручанням в обробку інтер'єру. Це головна перевага та-

ких схем. Перевагою можна вважати і можливість розширення мережі, підключення нових пристроїв відбувається гранично просто. Найчастіше використовуються бездротові середовища:

1. Інфрачервоний канал. Застосовується для управління обладнанням, які не мають іншого способу управління або, як дублюючий канал для управління ресиверами, телевізорами, деякими контролерами.

2. Z-Wave, ZigBee. Характеризуються мінімальним енергоспоживанням, тому вважаються найбільш перспективними для систем розумний будинок.

3. Wi-Fi. Застосовується для роботи з гаджетами, оснащеними спеціалізованим програмним забезпеченням для управління елементами розумного будинку, або для зв'язку з сенсорними бездротовими панелями. Вибираючи бездротову схему, потрібно врахувати ряд моментів. Все обладнання такого типу має строго обмежений радіус дії. Якщо його недостатньо для функціонування приладу, необхідно встановити контролери мережі або репітери. У будівлі можуть існувати «глухі» зони, за якими не проходить радіосигнал. Бездротове обладнання може конфліктувати один з одним, необхідно переконатися, що цього не відбувається.

Автоматизовані системи розумний будинок можуть розрізнятися також за типом протоколу передачі даних що в них використовується.

Він може бути:

1. Відкритим. Передбачає стандартизований спосіб обміну інформацією, тому що працює з ним устаткування не «прив'язується» до певної платформи. Вибір виробників досить широкий. Серед них існує конкуренція, що змушує їх працювати над функціоналом і якістю пристроїв. Але необхідність слідувати заданим стандартам заважає розробляти принципово нові технології. Вартість обладнання трохи вище, ніж у аналогів з закритим протоколом.

2. Закритим. Протокол розробляється спеціально для продукту певного виробника, тому обладнання несумісне з продукцією інших брендів. При цьому вартість його нижче. Виробник не пов'язаний необхідністю дотримуватися стандартів, тому висока ймовірність отримати цікаве технологічне рішення.

Пристрої та комплектуючі розумного будинку. В системах автоматизації найчастіше використовуються такі види пристроїв.

Датчик руху - сигналізатор, що фіксує переміщення об'єктів і використовується для контролю за навколишнім оточенням або автоматичного запуску необхідних дій у відповідь на переміщення об'єктів. Робота датчика руху (рис. 6) заснована на аналізі хвиль різних типів (акустичних, оптичних або радіохвиль), що надходять на датчик з навколишнього середовища. Залежно від типу використовуваного випромінювання датчики руху діляться на: інфрачервоні, ультразвукові, фотоелектричні, в яких застосовується видиме світло, мікрохвильові, томографічні, де використовуються радіохвилі. Залежно від того, чи випромінює сенсор сам ці хвилі і аналізує їх після відбиття або тільки отримує хвилі ззовні, датчики діляться на: активні; пасивні; комбіновані, в таких датчиках одна частина

датчика посилає хвилі, а віддалена від неї друга частина отримує їх.



Рис. 6. Датчик руху

Модуль релейних контактів (рис. 7) - елемент автоматичних пристроїв, який при впливі на нього зовнішніх фізичних явищ стрибкоподібно приймає кінцеве число значень вихідної величини. Найчастіше - електричний комутаційний апарат, який автоматично виконує певні перемикання контролюваного ним електричного кола.



Рис. 7. Модуль релейних контактів

Датчик протікання (рис. 8) – сигналізатор, здатний зафіксувати розлив води. В основі роботи датчика протікання лежить електрична провідність води. Датчик оснащений двома або трьома контактами і встановлюється в місцях, де в першу чергу з'явиться вода при протіканні. Коли вода потрапляє на контакти, між ними утворюється слабкий електричний струм, і датчик спрацьовує. Слабка сторона датчика протікання в тому, що він не може зафіксувати протікання, поки вона не призведе до затоплення. Цього недоліку позбавлена система, яка розпізнає протікання, аналізуючи витрату води, однак такі системи стоять в десятки і навіть сотні разів дорожче систем, що працюють на датчиках. Проте, датчики здатні забезпечити ефективний захист майна від пов'язаного з протіканням шкоди.



Рис. 8. Датчик протікання

Датчик диму, детектор диму - охоронний сповіщувач, що зазвичай є частиною системи безпеки приміщення. (рис. 9).



Рис. 9. Датчик диму

Димер (рис. 10) – пристрій, що дозволяє плавно або східчасто регулювати потужність, напругу або струм, що подається на пристрій, зменшуючи або збільшуючи яскравість лампи.



Рис. 10. Димер

Електронні блоки управління, найчастіше використовуються для контролю клімату (рис. 11), налаштування сцен, логіки.



Рис. 11. Електронний блок управління кліматом

Висновки.

1. Розглянуті основні види систем автоматизації приміщень.
2. Визначені переваги та недоліки централізованих, децентралізованих та комбінованих систем автоматизації.

3. Визначені переваги та недоліки провідних та бездротових систем автоматизації.

4. Розглянуті системи автоматизації з відкритим та закритим протоколом передачі даних, їх переваги та недоліки.

5. Розглянуті основні датчики що використовуються в системах розумного будинку

Список литературы

1. https://www.smarthouse.ua/umnyj_dom.html
2. <https://www.5smart.ru/page/kak-rabotaet-umnyy-dom>
3. <https://ab-log.ru/smart-house/ethernet/megad-328>
4. <https://tech-house.su/umnyj-dom-s-chego-nachat/>.

References (transliterated)

1. https://www.smarthouse.ua/umnyj_dom.html
2. <https://www.5smart.ru/page/kak-rabotaet-umnyy-dom>
3. <https://ab-log.ru/smart-house/ethernet/megad-328>
4. <https://tech-house.su/umnyj-dom-s-chego-nachat/>.

Поступила (received) 21.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Макеев Сергій Олегович (Макеев Сергей Олегович, Makieiev Serhii O.) – магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра електричних апаратів; тел.: (067) 593-26-30; e-mail: sergeymakeev1997@gmail.com.

Вировець Сергій Валерійович (Выровец Сергей Валерьевич, Virovets Serhii V.) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: vsv_2007@ukr.net.

О.О. ЧЕПЕЛЮК, Є.І. ШНЕЙДЕРОВИЧ, Є.Ю. ЗОРІН

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ РЕЛЕ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

Дана стаття присвячена розробці лабораторного стенду з дослідження однофазних реле контролю напруги для захисту побутових споживачів та методичних вказівок для проведення відповідної лабораторної роботи. Описано конструкцію, процес збірки та електричну схему розробленого стенду, а також методичні вказівки, розроблені для проведення лабораторної роботи на даному стенді. На підставі проведених дослідів, проаналізовані різні режими роботи та реальні характеристики спрацьовування різних типів реле контролю напруги. За результатами дослідів виявлені переваги та недоліки кожного типу реле контролю напруги.

Ключові слова: лабораторний стенд; реле контролю напруги; норми якості електроенергії; відхилення напруги; провал напруги; тимчасова перенапруга.

А.А. ЧЕПЕЛЮК, Е.И. ШНЕЙДЕРОВИЧ, Е.Ю. ЗОРИН

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОФАЗНЫХ РЕЛЕ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Данная статья посвящена разработке лабораторного стенда по исследованию однофазных реле контроля напряжения для защиты бытовых потребителей и методических указаний для проведения соответствующей лабораторной работы. Описана конструкция, процесс сборки и электрическая схема разработанного стенда, а также методические указания, разработанные для проведения лабораторной работы на данном стенде. На основании проведенных опытов, проанализированы различные режимы работы и реальные характеристики срабатывания различных типов реле контроля напряжения. По результатам опытов выявлены преимущества и недостатки каждого типа реле контроля напряжения.

Ключевые слова: лабораторный стенд; реле контроля напряжения; нормы качества электроэнергии; отклонение напряжения; провал напряжения; временное перенапряжение.

O.O. CHEPELYUK, Y.I. SHNEIDEROVYCH, Y.Y. ZORIN

LABORATORY STAND FOR INVESTIGATION OF SINGLE-PHASE VOLTAGE CONTROL RELAYS FOR PROTECTION OF DOMESTIC CONSUMERS

This article is devoted to the development of a laboratory stand for the study of voltage control relays for the protection of household consumers and guidelines for the relevant laboratory work. Describes the design, assembly process and electrical circuit of the developed stand, as well as guidelines developed for laboratory work on this stand. On the basis of the conducted experiments, different operating modes and real characteristics of different types of voltage control relays are analyzed. The results of experiments revealed the advantages and disadvantages of each type of voltage control relay.

Key words: laboratory stand; voltage control relay; power quality standards; voltage deviation; voltage failure; temporary overvoltage.

Вступ. Реле контролю напруги – це електричний апарат, який контролює зміни напруги електромережі, та відключає електроприлади від мережі при неприпустимих відхиленнях напруги, тим самим захищаючи ці прилади від поломок, а в деяких випадках навіть загоряння.

Такі реле складаються з двох основних вузлів: електронного пристрою (аналогового чи цифрового на базі мікропроцесора), контролюючого напругу в мережі і силового реле, які знаходяться в одному корпусі.

На актуальному електротехнічному ринку України представлено широке різноманіття реле контролю напруги з фіксованими та регульованими параметрами спрацьовування (граничні пороги мінімальної та максимальної напруги, час спрацьовування, час автоматичного повторного включення, тощо) [1]. Характерним для вказаних реле є те, що більшістю виробників таких реле (зокрема маловідомих) не вказуються їх захисні характеристики, що затрудняє оцінку відповідності захисних характеристик реле стандартам з якості електроенергії в частині допустимих відхилень напруги живлення.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю проведення лабораторних досліджень з однофазними реле контролю напруги для захисту побутових спо-

живачів з метою вивчення принципів та режимів роботи реле напруги різних видів; здобуття практичних навичок з їх вибору, встановлення та підключення; визначення реальних характеристик різних реле напруги експериментальним методом, що у свою чергу потребує створення відповідного лабораторного стенду та методичних вказівок до лабораторної роботи. Застосування такого стенду у навчальних лабораторіях також суттєво покращить якість підготовки спеціалістів електротехнічного напрямку.

Мета роботи - розробка лабораторного стенду для дослідження однофазних реле напруги для захисту побутових споживачів та методичних вказівок до відповідної лабораторної роботи.

Опис конструкції лабораторного стенду. Принципова електрична схема лабораторного стенду для дослідження реле напруги наведена на рис. 1.

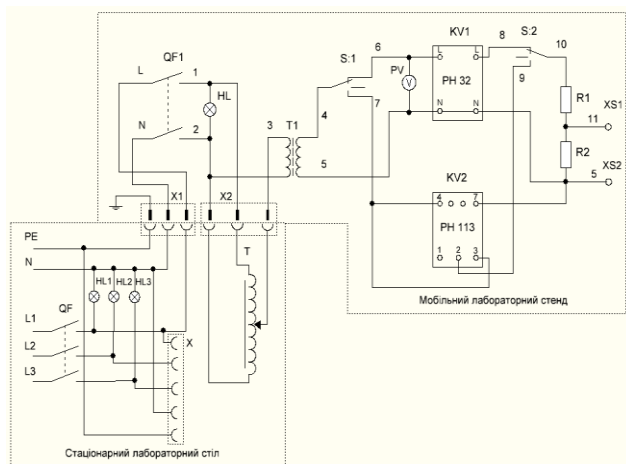


Рис. 1. Електрична схема лабораторного стенду (QF1 – двополюсний автоматичний вимикач; HL – сигнальна лампа; T1 – підвищуючий трансформатор; S – перемикач на 3 положення; PV – цифровий вольтметр; KV1 – реле напруги PH-32; KV2 – реле напруги PH-113; R1, R2 – резистори; XS1, XS2 – клеми для підключення осцилографа; X1 – однофазна розетка з вилкою; X2 – триконтактний роз'єм; HL1, HL2, HL3 – сигнальні лампи; QF – триполюсний автоматичний вимикач; T – стаціонарний лабораторний автотрансформатор; X – трифазна розетка з N та PE провідником).

Стенд втілює в собі «мобільну концепцію», суть якої полягає у тому, що він виконаний на окремому ДСП-каркасі (див. рис. 2) і для подачі на нього напруги живлення він з'єднується зі стаціонарним лабораторним столом двома гнучкими кабелями за допомогою однофазної вилки та трьох контактної штекера, що робить його мобільним (переносним), дуже спрощує його обслуговування та підвищує зручність користування ним [2].

На рис. 2 представлено встановлений на лабораторному столі лабораторний стенд.



Рис. 2. Розташування лабораторного стенду на лабораторному столі

До складу лабораторного стенду входить:

- двополюсний автоматичний вимикач АсКо – УКРЕМ ВА-2017-2/25 (QF1);
- сигнальна лампа АсКо – УКРЕМ СЛ-2001 (HL1);
- реле напруги АсКо – УКРЕМ PH-32 (KV1) з фіксованими параметрами спрацювання по напрузі та фіксованим часом автоматичного повторного увімкнення (АПВ) [3];

- реле напруги Volt Control PH-113 (KV2) з регульованими уставками спрацювання по мінімальній та максимальній напрузі та регульованим часом АПВ [4];

- підвищуючий трансформатор (T1), який знаходиться в монтажній коробці для забезпечення належного рівня безпеки при експлуатації стенду;
- вмонтовані в монтажну коробку цифровий вольтметр (PV1) та перемикач (S) на 3 положення;
- однофазна вилка із заземлюючим PE контактом;
- трьох контактний штекер (X2) для підключення мобільного стенду до стаціонарного лабораторного автотрансформатора;
- шина заземлення;
- вивідні клемники (XS1, XS2).

Усі стаціонарні підключення провідників всередині стенду виконані з дотриманням відповідних вимог безпеки. Завдяки використанню дільника напруги із коефіцієнтом $K = 1:10$ при будь-яких налаштуваннях та режимах роботи стенду напруга на вивідних клемниках не перевищує 36 В змінного струму, що забезпечує належний рівень захисту при експлуатації стенду.

Також для наглядності та зручності можливого ремонту стенду передбачена нумерація кожного провідника з обох сторін за допомогою спеціальних маркерів.

Подача живлення на лабораторний стенд та захист від короткого замикання відбувається за допомогою двополюсного автоматичного вимикача Q. Регулювання напруги відбувається за допомогою лабораторного автотрансформатора, вбудованого в стаціонарний трифазний лабораторний стіл, до якого підключається розроблений мною мобільний лабораторний стенд. Для деяких дослідів з реле напруги необхідна напруга більша за максимальну вихідну напругу лабораторного автотрансформатора, тому в стенді встановлений підвищувальний трансформатор із коефіцієнтом трансформації $k \approx 1.5$, здатний підвищувати напругу до 320 В. Сигнальна лампа HL сигналізує про наявність напруги живлення стенду. Цифровий вольтметр V відображає напругу прикладену до аналогового реле напруги PH-32, інше реле напруги PH-113 має свій вмонтований вольтметр, тому при дослідженні даного реле будуть використовуватися показання з цього вольтметра. Для можливості окремого дослідження кожного реле встановлений перемикач S на три положення: положення 1 – дослідження реле напруги PH-32; 2 – дослідження цифрового реле напруги PH-113; 0 – нейтральне положення, в даному положенні жодне з реле не підключене до мережі. Також для зручного підключення осцилографа під час дослідів встановленні спеціальні вивідні клемники.

Процес збірки основи стенду:

- 1) на ДСП-плитах відмічаються місця під отвори для з'єднання основи стенда;
- 2) за допомогою свердлильного верстату та дрилу свердлимо отвори необхідного діаметру;
- 3) свердлом з більшим діаметром знімаємо фаску з отворів для подальшого приховання шляпок конфір-

матів;

4) за допомогою гвинтів-конфірматів з'єднуються всі частини основи. Зовнішній вигляд зібраної основи стенду показано на рис. 3.



Рис. 3. Зібрана основа стенду

Збірка лабораторного стенду для дослідження реле напруги.

1) На основу стенду за допомогою саморізів прикріпили DIN-рейку та монтажні коробки, у верхній монтажній коробці попередньо були зроблені отвори під цифровий вольтметр та перемикач;

2) встановили та закріпили всі електричні прилади та клемники, які будуть використовуватися на стенді;

3) з'єднали всі елементи стенду згідно електричної схеми, паралельно нумеруючи всі провідники за допомогою спеціальних маркерів;

4) після підключення всіх елементів стенду, остаточно перевіряючи правильність з'єднання всіх електричних дрітів згідно з електричною схемою перевіряємо наявність та форму напруги на вивідних клемниках при нормальних умовах за допомогою цифрового осцилографа. Включений стенд із під'єднаним осцилографом [5] показано на рис. 4.

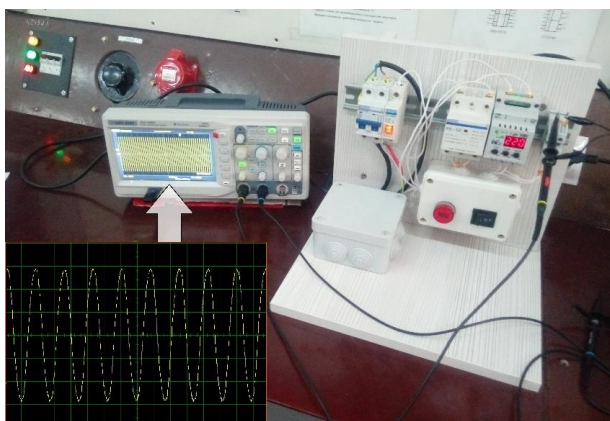


Рис. 4. Включений стенд із під'єднаним осцилографом

Електричні апарати та допоміжні елементи стенду. Список всіх електричних апаратів і допоміжних елементів, а також їх зовнішній вигляд наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Електричні апарати та допоміжні елементи стенду

Найменування	Зовнішній вигляд
Двополюсний автоматичний вимикач АсКо – УКРЕМ ВА-2017-2/25	
Сигнальна лампа АсКо – УКРЕМ СЛ-2001	
Реле напруги АсКо – УКРЕМ РН-32	
Реле напруги Volt Control РН-113	
Монтажні коробки двох видів	
Цифровий вольтметр 30 – 500В	
Перемикач на 3 положення та 2 групи контактів	
DIN-рейка	
Резистори МЛТ 2Вт 90 кОм, 10 кОм	
Клемник	
Клемник РЕ	
Дріт ПВЗ 0.75 мм ²	
Гнучкий кабель з вилкою та штекером	
Спиральна стяжка для дрітів	

Методичні вказівки до лабораторної роботи з дослідження реле контролю напруги для захисту побутових споживачів. Для проведення лаборатор-

ної роботи з дослідження однофазних реле напруги для захисту побутових споживачів були складені методичні вказівки, описані стисло нижче. Методичні вказівки включають в себе: титульний лист вказівок, основну частину та два додатки А та Б у яких наведені контрольні запитання за темою лабораторної роботи та правила оформлення звіту про виконання лабораторної роботи. Титульний лист методичних вказівок зображено на рис. 5.

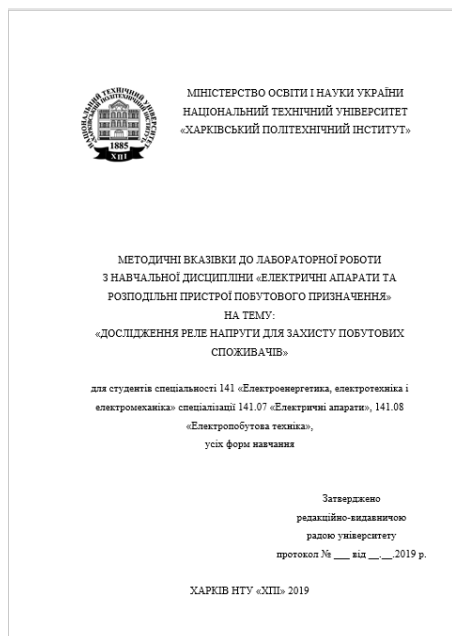


Рис. 5. Титульний лист методичних вказівок

Метою роботи є ознайомлення з призначенням, характеристиками і принципом дії цифрових та аналогових реле напруги. Набуття практичних навичок з підключення та налаштування реле напруги.

Об'єкт дослідження – реле контролю напруги АсКо – УКРЕМ РН-32 та Volt Control РН-113.

Виконання лабораторної роботи складається з роботи студента у лабораторії, а також із самостійної роботи вдома. У методичних вказівках також описані загальні вимоги щодо виконання, оформлення та захисту звітів про виконання лабораторної роботи.

1) Самостійна робота студента передбачає:

- теоретичну підготовку до чергової роботи;
- підготовку відповідей на контрольні запитання, наведених у Додатку А методичних вказівок;
- аналіз результатів дослідів, що виконувалися у лабораторії;
- оформлення звіту про виконання лабораторної роботи.

2) Теоретична підготовка до чергової роботи передбачає:

- проробку розділів теорії, що визначають зміст та методику досліджень;
- проробку методичних вказівок до лабораторної роботи з використанням відомостей з рекомендованої літератури;
- оформлення бланку до звіту про виконання лабораторної роботи.

3) Робота студента у лабораторії передбачає наступні етапи:

- отримання допуску до лабораторної роботи;
- отримання дозволу на ввімкнення лабораторної установки (стенду);
- виконання дій з досліджуванним об'єктом відповідно до методичних вказівок; спостереження за факторами, що впливають на досліджуваний об'єкт; проведення дослідів та запис результатів вимірів;
- захист звітів про виконання лабораторної роботи.

В основну частину методичних вказівок також включено:

– завдання, які студент має виконати на лабораторній роботі;

– порядок виконання роботи, перші 6 пунктів - це самостійна робота з теоретичними знаннями про: норми якості електроенергії, призначення та принцип дії випробовуваних реле напруги, роботу з осцилографом та комп'ютерну програму обробки осцилограм.

Завдяки реалізованим у методичних вказівках гіперактивним посиланням на технічні каталоги та інструкції з експлуатації випробовуваних реле контролю напруги та стандарти з якості електроенергії у мережі Internet, студент не буде втрачати час на пошук місця знаходження даної інформації, та буде краще орієнтуватись у вказаних документах. Ця особливість дасть змогу, самостійно та без перешкод, навчитися працювати з відповідними стандартами та з технічною документацією виробників на відповідне обладнання.

Результати проведення лабораторної роботи з дослідження реле напруги для захисту побутових споживачів.

Нижче наведено результати проведених досліджень реле напруги АсКо – УКРЕМ РН-32.

1) Визначено мінімальну напругу спрацювання реле $U_{min} = 184 \text{ В}$.

2) Визначено час автоматичного повторного включення (АПВ), при різних значеннях напруги. Результати представлено у вигляді табл. 2.

Таблиця 2 – Результати визначення часу АПВ

U, В	190	200	220	240
t, с	100	97	94	93

3) Визначено максимальну напругу спрацювання реле $U_{max} = 256 \text{ В}$.

4) Визначено час відключення навантаження (час спрацювання реле - t) при різних швидкостях зростання напруги (ΔU). Залежність визначених величин наведено у табл. 3. та на рис. 7.

Таблиця 3 – Залежність часу відключення реле від швидкості зростання напруги

$\Delta U, \text{В/с}$	1,42	25	54
t, с	1,25	0,7	0,65

Дані, наведені у табл. 3, отримані при аналізі відповідних осцилограм відключення, знятих за допомогою цифрового осцилографа при різних швидкостях зростання напруги, у комп'ютерній програмі з оброб-

ки осцилограм «CSV_See». Зовнішній вигляд однієї з осцилограм відключення при неприпустимому підвищенні напруги показано на рис. 6.

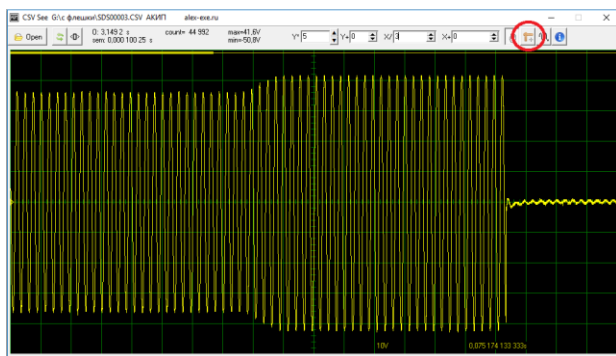


Рис. 6. Осцилограма відключення реле при перевищенні напруги у програмі CSV_See

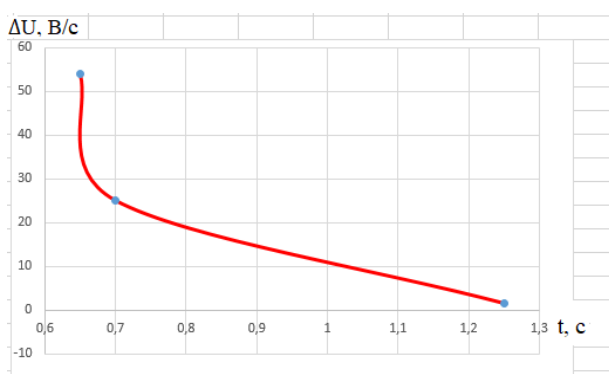


Рис. 7. Графік залежності $\Delta U(t)$ реле РН-32

З графіку на рис. 7 можна зробити висновок, що час спрацювання реле залежить від швидкості зростання напруги. Чим більше величина зростання напруги тим менший час спрацювання реле.

Також на даному стенді є можливість проведення аналогічних дослідів для визначення швидкості відключення навантаження при неприпустимому зниженні напруги. Проведення таких дослідів детально описано в методичних вказівках до лабораторної роботи на даному стенді.

Нижче наведено результати проведених досліджень реле напруги Volt Control РН-113.

1) Перевірено працездатність АПВ. При різних уставках автоматичного повторного включення час АПВ відповідає встановленому значенню, але особливістю даного реле є те, що при коливаннях напруги не систематичного характеру (наприклад комутаційний імпульс) дане реле не змушує користувача чекати поки пройде встановлений час АПВ, а підключає навантаження раніше.

2) Визначено мінімальну напругу відключення $U_{\min}$ при різних мінімальних уставках реле – див. табл. 4.

Таблиця 4 – Мінімальна напруга відключення $U_{\min}$ при різних мінімальних уставках реле

$U_{\text{уст.}}, \text{В}$	160	180	200	220
$U_{\text{спрац.}}, \text{В}$	158	178	198	218

3) Визначено гістерезис при $U_{\min}$. Результати представлені у табл. 5.

Таблиця 5 – Результати визначення гістерезису при $U_{\min}$

$U_{\text{уст.}}, \text{В}$	160	180	200	220
$U_{\text{спрац.}}, \text{В}$	163	183	203	223

Різниця між уставкою та фактичною напругою спрацювання реле є величиною гістерезису.

Аналогічним чином визначено максимальну напругу спрацювання при різних уставках $U_{\text{мах}}$. В середньому у даного реле контролю напруги відхилення напруги спрацювання по мінімальній уставці складає 2 В, а по максимальній не перевищує 3 В.

4) Визначено час відключення навантаження при різних швидкості збільшення напруги та швидкості зростання напруги за допомогою комп'ютерної програми «CSV_See» та на основі визначених даних побудований графік залежності часу спрацювання реле (t) від швидкості зростання напруги (ΔU). Залежність визначених величин наведено у табл. 6.

Таблиця 6 – Залежність часу спрацювання від швидкості зростання напруги

$\Delta U, \text{В/с}$	1,78	3	63,3
$t, \text{с}$	0,94	0,92	0,12

За отриманими даними побудовано графік залежності - рис. 8.

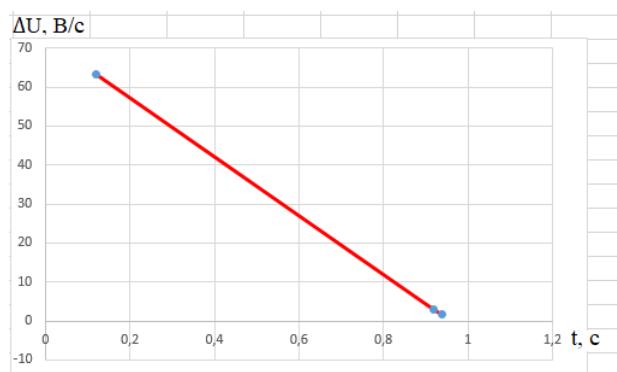


Рис. 8. Графік залежності $\Delta U(t)$ реле РН-113

З графіку можна зробити висновок, що час спрацювання реле залежить від швидкості зростання напруги. Чим більше величина швидкості зростання напруги тим менший час спрацювання реле. При цьому час відключення навантаження від мережі значно менше ніж у аналогічному досліді з реле напруги АсКо – УКРЕМ РН-32. Також були проведені аналогічні досліді для визначення швидкості відключення навантаження при неприпустимому зниженні напруги. Проведення таких дослідів детально описано в методичних вказівках до лабораторної роботи на даному стенді.

Висновки.

1. Розроблено лабораторний стенд для виконання лабораторної роботи з дослідження однофазних реле контролю напруги для захисту побутових споживачів двох видів: аналогового та цифрового.

2. Розроблено методичні вказівки до лабораторної роботи з дослідження однофазних реле контролю напруги для захисту побутових споживачів, що включають в себе: титульний лист вказівок; основну частину методичних вказівок та два додатки у яких наведені контрольні запитання за темою лабораторної роботи та правила оформлення звіту про виконання лабораторної роботи.

3. Встановлено мінімальну та максимальну напругу спрацювання обох випробовуваних реле напруги.

4. Визначено час автоматичного повторного включення (АПВ) обох реле.

5. Визначено гістерезис включення цифрового реле напруги РН-113.

6. Визначено час відключення навантаження обома реле при недопустимих відхиленнях напруги, та побудовано графіки залежності часу відключення від швидкості зростання напруги.

7. Дану роботу впроваджено у навчальний процес кафедри електричних апаратів НТУ «ХПІ» у вигляді лабораторного стенду для проведення лабораторної роботи «Дослідження реле контролю напруги для захисту побутових споживачів» з навчальної дисципліни «Електричні апарати та розподільні пристрої побутового призначення», що покращує якість навчального процесу на кафедрі, завдяки роботі з обладнанням та технічною документацією на практиці.

8. За потреби, на даному лабораторному стенді можуть бути проведені дослідження параметрів спрацювання аналогічних реле контролю напруги інших виробників.

Список літератури

- 1 Чепелюк А.А. К вопросу классификации реле напряжения для защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2014. – № 41. – С. 25-36.

- 2 Б.В. Клименко, О.О. Чепелюк, М.Г. Пантелют Сучасна лабораторія – сучасна освіта: докорінне переобладнання навчальної лабораторії кафедри «електричні апарати» НТУ «ХПІ». // Вісник НТУ "ХПІ". 2018. № 1 2019
- 3 Технічна документація на електричні апарати АсКО-УкРЕМ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ielectro.nethouse.ua/static/doc/0000/0000/0335/3352_12.4tqs9zbygo.pdf
- 4 Руководство по эксплуатации Новатек-Электро VOLT-Control PH-113. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://novatek-electro.com/docs/doc_m-113.pdf
- 5 User Manual SDS1000DL/CNL/CML Series Digital Oscilloscope (Цифровые Запоминающие Осциллографы Модельный ряд SDS1000DL/CNL/CML Инструкция по эксплуатации) [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://odimpex.com/media/content/sds-1000_v_1.0.pdf

References (transliterated)

- 1 Chepeliuk A.A. K voprosu klassyfykatsii rele napriazheniya dlia zashchity bitovikh odnofaznykh potrebytelei ot nedopustymykh otklonyeniy napriazheniya v pytaiushchei seti // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. – 2014. – № 41. – С. 25-36.
- 2 B.V. Klymenko, O.O. Chepelyuk, M.H. Patelyat Suchasna laboratoriya – suchasna osvita: dokorinne pereobladnannya navchal'noyi laboratoriyi kafedry «elektrychni aparaty» NTU «KHPI». // Visnyk NTU "KHPI". 2018. № 1 2019.
- 3 Tekhnichna dokumentatsiya na elektrychni aparaty AsKO-UkREM. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: https://ielectro.nethouse.ua/static/doc/0000/0000/0335/3352_12.4tqs9zbygo.pdf
- 4 Rukovodstvo po ékspluatatsyy Novatek-Élektro VOLT-Control PH-113. [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: https://novatek-electro.com/docs/doc_m-113.pdf
- 5 User Manual SDS1000DL/CNL/CML Series Digital Oscilloscope (Tsifrovyye Zapominayushchiye Ostillografy Model'nyy ryad SDS1000DL/CNL/CML Instruktziya po ékspluatatsii) [Yelektronnyy resurs]. Rezhim dostupu: https://odimpex.com/media/content/sds-1000_v_1.0.pdf

Поступила (received) 04.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: chep1@i.ua.

Шнейдерович Євгеній Ігорович (Шнейдерович Евгений Игоревич, Shneiderovych Yevgeniy Igorevich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: zhendoss56@gmail.com.

Зорін Євгеній Юрійович (Зорин Евгений Юрьевич, Zorin Yevhenii Yur'yevich) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: yevgeny.zorin@gmail.com.

А.В. БОРЦОВ

АППРОКСИМАЦИЯ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Вольтамперная характеристика является основной функциональной характеристикой солнечной батареи. Она позволяет определить оптимальный, с точки зрения передачи максимальной мощности в нагрузку, режим работы солнечной батареи. Теоретически вольтамперная характеристика вентильного фотоэлемента описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений 5-го порядка с соответствующими граничными условиями. Система уравнений представляет собой баланс электронов и дырок внутри вентильного фотоэлемента. Распределение напряженности электрического поля описывается уравнением Пуассона. Аналитическое решение данной системы возможно в двух случаях – для “тонкого” p - n перехода и для p - n перехода, внутри которого можно пренебречь процессами генерации и рекомбинации носителей заряда. Аналитическое решение в данном случае представляет собой уравнение Эберса-Молла, которое связывает между собой ток, напряжение в нагрузке и параметры фотоэлемента – фотоэдс, фототок, ток насыщения, тепловой потенциал. В общем случае система уравнений решается численными методами. В литературе численные результаты представляют уравнением Эберса-Молла, в которое введен коэффициент $a = 1 - 5$. В работе предложен экспериментально-расчетный метод определения параметров фотоэлемента и коэффициента a . Некоторые параметры фотоэлемента можно измерить в процессе снятия вольтамперной характеристики – фотоэдс в режиме холостого хода и фототок в режиме короткого замыкания. Для определения параметра a и тока насыщения по экспериментальным данным использован метод наименьших квадратов. Предложенный метод аппроксимации вольтамперной характеристики применен к нескольким кремниевым поликристаллическим солнечным батареям.

Ключевые слова: солнечная батарея, вольтамперная характеристика, p - n переход, фотоэдс, ток насыщения, тепловой потенциал, “тонкий” p - n переход, “широкий” p - n переход, уравнение Эберса-Молла

О.В. БОРЦОВ

АПРОКСИМАЦІЯ ВОЛЬТАМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОЇ СОЛОНЕЧНОЇ БАТАРЕЇ

Вольтамперна характеристика є основною функціональною характеристикою сонячної батареї. Вона дозволяє визначити оптимальний, з точки зору передачі максимальної потужності в навантаження, режим роботи сонячної батареї. Теоретично вольтамперна характеристика вентильного фотоелемента описується системою нелінійних диференціальних рівнянь 5-го порядку з відповідними граничними умовами. Система рівнянь являє собою баланс електронів і дірок всередині вентильного фотоелемента. Розподіл напруженості електричного поля описується рівнянням Пуассона. Аналітичне рішення даної системи можливо в двох випадках – для “тонкого” p - n переходу і для p - n переходу, всередині якого можна знехтувати процесами генерації і рекомбінації носіїв заряду. Аналітичне рішення в даному випадку є рівняння Еберса-Молла, яке пов'язує між собою струм, напругу в навантаженні і параметри фотоелемента – фотоерс, фотострум, струм насичення, тепловий потенціал. У загальному випадку система рівнянь вирішується чисельними методами. У літературі чисельні результати представлено рівнянням Еберса-Молла, в яке введено коефіцієнт $a = 1 - 5$. В роботі запропоновано експериментально-розрахунковий метод визначення параметрів фотоелемента і коефіцієнта a . Деякі параметри фотоелемента можливо виміряти в процесі зняття вольтамперної характеристики – фотоерс в режимі холостого ходу і фотострум в режимі короткого замикання. Для визначення параметра a і струму насичення за експериментальними даними використано метод найменших квадратів. Запропонований метод апроксимації вольтамперної характеристики застосовано до кількох кремнієвих полікристалічних сонячних батарей.

Ключові слова: сонячна батарея, вольтамперна характеристика, p - n перехід, фотоерс, струм насичення, тепловий потенціал, “тонкий” p - n перехід, “широкий” p - n перехід, рівняння Еберса-Молла

A.V. BORTSOV

APPROXIMATION OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF VENTILED SOLAR BATTERY

The current-voltage characteristic is the main functional characteristic of the solar battery. It allows you to determine the optimal, in terms of transferring maximum power to the load, the mode of operation of the solar battery. Theoretically, the current-voltage characteristic of a valve photocell is described by a system of non-linear differential equations of the 5th order with the corresponding boundary conditions. The system of equations is the balance of electrons and holes inside the valve photocell. The distribution of the electric field strength is described by the Poisson equation. An analytical solution of this system is possible in two cases – for the “thin” p - n junction and for the p - n junction, inside which the processes of generation and recombination of charge carriers can be neglected. The analytical solution in this case is the Ebers-Mall equation, which interconnects the current, voltage in the load and the parameters of the photocell – photoemf, photocurrent, saturation current, thermal potential. In the general case, the system of equations is solved by numerical methods. In the literature, numerical results are represented by the Ebers-Mall equation, in which the coefficient $a = 1 - 5$ is introduced. An experimental-calculation method for determining the parameters of the photocell and coefficient a is proposed. Some parameters of the photocell can be measured in the process of taking the current-voltage characteristic – photoemf in idle mode and photocurrent in short circuit mode. The least squares method was used to determine the parameter a and the saturation current from the experimental data. The proposed method for approximating the current-voltage characteristic is applied to several silicon polycrystalline solar batteries.

Keywords: solar battery, current-voltage characteristic, p - n junction, photoemf, saturation current, thermal potential, “thin” p - n junction, “wide” p - n junction, Ebers-Mall equation.

Введение. Основная функциональная характеристика любого источника энергии – вольтамперная характеристика (ВАХ) или нагрузочная характеристика, которая показывает зависимость тока от напряжения на зажимах источника. При этом линейный источник энергии можно представить как реальный источник

напряжения с внутренним сопротивлением. Величину напряжения и внутреннего сопротивления можно рассчитать или измерить. ВАХ такого источника – прямая линия. Для расчета или измерения параметров линейного источника используют режим холостого хода и короткого замыкания [1]. Солнечная батарея

представляет собой нелинейный источник. Теоретически ВАХ солнечной батареи можно рассчитать, решив систему нелинейных дифференциальных уравнений. Аналитическое решение этой системы возможно в случае “тонкого” $p-n$ – перехода или $p-n$ – перехода, внутри которого можно пренебречь процессами генерации и рекомбинации носителей заряда [2]. В остальных случаях система уравнений решается численными методами.

Цель работы – экспериментальное исследование и аппроксимация ВАХ вентиляционной солнечной батареи.

Постановка задачи. ВАХ кремниевой солнечной батареи можно аналитически аппроксимировать уравнением Эберса – Молла [2, 3]:

$$U(I) = \frac{akT}{e} \ln\left(\frac{I_f - I}{I_s} + 1\right), \quad (1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, Дж/К – постоянная Больцмана; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$, Кл – заряд электрона; I_f – фототок; I_s – ток насыщения; T – абсолютная температура; a – коэффициент, учитывающий “ширину” $p-n$ – перехода.

Коэффициент a предлагается выбирать из диапазона $a = 1 - 5$, причем $a = 1$ – для “тонкого” $p-n$ – перехода, и $a = 2 - 5$ – для “широкого” $p-n$ – перехода. Для дальнейшего анализа приведем уравнение (1) к безразмерному виду. Введем базисные величины:

$I_0 = I_f$ – базисный ток (фототок); $U_0 = \frac{kT}{e} = U_T$ – базисное напряжение (тепловой потенциал). Тогда уравнение ВАХ в безразмерном виде запишется как:

$$u(i) = a \ln\left(\frac{1-i}{i_s} + 1\right), \quad (2)$$

где $u(i) = \frac{U(I)}{U_0}$; $i = \frac{I}{I_0}$; $i_s = \frac{I_s}{I_0}$.

В уравнении (2) два неизвестных параметра – коэффициент a и относительный ток насыщения i_s . В режиме холостого хода ($i = 0$) из уравнения (2) получим

$$i_s = 1 / \left[\exp\left(\frac{\varepsilon_f}{a}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

где $\varepsilon_f = \frac{U(0)}{U_0} = \frac{E_f}{U_T}$ – относительная фотоэдс солнечной батареи. Таким образом, уравнение (2) можно записать в виде:

$$u(i) = a \ln\left[(1-i)e^{\frac{\varepsilon_f}{a}} + i\right], \quad (4)$$

то есть параметр a является критерием подобия ВАХ солнечной батареи [4]. Фототок I_f , фотоэдс E_f и

тепловой потенциал U_T определяются в процессе снятия ВАХ солнечной батареи.

Описание стенда для снятия ВАХ и результаты аппроксимации. Схема стенда для снятия ВАХ солнечной батареи представлена на рис. 1.

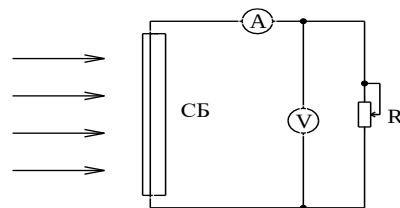


Рис. 1. Схема стенда для экспериментальных исследований: СБ – солнечная батарея; А – амперметр; V – вольтметр; R – нагрузка.

Объектом экспериментальных исследований являлась кремниевая солнечная батарея площадью 143×52 мм² с параметрами:

- ток короткого замыкания (фототок) – 6,2 мА;
- напряжение холостого хода (фотоэдс) – 7,69 В;
- схема соединения солнечных элементов – 2 параллельные цепочки по 16 последовательно соединенных элементов;
- размер одного элемента – 25х8 мм².

Солнечная батарея при комнатной температуре ($T \approx 301^\circ\text{K}$) облучалась световым потоком, создаваемым энергосберегающей лампой GLOBAL мощностью 75 Вт. Измерения токов, напряжений и температуры проводились цифровыми мультиметрами M890G, DG890B+. В качестве нагрузки использован многооборотный проволочный резистор СПЗ-37А сопротивлением 51 кОм. Результаты измерений $U = U(I)$ приведены в таблице 1 и на рис. 2.

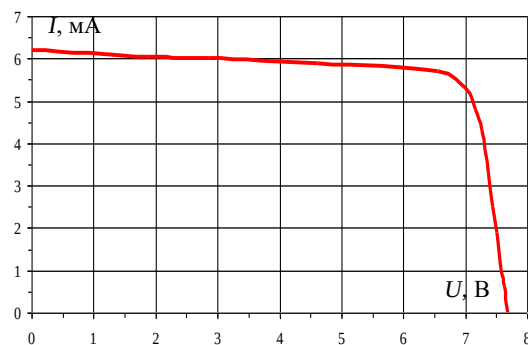


Рис. 2. Экспериментальная ВАХ солнечной батареи.

Таблица 1 – Результаты измерений ВАХ солнечной батареи.

I , мА	0,00	0,62	1,00	1,90	2,50	3,50	4,30	5,00	5,48	5,85	6,03	6,07	6,20
U , В	7,69	7,63	7,59	7,52	7,45	7,37	7,27	7,17	7,00	6,56	4,62	2,88	0,00

Экспериментальная ВАХ имеет безразмерный вид $u_k = u_k(i_k)$, где $k = 1, 2 \dots n$. Число точек измерения ВАХ $n = 13$ (табл. 1). Для определения параметра a по результатам измерений используем метод “наименьших квадратов” [5]. Составим “невязку” ВАХ

$$S = \sum_{k=1}^n \left\{ a \ln\left[(1-i_k)e^{\frac{\varepsilon_f}{a}} + i_k\right] - u_k \right\}^2. \quad (5)$$

Минимизируя “невязку” $dS/da = 0$, получим трансцендентное уравнение для определения параметра a , которое решаем методом итераций [5]. В результате

получим:

$$a^{(m+1)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{(n-1)} \ln^2 f(i_k)} \sum_{k=1}^{(n-1)} \{u_k \ln f(i_k) +$$

$$+ \frac{\varepsilon_f (1-i_k)}{f(i_k)} e^{\frac{\varepsilon_f}{a^{(m)}}} [\frac{u_k}{a^{(m)}} + \ln f(i_k)]\};$$

$$f(i_k) = (1-i_k) \exp(\frac{\varepsilon_f}{a^{(m)}}) + i_k; \quad (7)$$

$$i_s = 1/[e^{\frac{\varepsilon_f}{a^{(m)}}} - 1]; \quad (8)$$

$$a^{(0)} = \sum_{k=1}^{(n-1)} (u_k - \varepsilon_f) \ln(1-i_k) / \sum_{k=1}^{(n-1)} \ln^2(1-i_k); \quad (9)$$

$$|a^{(m+1)} - a^{(m)}| \leq \varepsilon, \quad (10)$$

$m = 0, 1, 2, \dots$ – число итераций, которое задается погрешностью $\varepsilon \leq 0,05$. После нескольких итераций ($m \leq 5-6$) получим $a = 12,53$; $I_s = 3,33 \cdot 10^{-7}$ А. Сравнение расчетных и экспериментальных ВАХ показывает хорошее совпадение (рис. 3). Но значение параметра a

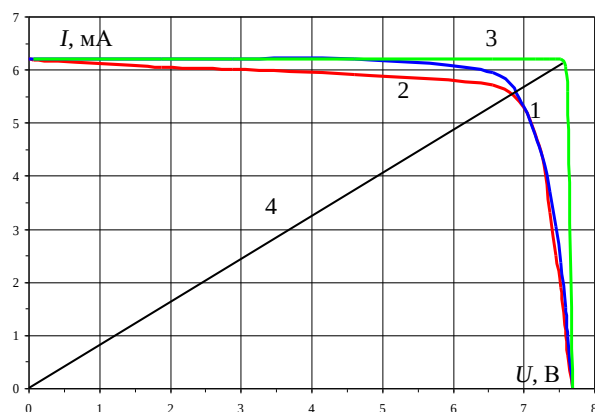


Рис. 3. Сравнение расчетной (1) и экспериментальной (2) вольт-амперной характеристик солнечной батареи; (3) – вольт-амперная характеристика солнечной батареи с “тонким” $p-n$ переходом; (4) – прямая максимальной мощности

далеко от диапазона $a = 1 - 5$. Построим ВАХ одного фотоэлемента – для этого значения тока батареи разделим на 2, а значения напряжения на 16. Расчет по выражениям (6 – 10) для одного фотоэлемента дают $a = 1,903$; $I_s = 3,71 \cdot 10^{-7}$ А. Следовательно, для одного фотоэлемента значение параметра a уже соответствует диапазону $a = 1 - 5$.

Выводы. 1. Предложен экспериментальный метод определения параметров ВАХ кремниевой солнечной батареи. Применение этого метода для конкретного типа солнечной батареи показало хорошее совпадение расчетной и экспериментальной ВАХ.

2. Установлено, что приводимый в литературе диапазон параметра $a = 1 - 5$ справедлив только для одного фотоэлемента.

Список литературы

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 536 с.
2. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Изд-во «Советское радио». 1971. – 248 с.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Пер. с англ. М.: Мир. 1983. – Т. 1. – 598 с.
4. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: «Высшая школа», 1976. – 479 с.
5. В.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова. Численные методы анализа. Государственное издательство физико-математической литературы. М.: 1962. – 367 с.

References (transliterated)

1. Neyman L.R., Demirchyan K.S. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: V 2-kh t. Uchebnik dlya vuzov. Tom 1. L.: Energoizdat. Leningr. otd-niye, 1981. – 536 s.
2. Vasil'yev A.M., Landsman A.P. Poluprovodnikovyye fotopreobrazovateli. M.: Izd-vo «Sovetskoye radio». 1971. – 248 s.
3. .Khorovits P., Khill U. Iskustvo skhemotekhniki: V 2-kh tomakh. Per. s angl. M.: Mir. 1983. – T.1. 598 s.
4. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primeritel'no k zadacham elektroenergetiki). Ucheb. posobiye dlya vuzov. Izd. 2-ye, dop. i pererab. M.: «Vysshaya shkola», 1976. – 479 s.
5. V.P. Demidovich, I.A. Maron, E.Z. Shuvalova. Chislennyye metody analiza. Gosudarstvennoye izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury. M.: 1962. – 367 s.

Поступила 19.03.2020

Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

Борцов Олександр Васильович (Борцов Александр Васильевич, Bortsov Alexander Vasilievich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; email: avbortsov@gmail.com.

С.І. ДОЛИНЮК, В.А. БАЖЕНОВ

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНФІГУРАЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ МЕТОДОМ ПО КОНТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

В роботі розглядається питання вибору оптимальної мережі методом поконтурної оптимізації та розрахунок режимів роботи мережі. Розроблено проект підстанції 110/35/10 кВ. Обрано основний та резервний захист силового трансформатора. Розроблено стартап-проект оптимальної схеми електропостачання споживачів мережею 110 кВ. Обрано заходи і засоби для забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації мережі 110 кВ. Сформовано функцію дисконтованих затрат для повітряної лінії номінальною напругою 110 кВ. Актуальність теми. Під час проектування одним із основних завдань є оптимізація конфігурації електромережі, щоб досягти максимально можливого економічного ефекту, не порушуючи при цьому технічні вимоги. Метою роботи є оптимізація мережі методом поконтурної оптимізації та розрахунок режимів роботи мережі. Об'єкт дослідження: розподільча електрична мережа 110 кВ. Предмет досліджень: оптимізація конфігурації мережі. Методи дослідження. Методи теоретичних основ електротехніки та електричних мереж, математичне моделювання, чисельні методи рішення нелінійних систем рівнянь.

Ключові слова: режим роботи; оптимізація; електрична мережа; підстанція; дисконтовані витрати; трансформатор; енергосистема; потужність.

С.И. ДОЛЫНЮК, В.А. БАЖЕНОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТИ МЕТОДОМ ПО КОНТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В работе рассматривается вопрос выбора оптимальной сети методом поконтурной оптимизации и расчет режимов работы сети. Разработан проект подстанции 110/35/10 кВ. Избран основной и резервный защиты силового трансформатора. Разработан стартап-проект оптимальной схемы электроснабжения потребителей сетью 110 кВ. Избран мероприятия и средства для обеспечения безопасных условий труда при эксплуатации сети 110 кВ. Сформирован функцию дисконтированных затрат для воздушной линии номинальным напряжением 110 кВ. Актуальность темы. При проектировании одной из основных задач является оптимизация конфигурации электросети, чтобы достичь максимально возможного экономического эффекта, не нарушая при этом технические требования. Целью работы является оптимизация сети методом поконтурной оптимизации и расчет режимов работы сети. Объект исследования: распределительная электрическая сеть 110 кВ. Предмет исследования: оптимизация конфигурации сети. Методы исследования. Методы теоретических основ электротехники и электрических сетей, математическое моделирование, численные методы решения нелинейных систем уравнений.

Ключевые слова: режим работы; оптимизация; электрические сети; подстанции; дисконтированных затрат; трансформатор; энергосистема; мощность.

S.I. DOLYNYUK, V.A. BAGENOV

OPTIMIZATION OF THE GRID CONFIGURATION BY THE METHOD OF CONTOUR OPTIMIZATION

In the article the question of a choice of an optimum network by a method of contour optimization and calculation of operating modes of a network is considered. A 110/35/10 kV substation project has been developed. The basic and reserve protection of the power transformer is chosen. A startup project of the optimal scheme of power supply of consumers with 110 kV network has been developed. Measures and means have been selected to ensure safe working conditions during the operation of the 110 kV network. The function of discounted costs for an overhead line with a nominal voltage of 110 kV is formed. Actuality of theme. When designing one of the main tasks is to optimize the configuration of power grids to achieve the maximum possible economic-nominal effect, without violating these technical requirements. The purpose of work is to optimize the network by the method of contour optimization and calculation of network modes. Object of research: 110 kV electrical distribution network. Subject of research: network configuration optimization. Research methods. Methods of theoretical bases of electrical engineering and electric networks, mathematical modeling, numerical methods of solving nonlinear systems of equations.

Key words: operation mode; optimization; electric network; substation; discount costs; transformer; energy system; power.

Оптимізацію конфігурації електромережі здійснено з використанням методу поконтурної оптимізації.

У вихідній електромережі виділяємо дерево, яке представляє собою зв'язану розімкнену мережу. Всі гілки, які належать мережі називаються дугами. Дуги з, яких складається дерево позначаємо індексами $l = 1, 2, \dots, L$. Інші дуги називаються хордами і позначаються індексами $k = 1, 2, \dots, K$. У випадку додавання будь-якої хорди до дерева електромережі утворюється контур. За незалежні змінні приймаємо навантаження хорд електромережі, як залежні – навантаження дуг, що утворюють дерево.

Приймаємо, що навантаження всіх хорд рівне нулю. Потім, в результаті зміни потужності, будь-якої K -ї хорди можна знайти мінімум функції затрат необхідних для спорудження і експлуатації цього контуру:

$$V_k^*(P_k) = V_k(P_k) \sum_{l \in M_k} V_l(P_l),$$

де P_k та $V_k(P_k)$ – відповідно, навантаження і затрати k -ї хорди;

M_k – множина усіх дуг контуру, який виникає після включення k -ї хорди;

P_l – навантаження l -ї дуги, що залежить від навантаження k -ї хорди.

Для здійснення оптимізації кусково-лінійної функції досить розглянути її критичні точки. Це точки в окрузі, яких значення функції не зменшується. В нашому випадку критичні точки будуть відповідати нульовому значенню навантаження хорди або дуг контуру. Тому для здійснення оптимізації контуру досить виконати порівняння дисконтованих затрат для режимів роботи, в яких навантаження однієї із дуг або хорд рівне нулю. Якщо розглянуті контури є невзає-

мозв'язаними, то процес оптимізації завершується після виконання k кроків. Але в реальних умовах деякі дуги належать до кількох контурів. Тому при виконанні оптимізації одного контуру змінюються умови для оптимізації інших контурів, що приводить до необхідності здійснення ітераційного процесу пошуку екстремуму.

Якщо найменші дискontовані затрати відповідають режиму, в якому нульове навантаження має дуга, то виконується зміна системи незалежних змінних. Хорду включають в склад дерева, а дугу відносять до хорд. В іншому випадку одна й та сама дуга для одного контуру може бути розімкненою, а для іншого – замкненою.

Далі приведемо алгоритм виконання методу поконтурної оптимізації:

1. У вихідній мережі виділяємо дерево. Дуги, з яких складається дерево, позначаються індексами $l = 1, 2, \dots, L$, а хорди – індексами $k = 1, 2, \dots, K$. Прирівнюємо до нуля навантаження всіх хорд: $P_k = 0$, $k = 1, 2, \dots, K$. Задають $k = 1$.

2. Оптимізуємо k -й контур. Визначаємо:

$$V_k^*(P_l = 0) = \min \{V_k^*(P_l = 0) / l \in M_k\}.$$

Якщо $V_k^*(P_l = 0) < V_k^*(P_k = 0)$, то для виконання наступного кроку процесу оптимізації дугу l приймаємо, як хорду, а k -у хорду відносимо до складу дерева. Для інших випадків система незалежних змінних залишається без зміни. Приймаємо $P_k = 0$.

3. Якщо розглянуто всі контури електромережі $k=K$, то виконують п.4. Якщо розглянуто не всі контури, то змінюють поточний індекс контуру на $k=k+1$ та переходять до п.2.

4. У випадку зміни в складі дерева та хорд на циклі оптимізації, приймають $k=1$ і переходять до п.2, якщо ні, то – до п.5.

5. Кінець.

Критерієм закінчення виконання алгоритму є постійність складу дерева та хорд після здійснення циклу процесу оптимізації. Для загального випадку, ітераційний процес оптимізації закінчують, коли виконується умова:

$$|V^{(V-1)} - V^V| \leq \varepsilon,$$

де V - номер циклу процесу оптимізації.

На рис. 1 приведена вихідна надлишкова схема електромережі.

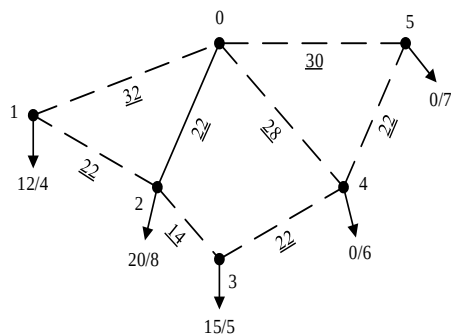


Рис. 1 – Надлишкова схема електромережі

Для знаходження значення дискontованих зведених затрат скористаємося знайденими у п'ятому розділі виразами:

$$Z_{\text{сн}} = 0,079 \cdot P.$$

$$Z_{\text{н}} = 1,59 + 0,054 \cdot P.$$

Здійснюємо ітераційний процес оптимізації конфігурації електромережі.

В надлишковій мережі хордами обираємо гілки 1-2, 3-4 та 4-5. Таким чином будемо мати три контури. Для першого контуру гілки 0-1 та 0-2 є дугами, а гілка 1-2 хордою; для другого контуру гілки 0-2, 2-3 та 0-4 є дугами, а гілка 3-4 хорда; для третього контуру гілки 0-4 та 0-5 є дугами, а гілка 4-5 хордою.

Спочатку розглянемо перший контур. В процесі оптимізації навантаження кожної гілки по чергово приймаємо рівним нулю. Після чого в одержаній таким чином розімкненій мережі знаходимо поторозподіл і дискontовані затрати необхідні для будівництва та експлуатації ділянок електромережі. Різноманітні варіанти потокорозподілу в першому контурі показані на рис. 2.

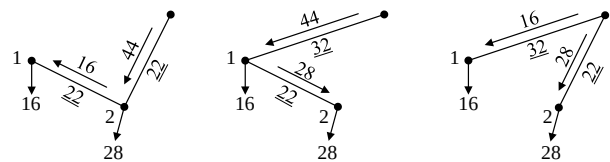


Рис. 2. Різноманітні варіанти потокорозподілу в першому контурі

Знаходимо значення дискontованих затрат:

$$3(0-1) = (1,59 + 0,054 \cdot P_{21}) \cdot l_{12} + 0,079 \cdot P_{02} \cdot l_{02} =$$

$$= (1,59 + 0,054 \cdot 16) \cdot 22 + 0,079 \cdot 44 \cdot 22 = 130,83 \text{ млн.грн}$$

$$3(0-2) = (1,59 + 0,054 \cdot P_{12}) \cdot l_{12} + (1,59 + 0,054 \cdot P_{01}) \cdot l_{01} =$$

$$= (1,59 + 0,054 \cdot 28) \cdot 22 + (1,59 + 0,054 \cdot 44) \cdot 32 = 194,42 \text{ млн.грн}$$

$$3(1-2) = (1,59 + 0,054 \cdot P_{01}) \cdot l_{12} + 0,079 \cdot P_{02} \cdot l_{02} =$$

$$= (1,59 + 0,054 \cdot 16) \cdot 32 + 0,079 \cdot 28 \cdot 22 = 127,33 \text{ млн.грн}$$

Одержані значення дискontованих затрат для першого контуру заносимо до табл. 1.

Таблиця 1 – Оптимізація першого контуру

Гілка	Потужність, яка передається, МВт		
	I-й режим	II-й режим	III-й режим
0-1	0	44	16
0-2	44	0	28
1-2	16	28	0
3, млн. грн	130.83	194.42	127.33

Аналіз даних табл. 1 показує, що мінімальні дискontовані затрати в першому контурі будуть після відключення гілки 1-2. Отже, даний контур своєї конфігурації не змінює.

Процес оптимізації інших контурів наведений в табл. 2-3.

Таблиця 2 – Оптимізація другого контуру

Гілка	Потужність, яка передається через ПЛ, МВт			
	I-й режим	II-й режим	III-й режим	IV-й режим
0-2	0	54	28	48
0-4	54	0	26	6
2-3	28	26	0	20
3-4	48	6	20	0
З, млн. грн.	260.5	178.31	191.14	174.79

Таблиця 3 – Оптимізація третього контуру

Гілка	Потужність, яка передається, МВт		
	I-й режим	II-й режим	III-й режим
0-4	0	13	6
0-5	13	0	7
4-5	6	7	0
З, млн. грн.	110.73	107.33	112.56

Аналіз даних табл. 3 дає мінімальні дисконтовані затрати в третьому контурі після відключення гілки 0-5. Отже, третій контур має таку конфігурацію: гілки 0-4 та 4-5 дуги, а гілка 0-5 хорда.

Оскільки склад контурів залишився без змін оптимізацію конфігурації електромережі закінчуємо. На рис. 3 приведена оптимальна конфігурація мережі.

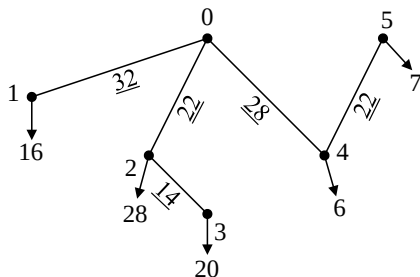


Рис. 3 – Оптимальна конфігурація електромережі

Список літератури

1. Гігієнічні нормативи ГН 3.3.5-8-6.6.1-20014. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. 08.04.2014.
2. Про затвердження Норм безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів. Наказ Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 13.10.2007.
3. ДНАОП 1.1.10-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. Встановлює вимоги до потрібного переліку електрозахисних засобів, до зберігання, випробування, перевірки стану та користування залежно від умов праці.

4. НПАОП 40.1-1.01-97 (ДНАОП 1.1.10-1.01-97). Правила безпечної експлуатації електроустановок.
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ-2017). Введені 21.07.2017.
6. ДНАОП 0.00-1.03-02. Правила будови і безпечної експлуатації вантажо-підіймальних кранів.
7. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті.
8. Модели оптимального развития энергосистем / В.А. Баженов. Учеб. пособие. – Киев: КПИ, 1984. – 100 с.
9. Електричні системи та мережі. Районні електричні мережі [Текст]: метод. вказівки до викон. курсового проекту з дисципліни для студ. усіх форм навчання та студ.-іноземців напрямку підготов. 6050707 «Електротехніка та електротехнології» / Уклад.: В.М. Сулейманов, В.В. Чижевський, О.М. Янковська. – К., НТУУ «КПІ», 2009. – 92 с.
10. Математичні моделі електричних систем [Текст]: Метод. Вказівки до викон. Модульної контрольної роботи з дисципліни для студ. денної форми та студ.-іноземців напрямку підготовки «Електротехніка та електротехнології» програми професійного спрямування «Електричні системи і мережі» / Уклад. Т.Л. Каддзе, О.М. Паненко. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 59 с.

References (transliterated)

1. Hygienic standards GN 3.3.5-8-6.6.1-20014. Hygienic classification of labor according to the indicators of harmfulness and danger of factors of the production environment, the severity and intensity of the labor process. 04/08/2014
2. On approval of the Norms of free issuance of special clothing, special footwear and other means. Order of the State Committee of Ukraine for Labor Protection Supervision dated 13.10.2007.
3. DNAOP 1.1.10-1.07-01. Rules of operation of electroprotective means. Sets requirements for the required list of electrical protective equipment, storage, testing, inspection and use depending on working conditions.
4. NPAOP 40.1-1.01-97 (DNAOP 1.1.10-1.01-97). Rules for safe operation of electrical installations.
5. Rules of arrangement of electrical installations (PUE-2017). Introduced on 07/21/2017.
6. DNAOP 0.00-1.03-02. Rules of construction and safe operation of cranes.
7. NPAOP 0.00-1.15-07. Rules of labor protection during work at height.
8. Models of optimal development of power systems. VA Bazhenov. Textbook. allowance. - Kiev: KPI, 1984. - 100 p.
9. Electrical systems and networks. District electric networks [Text]: method. instructions for execution. course project in the discipline for students. all forms of education and foreign students in the direction of training. 6050707 "Electrical Engineering and Electrical Technology". Compiled by: V.M. Suleymanov, VV Chigevskiy, O.M. Yankovska. - K, NTUU "KPI", 2009. - 92 p.
10. Mathematical models of electrical systems [Text]: Method. Instructions for performance. Modular test work on the discipline for students. full-time and foreign students in the direction of training "Electrical Engineering and Electrical Technology" professional program "Electrical Systems and Networks". Uklad. T.L. Kacadze, O.M. Panenko. - K: NTUU "KPI", 2016. - 59 p.

Надійшла (received) 02.12.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Долинюк Станіслав Ігорович (Долынюк Станислав Игоревич, Dolinyuk Stanislav Igorovich) магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; e-mail: stas.dol96@gmail.com.

Баженов Володимир Андрійович (Баженов Владимир Андреевич, Bagenov Volodimir Andreyovich) кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

В.П. КАЛІНЧИК, В.А. ПОБІГАЙЛО, П.Д. ЛУЦІВ

РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ SMART GRID ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В статті розглянута методологія побудови автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), яка призначена для достовірного визначення обсягів власного електроспоживання, а також для контролю перетоків електроенергії енергопостачальної компанії з суміжними суб'єктами Оптового ринку електроенергії. Програмно-технічні засоби АСКОЕ утворюють два рівня, до складу яких входять нижній рівень, до якого відносяться рівень точок обліку і рівень об'єктів обліку електроенергії, а також верхній рівень, до якого відносяться рівень центрального пункту і рівень автоматизованих робочих місць АСКОЕ. В цій роботі реалізація концепції Smart Grid показана на принципах побудови автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії енергопостачальної компанії (АСКОЕ), яка створена як інформаційно-вимірвальна система, основне призначення якої – достовірне визначення обсягів та здійснення автоматизованого обліку власного споживання електроенергії, а також перетоків електроенергії компанії з суб'єктами енергоринку – результати якого повинні використовуватися для проведення відповідних фінансових розрахунків за спожиту електроенергію Компанії. АСКОЕ основана на застосуванні новітніх технологій, які дозволяють Компанії ефективно реагувати на будь-які вимоги енергоринку. В роботі розглянуто поняття дистанційного зчитування показів лічильників – передові технології, які забезпечують можливість дистанційного зчитування даних, що накопичені Smart Meter (дослівно «Розумний Лічильник»). Такі лічильники дозволяють не тільки вимірювати та обліковувати електричну енергію, а й обчислювати параметри режимів електроспоживання, зберігати обчислені значення параметрів в енергонезалежній пам'яті - первинній базі даних (ПБД), а також забезпечують доступ до ПБД через цифрові комунікаційні інтерфейси. Завдяки застосуванню багатофункціональних електронних лічильників електроенергії, що виміряна, може бути розподілена за інтервалами часу: інтервалами доби, тарифними зонами, добами, місяцями або роками.

Ключові слова: електроспоживання; автоматизована система; комерційний облік; перетоки електроенергії.

В.П. КАЛИНЧИК, В.А. ПОБИГАЙЛО, П.Д. ЛУЦЕВ

РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ SMART GRID ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В статье рассмотрена методология построения автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), которая предназначена для достоверного определения объемов собственного электропотребления, а также для контроля перетоков электроэнергии энергоснабжающей компании со смежными субъектами оптового рынка электроэнергии. Программно-технические средства АСКУЭ образуют два уровня, в состав которых входят нижний уровень, к которому относятся уровень точек учета и уровень объектов учета электроэнергии, а также верхний уровень, к которому относятся уровень центрального пункта и уровень автоматизированных рабочих мест АСКУЭ. В этой работе реализация концепции Smart Grid показана на принципах построения автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии энергоснабжающей компании (АСКУЭ), которая создана как информационно-измерительная система, основное назначение которой - достоверное определение объемов и осуществления автоматизированного учета собственного потребления электроэнергии, а также перетоков электроэнергии компании с субъектами энергорынка - результаты которого должны использоваться для проведения соответствующих финансовых расчетов за потребленную электроэнергию компании. АСКУЭ основана на применении новейших технологий, позволяющих Компании эффективно реагировать на любые требования энергорынка. В работе рассмотрено понятие дистанционного считывания показаний счетчиков - передовые технологии, которые обеспечивают возможность дистанционного считывания данных, накопленные Smart Meter (дословно «Умный Счетчик»). Такие счетчики позволяют не только измерять и учитывать электрическую энергию, но и вычислять параметры режимов электропотребления, хранить вычисленные значения параметров в энергонезависимой памяти - первичной базе данных (ПБД), а также обеспечивают доступ к ПБД через цифровые коммуникационные интерфейсы. Благодаря применению многофункциональных электронных счетчиков электроэнергии, измеренная, может быть распределена по интервалам времени: интервалами времени, тарифными зонами, сутками, месяцами или годами.

Ключевые слова: электропотребление; автоматизированная система; коммерческий учет; перетоки электроэнергии.

V.P. KALINCHUK, V.A. POBIGAYLO, P.D. LUCIV

IMPLEMENTATION OF SMART GRID CONCEPT FOR CONSTRUCTION OF ELECTRICITY ACCOUNTING SYSTEM

The article considers the methodology of building an automated system of commercial electricity metering (ASKOE), which is designed to reliably determine the volume of own electricity consumption, as well as to control electricity flows of the energy supply company with related entities of the Wholesale Electricity Market. ASKOE software and hardware form two levels, which include the lower level, which includes the level of metering points and the level of electricity metering facilities, as well as the upper level, which includes the level of the central point and the level of automated workplaces ASKOE. In this paper, the implementation of the Smart Grid concept is shown on the principles of building an automated system of commercial metering of electricity supply company (ASKOE), which was created as an information and measurement system, the main purpose of which is to reliably determine the volume and automated metering electricity of the company with the subjects of the energy market - the results of which should be used to make appropriate financial calculations for the consumed electricity of the Company. ASKOE is based on the use of the latest technologies that allow the Company to respond effectively to any requirements of the energy market. The concept of remote reading of meter readings is considered in the work - advanced technologies that provide the possibility of remote reading of data accumulated by Smart Meter (literally "Smart Meter"). Such meters allow not only to measure and account for electricity, but also to calculate the parameters of power consumption modes, store the calculated values of parameters in non-volatile memory - primary database (PBD), as well as provide access to PBD through digital communication interfaces. Thanks to the use of multifunctional electronic meters, the measured electricity can be distributed over time intervals: day intervals, tariff zones, days, months or years.

Key words: electricity consumption; automated system; commercial accounting; electricity flows.

Вступ. Всі сучасні новації в світовій електроенергетиці запроваджуються під маркою «Smart Grid» [1-2]. В стислі терміни ці технології пройшли шлях розвитку від AMR до AMI і далі до AMM.

AMR (Automated Meter Reading) - дистанційне зчитування показів лічильників – передові технології, які забезпечують можливість дистанційного зчитування даних, що накопичені Smart Meter (дослівно «Розумний Лічильник»). Такі лічильники дозволяють не тільки вимірювати та обліковувати електричну енергію, а й обчислювати параметри режимів електроспоживання, зберігати обчислені значення параметрів в енергонезалежній пам'яті - первинній базі даних (ПБД), а також забезпечують доступ до ПБД через цифрові комунікаційні інтерфейси. Завдяки застосуванню багатофункціональних електронних лічильників електроенергії, що виміряна, може бути розподілена за інтервалами часу: інтервалами доби, тарифними зонами, добами, місяцями або роками. Впровадження AMR суттєво скорочує терміни збору даних, підвищує достовірність обліку та дозволяє автоматизувати процес розрахунків за електроенергію.

AMI (Advanced Metering Infrastructure) - розвинута інфраструктура вимірювань – відноситься до систем, які спроможні збирати та аналізувати дані вимірювань. AMI-систему можна визначити, як розширення звичайної AMR-системи. AMI-системи забезпечують двохсторонній зв'язок з лічильниками.

AMM (Advanced Meter Management) - розвинута система керування лічильниками – отримала другу назву – система інтелектуальних вимірювань – система дистанційного зчитування даних обліку з розвиненими функціональними можливостями щодо надання клієнтам сервісних послуг інформаційною мережею.

В цій роботі реалізація концепції Smart Grid показана на принципах побудови автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії енергопостачальної компанії (АСКОЕ), яка створена як інформаційно-вимірювальна система, основне призначення якої – достовірне визначення обсягів та здійснення автоматизованого обліку власного споживання електроенергії, а також перетоків електроенергії компанії з суб'єктами енергоринку – результати якого повинні використовуватися для проведення відповідних фінансових розрахунків за спожиту електроенергію Компанії. АСКОВЕ основана на застосуванні новітніх технологій, які дозволяють Компанії ефективно реагувати на будь-які вимоги енергоринку.

АСКОЕ енергопостачальної компанії створюється з метою:

- виконання вимог нормативних документів (далі - НД) [3-5];
- зниження технологічних втрат електроенергії за рахунок підвищення точності обліку електричної енергії та одержання інформації, що дозволяє локалізувати понаднормативні втрати і виконувати аналіз технологічних втрат електричної енергії у високовольтних та розподільчих мережах компанії;

- автоматизації процесу збору, передачі і обробки інформації з розрахункових та контрольних точок обліку електричної енергії на підстанціях, розподільних пунктах та інших об'єктах, розташованих по периметру компанії;

- перевірки достовірності даних обліку електроенергії шляхом виконання процедур верифікації через формування балансів електричної енергії для об'єктів обліку розташованих по периметру компанії, а також між показами основних та дублюючих лічильників електроенергії, встановлених як у розрахункових, так і в контрольних точках обліку;

- забезпечення роботи усіх елементів АСКОВЕ в єдиному розрахунковому часі з збереженням встановлених правил переходу на "літній/зимовий" час;

- зниження трудомісткості та ресурсних витрат при виконанні робіт з обліку електричної енергії, включаючи збір та обробку даних, підготовку звітної інформації, зведень та аналітичних матеріалів для керівництва;

- одержання даних по обсягах перетоків активної і реактивної електроенергії та потужності компанії з суміжними ліцензіатами й балансу потужності та енергії в інтервалі, тривалість якого може змінюватися;

- забезпечення регламентованого доступу до первинних баз даних (ПБД) лічильників електроенергії та інформації що зберігається на сервері баз даних АСКОВЕ компанії - зі сторони зацікавлених суб'єктів енергоринку;

- забезпечення оперативного контролю режимів перетоків електроенергії на території здійснення ліцензійної діяльності компанії;

- забезпечення синхронності вимірювання потужності і електроенергії;

- виключення суб'єктивних факторів, пов'язаних з візуальним зчитуванням показів лічильників електроенергії та проведенням розрахунків у ручному режимі; автоматизації формування складових балансу потужності і електроенергії на межі з ОРЕ та суміжними ліцензіатами (прийм, видача, сальдо);

- автоматизації операцій із підготовки звітів, зведень і аналітичних матеріалів для керівництва;

- автоматизації процесу передачі комерційної інформації Головному операторові та передачі/отримання інформації від суміжних суб'єктів енергоринку;

- забезпечення можливості передачі даних до АСКОВЕ Головного оператора по виділених (основних) каналах зв'язку, в якості резервних можливе використання комутованих каналів (після створення мережі передачі даних Головного оператора комерційного обліку);

- окрім того здійснення впровадження по організації отримання інформації від незалежних постачальників і юридичних споживачів.

Принципи побудови АСКОВЕ. Узагальнена структурна схема АСКОВЕ показана на рис. 1 [6];

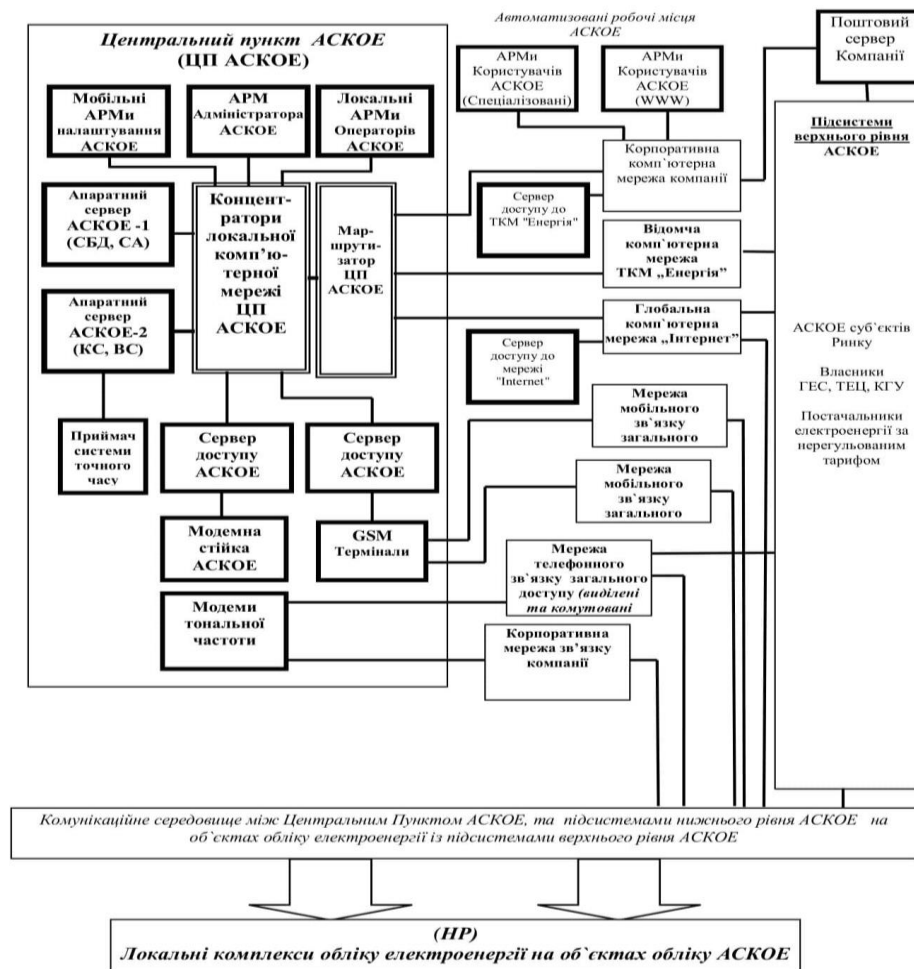


Рис. 1. Узагальнена структурна схема АСКОЕ

Програмно-технічні засоби АСКОЕ компанії утворюють два рівня, до складу яких входять:

а) нижній рівень АСКОЕ (НР), до якого відносяться:

- рівень точок обліку електроенергії (РТО)
- рівень об'єктів обліку електроенергії (РОО);

б) верхній рівень АСКОЕ (ВР), до якого відносяться:

- рівень центрального пункту АСКОЕ (РЦП);
- рівень автоматизованих робочих місць АСКОЕ (АРМ).

Кожен із рівнів ієрархії побудовано на основі уніфікованих програмно-технічних засобів, з орієнтацією на використання сучасного мікропроцесорного обладнання та обчислювальної техніки.

Верхні рівні АСКОЕ (РЦП, АРМ) мають можливість обміну інформацією з підсистемами верхнього рівня АСКОЕ ПрАТ НЕК «Укренерго», суміжних обласних енергопостачальних компаній, інших ліцензіатів, а також із підсистемами верхнього рівня АСКОЕ, встановленими у споживачів компанії.

Нижні рівні АСКОЕ (РТО, РОО) побудовано на базі інтелектуальних електронних лічильників електроенергії, високопродуктивних комунікаційних модулів і засобів телекомунікації.

Рівні ієрархії поєднуються між собою локальними засобами передачі даних (на об'єктах обліку – між РТО та РОО), засобами телекомунікації (між НР та ВР) та локальною комп'ютерною мережею, а також засобами телекомунікації із підсистемами ВР суб'єктів енергоринку.

Режим роботи АСКОЕ компанії - цілодобовий, безперервний, з періодичним зовнішнім оглядом і регламентними роботами в період зупинок і ремонтів. Для випадків виникнення аварійних ситуацій, передбачена можливість ручного введення інформації. Допускаються перерви в роботі АСКОЕ і її окремих компонентів (обладнання РТО) для виконання профілактичного і технічного обслуговування, що не приводить до порушення встановлених термінів звітності щодо комерційного обліку електроенергії та інформаційної взаємодії з суміжними АСКОЕ.

АСКОЕ компанії забезпечує збирання інформації з усіх розрахункових точок обліку електроенергії, розташованих на об'єктах обліку компанії, та розрахункових точках обліку на підстанціях суміжних суб'єктів енергоринку.

На всіх рівнях АСКОЕ компанії виявляється і фіксується:

- порушення схеми обліку;
- порушення в електроживленні технічних засобів

АСКОЕ компанії;

- відсутність зв'язку з АСКОЕ суміжних ліцензіатів;
- системні помилки пристроїв обліку електроенергії;
- неприпустимий відхід часу в таймерах лічильників і пристроїв обліку;

порушення в роботі програмно-технічних засобів АСКОЕ компанії всіх рівнів;

- несанкціоноване втручання (або спроби втручання) у роботу компонентів АСКОЕ;
- неприпустимі відхилення показань основного і дублюючого лічильників

АСКОЕ компанії забезпечує можливість фізичного розширення на всіх рівнях, у тому числі:

- збільшення кількості електролічильників і приладів обліку;
- розширення кількості типів параметрів, які зчитуються з лічильника і обробляються в АСКОЕ компанії;
- збільшення кількості користувачів АСКОЕ компанії;
- включення в АСКОЕ компанії нових автоматизованих функцій і збільшення ступеня автоматизації діючих функцій;
- вдосконалення інтерфейсів користувачів;
- приведення програмних засобів та бази даних (БД) до вимог європейських стандартів ІЕС;
- заміни діючих технічних засобів на більш вдосконалені.

Типова структура програмно-технічних засобів нижнього рівня показана на рис. 2. [6].

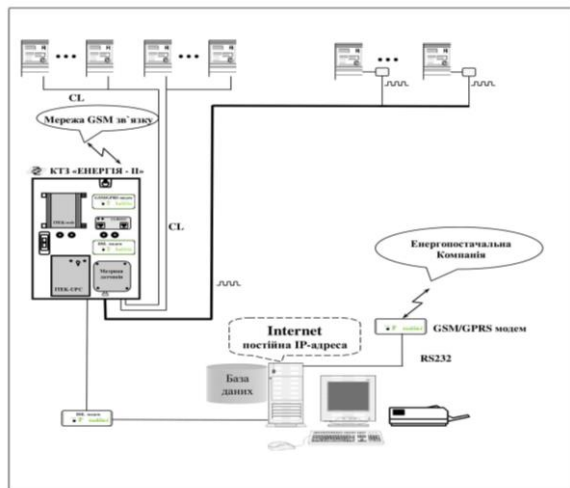


Рис.1. Узагальнена структурна схема АСКОЕ

Програмно-технічні засоби АСКОЕ компанії утворюють два рівня, до складу яких входять:

- нижній рівень АСКОЕ (НР), до якого відносять:
 - рівень точок обліку електроенергії (РТО);
 - рівень об'єктів обліку електроенергії (РОО);
- верхній рівень АСКОЕ (ВР), до якого відносять:
 - рівень центрального пункту АСКОЕ (РЦП);
 - рівень автоматизованих робочих місць АСКОЕ (АРМ).

Кожен із рівнів ієрархії побудовано на основі уніфікованих програмно-технічних засобів, з орієнтацією на використання сучасного мікропроцесорного обладнання та обчислювальної техніки.

Верхні рівні АСКОЕ (РЦП, АРМ) мають можливість обміну інформацією з підсистемами верхнього рівня АСКОЕ ПрАТ НЕК «Укренерго», суміжних обласних енергопостачальних компаній, інших ліцензіатів, а також із підсистемами верхнього рівня АСКОЕ, встановленими у споживачів компанії.

Нижні рівні АСКОЕ (РТО, РОО) побудовано на базі інтелектуальних електронних лічильників електроенергії, високопродуктивних комунікаційних модулів і засобів телекомунікації.

Рівні ієрархії поєднуються між собою локальними засобами передачі даних (на об'єктах обліку – між РТО та РОО), засобами телекомунікації (між НР та ВР) та локальною комп'ютерною мережею, а також засобами телекомунікації із підсистемами ВР суб'єктів енергоринку.

Режим роботи АСКОЕ компанії - цілодобовий, безперервний, з періодичним зовнішнім оглядом і регламентними роботами в період зупинок і ремонтів. Для випадків виникнення аварійних ситуацій, передбачена можливість ручного введення інформації. Допускаються перерви в роботі АСКОЕ і її окремих компонентів (обладнання РТО) для виконання профілактичного і технічного обслуговування, що не приводить до порушення встановлених термінів.

До складу програмно-технічних засобів обліку нижнього рівня входять:

- рівень точок обліку (трансформатори напруги, трансформатори струму, лічильники);
- комплекс технічних засобів «Енергія WEB» (КТЗ);
- комунікаційне обладнання;
- кабельні лінії.

При необхідності можливе встановлення АРМ користувача на самій підстанції.

Окрім електронних, багатофункціональних лічильників, на підстанції можуть бути встановлені електронні лічильники, які мають тільки імпульсний вихід, або індукційні лічильники, заміна яких економічно недоцільна, але інформація про споживання з яких використовується при розрахунку балансів по підстанції. В такому разі, в ці лічильники вмонтовується перетворювач обертів диска лічильника в електричні імпульси (датчики) типу УП-3М.

Основним компонентом комплексу технічних засобів «Енергія WEB» є мікросервер Itek-WEB. Мікросервер Itek-WEB призначений для забезпечення зв'язку й узгодження інтерфейсів між багатофункціональними лічильниками й сервером БД, а також самостійного опитування лічильників і зберігання результатів опитування у вбудованій енергонезалежній пам'яті.

Мікросервер Itek-WEB побудовано на базі промислового варіанту процесора Intel 186. Має інтерфейс Ethernet 10/100 Mb і підтримує протоколи TCP/IP та UDP.

В залежності від модифікації Itek-WEB може мати 6, 10, або 18 послідовних каналів (зі швидкістю обмі-

ну до 115 Kb), з яких 2 канали RS232 забезпечують приєднання AT- або GSM/GPRS- модемів і підтримують протокол віддаленого доступу PPP. Шістнадцять (або 8, або 4) каналів RS232/RS485 з гальванічною розв'язкою забезпечують узгодження з послідовними портами лічильників. Має 8 дискретних входів й 8 дискретних виходів, які конфігуруються для виміру кількості електроенергії по імпульсних, телеметричних виходах лічильників, або керування зовнішніми виконавчими пристроями (електромеханічним реле).

КТЗ «Енергія WEB» комплектується також джерелом безперервного живлення Itek-UPS, яке забезпечує автономну роботу обладнання КТЗ на протязі 12 годин.

При використанні традиційних комутованих каналів зв'язку опитування значної кількості територіально-розгалужених лічильників займає багато часу, тому в структурі АСКОВЕ компанії була передбачена схема опитування лічильників з використанням GPRS зв'язку. Схемою передбачається, що сервер БД, через комунікаційний сервер (КС), постійно утримує зв'язок з кожним об'єктом обліку, використовуючи Ethernet технології. Таким чином доступ до даних кожного окремого лічильника здійснюється практично миттєво. Окрім того, програмно-апаратні засоби, які використовуються в АСКОВЕ дозволяють виконувати опитування лічильників паралельно, тобто, якщо на підстанції встановлено контролер з 8 послідовними входами типу струмова петля (CL), то опитування лічильників проводиться по всіх восьми входах одночасно. Таким чином, час зчитування інформації з всіх лічильників підстанції буде дорівнювати часу опитування лічильників одного каналу, до якого підключено найбільше лічильників. На рівні ЦП запит на опитування всіх підключених лічильників задається одночасно по всіх підстанціях включених в АСКОВЕ, що дозволить вчасно формувати звіт до ДП «Енергоринок», а також необхідні макети всім сусіднім ліцензіатам.

Висновок. Запропонована і побудована автоматизована система комерційного обліку електроенергії енергопостачальної компанії, яка побудована на принципах реалізації концепції Smart Grid і призначена для достовірного визначення обсягів власного електроспоживання, а також для контролю перетоків електроенергії компанії з суміжними суб'єктами енергоринок. АСКОВЕ складається із двох рівнів: нижнього - рівня точок і об'єктів обліку електроенергії; верхнього - рівня центрального пункту і автоматизованих робочих місць АСКОВЕ.

Список літератури

1. А.В. Праховник, В.П. Калінчик, А.В. Волошко, О.В. Коцарь. Системы учета электроэнергии в условиях функционирования Smart Grid технологий / Энергетика та електрифікація. – 2012. - № 1.- С.51-58.
2. А.В.Праховник, В.П.Калінчик, А.В.Волошко, О.В.Коцар. Системи обліку електроенергії в умовах функціонування Smart Grid технологій/ Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. Частина 2, 2011.- С.14-22.
3. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринок//Праховник А.В., Калінчик В.П., Тимошенко Ю.В. та інші. - Інформаційний бюлетень НКРЕ.- 2002. - №11.-С.230-261.
4. Кодекс систем розподілу. Постанова НКРЕ від 14.03.2018 № 310.
5. Кодекс комерційного обліку електричної енергії. Постанова НКРЕ від 14.03.2018 № 311.
6. Шпак О.Л., Луців П.Д., Праховник А.В., Калінчик В.П., Шиянов О.О. Автоматизована система комерційного обліку електроенергії ВАТ ЕК „Хмельницькобленерго”/ Электрические сети и системы. Спецвипуск, 2010.- С.22-31.

References (transliterated)

1. A.V. Prahovnik, V.P. Kalinchik, A.V. Voloshko, O.V. Kocar'. Sistemy ucheta jelektroenergii v uslovijah funkcionirovanija Smart Grid tehnologij. Energetika ta elektrifikacija. 2012. No 1. Pp.51-58.
2. A.V. Praxovnyk, V.P. Kalinchyk, A.V. Voloshko, O.V. Koczar. Systemy obliku elektroenergii v umovax funkcionuvannya Smart Grid tehnologij. Praci instytutu elektrodynamiky Nacionalnoyi akademii nauk Ukrayiny. Zbirnyk naukovykh pracz. Specialnyj vypusk. Chastyna 2, 2011. Pp.14-22.
3. Konceptiya pobudovy avtomatyzovanykh system obliku elektroenergii v umovax energorynku. Praxovnyk A.V., Kalinchyk V.P., Tymoshenko Yu.V. ta inshi. - Informacijnyj byuleten NKRE. 2002. No 11. Pp.230-261.
4. Kodeks system rozpodilu. Postanova NKRE vid 14.03.2018 No 310.
5. Kodeks komercijnogo obliku elektrychnoyi energii. Postanova NKRE vid 14.03.2018 No 311.
6. Shpak O.L., Luciv P.D., Praxovnyk A.V., Kalinchyk V.P., Shyyanov O.O. Avtomatyzovana sistema komercijnogo obliku elektroenergii VAT EK „Xmelnyckoblenergo” / Elektricheskiye sety y systemy. Speczvypusk, 2010. Pp. 22-31.

Поступила (received) 21.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Калінчик Віталій Васильович (Калінчик Виталий Васильевич, Kalinchyk Vitaliy Vasilivich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ, тел.: (067) 209-87-26.

Побігало Віталій Анатолійович (Побигало Виталий Анатольевич, Pobigaylo Vitaliy Anatolievich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ, тел.: (097) 308-88-95; e-mail: pobigaylo@gmail.com.

Луців Петро Денисович (Луцев Петр Денисович, Luciv Petr Denisovich) – АТ «Хмельницькобленерго»; м. Хмельницьк, тел.: (067) 209-87-26

В.М. ЗОЛОТАРЬОВ, Ю.П. АНТОНЕЦЬ, Л.А. ЩЕБЕНЮК, А.А. ШУРУПОВА

ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ РОЗВИТКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАННЯХ НАПОВНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ КАБЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Виконано аналіз результатів порівняння механічних властивостей поліолефіну наповненого антипіренами. Наведено експериментальні дані оцінювання динаміки розвитку деформації одноосного розтягування при нормативних випробуваннях кабельних полімерних композицій в умовах виробництва. Організація технологічного контролю забезпечення механічної міцності елементів конструкції, виготовлених із безгалогенних пластмас в умовах конкретного виробництва, є однією з актуальних задач при виготовленні пожежебезпечних кабелів. Для аналізу динаміки розвитку деформації безгалогенних кабельних пластмас і визначення практично важливої кількісної характеристики, необхідно дослідити початковий ділянку залежності між деформацією і часом, за якого деформація полімеру обмежена пружною та в'язкопружною деформацією. Представлено характерні залежності деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при постійній швидкості розведення затискачів в процесі нормативної процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас. Для всіх зразків спостерігається початковий (до 10 – 15 секунд) лінійний ділянку з різною швидкістю зростання загальної деформації розтягування.

Ключові слова: безгалогенні кабельні полімерні композиції, деформація, час, навантаження

В.М. ЗОЛОТАРЬОВ, Ю.А. АНТОНЕЦЬ, Л.А. ЩЕБЕНЮК, А.А. ШУРУПОВА

О НЕОБХОДИМОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ В УСЛОВИЯХ КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Выполнен анализ результатов сравнения механических свойств полиолефина наполненного антипиренами. Приведены экспериментальные данные оценки динамики развития деформации одноосного растяжения при нормативных испытаниях кабельных полимерных композиций в условиях производства. Организация технологического контроля обеспечения механической прочности элементов конструкции, изготовленных из безгалогенных пластмасс в условиях конкретного производства, является одной из актуальных задач при изготовлении пожаробезопасных кабелей. Для анализа динамики развития деформации безгалогенных кабельных пластмасс и определения практически важной количественной характеристики, необходимо исследовать начальный участок зависимости между деформацией и временем, при котором деформация полимера ограничена упругой и вязкоупругой деформацией. Представлены характерные зависимости деформации удлинения образцов от времени одноосного растяжения при постоянной скорости разведения зажимов в процессе нормативной процедуры определения механических характеристик для безгалогенных кабельных пластмасс. Для всех образцов наблюдается начальный (до 10 – 15 секунд) линейный участок с разной скоростью роста общей деформации растяжения.

Ключевые слова: безгалогенные кабельные полимерные композиции, деформация, время, нагрузка

V.M. ZOLOTAREV, Y.A. ANTONETS, L.A. SHCHEBENIUK, A.A. SHURUPOVA

ON THE NECESSITY OF DETERMINING THE DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF DEFORMATION DURING MECHANICAL TESTS UNDER CONDITIONS OF CABLE PRODUCTION

The analysis of results of comparison of mechanical properties of polyolefin filled with fire retardants is carried out. Experimental data for evaluating the dynamics of the development of uniaxial tensile deformation during standard tests of cable polymer compositions under production conditions are presented. The organization of technological control of ensuring the mechanical strength of structural elements made of halogen-free plastics in a specific production environment is one of the urgent tasks in the manufacture of fire-safe cables. To analyze the dynamics of the development of deformation of halogen-free cable plastics and to determine a practically important quantitative characteristic, it is necessary to study the initial section of the relationship between deformation and time, at which the deformation of the polymer is limited by elastic and viscoelastic deformation. The characteristic dependences of the elongation deformation of the samples on the time of uniaxial tension at a constant rate of separation of the clamps are presented in the process of the standard procedure for determining the mechanical characteristics for halogen-free cable plastics. For all samples, an initial (up to 10 – 15 seconds) linear section is observed with a different growth rate of the total tensile strain.

Key words: halogen-free cable polymer compositions, deformation, time, load

Актуальність роботи зумовлена тим, що забезпечення пожежної безпеки кабелів і відповідно кабельних матеріалів – одна з основних задач кабельної техніки при впровадженні інноваційної продукції. Такими є сучасні конструкції кабелів з використанням безгалогенних пластмас. Особливістю безгалогенних пластмас є те, що механічна міцність в експлуатації цих

полімерних матеріалів для елементів конструкції безпосередньо залежить і від вмісту антипірену, і від технології накладання пластмаси. Тому організація технологічного контролю забезпечення механічної міцності елементів конструкції, виготовлених із безгалогенних пластмас в умовах конкретного виробництва, є однією з актуальних задач при виготовленні поже-

жебезпечних кабелів.

Проблема полягає в тому, що нормативна процедура визначення механічних характеристик кабельних пластмас в умовах виробництва [1] визначає такі характеристики, які не включають час: – максимальне розтягувальне зусилля P_m (maximum tensile force); – розтягувальне напруження $\sigma = P/F$ (tensile stress); – міцність під час розтягування $\sigma_m = P_m/F$ (tensile strength); – відносного видовження під час розривання $\delta = (l - l_0) \cdot 100/l_0$, % (elongation at break), де F – площа поперечного перерізу зразка до випробування, l_0 – контрольна довжина нерозтягнутого зразка, l – контрольна довжина зразка під час розривання.

Найбільш загальною теорією вирішення задач визначення механічної міцності полімерних матеріалів є теорія в'язкопружності [2], згідно з якою саме полімерні матеріали і їх композиції є в'язкопружними, для яких залежність між напруженням і деформацією включає час.

Важливо те, що загально відомим є явище релаксації напруження в полімерах – процес поступової зміни напруження в попередньо деформованому полімерному матеріалі. Саме це явище тісно пов'язане зі стійкістю полімерів до механічних навантажень впродовж терміну їх експлуатації.

Без урахування динаміки (зміни в часі) залежності між деформацією і механічним напруженням впродовж процесів навантаження і релаксації практично неможливо порівнювати механічні властивості в'язкопружних матеріалів [2] з точки зору їх експлуатаційних властивостей.

Аналіз літератури. Деформація в'язкопружного тіла в момент часу t визначається напруженням в цей момент $\sigma(t)$ плюс деформація, що виникла в попередній малий період часу $\Delta\epsilon$ [2]:

$$\epsilon(t) = [\sigma(t)/E] + \Delta\epsilon, \quad (1)$$

де E – модуль пружності; $\Delta\epsilon$ – сума попередніх деформацій в моменти часу s на проміжку часу від 0 до t , вплив яких на поточну деформацію тим менший, чим більша різниця $t - s$:

$$\epsilon(t) = [\sigma(t)/E] + E^{-1} \int K(t-s) \sigma(s) ds, \quad (2)$$

де $K(t)$ – функція впливу напружень $\sigma(s)$ в момент часу s на деформацію в момент часу t , $K(t)$ пропорційна швидкості деформування при напруженнях, менших за ті, які викликають помітну остаточну деформацію.

Важливо те, що для аналізу динаміки розвитку деформації безгалогенних кабельних пластмас і визначення практично важливої кількісної характеристики, необхідно дослідити початковий участок залежності між деформацією і часом, за якого деформація полімеру обмежена пружною та в'язкопружною деформацією.

В [3] наведено залежності механічної напруженості від часу при одноосному розтягуванні для ненаповнених ПВХ-пластикатів і зразків високонаповнених антипіренами.

Для зразків наповнених антипіренами (мегалон) зафіксоване явище, назване умовно «текучість», за якого деформація зростає (пропорційно часу), а опір деформації різко зменшується: за час до 20 с стано-

вить 2,5 МПа/с, а за час з 20 с до 40 с становить 0,005 МПа/с. Різниця настільки значна, що нехтувати нею не слід. Запропоновану в [3] модель для кількісної характеристики участку «текучість», представлено на рис.1 і на її основі орієнтовно визначена оцінка коефіцієнту внутрішнього тертя η , який в СІ визначається в паскалях, помножених на секунду, і для зразків мегалону оцінений в діапазоні (140 – 160) Па·с.

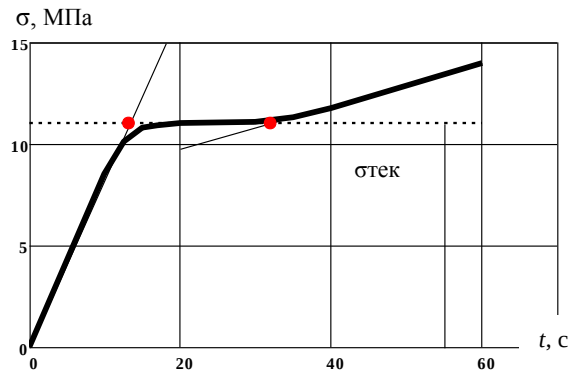


Рис. 1. Схема участку «текучості» в залежності зусилля розтягування σ від часу розтягування t для зразків високонаповнених антипіренами [3]

Важливо те, що при $\sigma < \sigma_{тек}$ спостерігається лінійний участок збільшення механічної напруженості від часу, що за постійної нормованої швидкості розведення затискачів розривної машини означає лінійне збільшення загальної деформації зразка при розтягуванні. Таким чином для високонаповнених антипіренами ПВХ-пластикатів за [3] спостерігається початковий участок залежності між деформацією і часом, за якого деформація полімеру обмежена пружною та в'язкопружною деформацією, оскільки «текучість» означає розвиток пластичної деформації.

Для практичних застосувань у кабельній техніці важливим є режим навантаження, за якого механічне напруження є постійна величина, оскільки відомо, що після виготовлення ізоляції чи оболонки із пластмаси в них завжди є внутрішні механічні напруження. Якщо $\sigma(t) = \sigma(s) = \sigma_{тек}$ (див. рис. 1), то диференціювання співвідношення (2) дає можливість визначити функцію впливу як пропорційну швидкості деформування і тим самим кількісно характеризувати механічну стійкість матеріалу за $\sigma(t) < \sigma_{тек}$, тобто для режимів навантаження притаманних умовам експлуатації:

$$K(t) = (E / \sigma) \cdot d\epsilon/dt. \quad (3)$$

Мета роботи. Експериментальне дослідження динаміки деформування безгалогенних кабельних пластмас за нормативної процедури визначення їх механічних характеристик залежно від рецептури (вміст антипіренів) і від технології накладання пластмаси в умовах виробництва. Розроблення кількісної характеристики динаміки розвитку деформації для порівняння впливу технології накладання пластмаси на механічні властивості в'язкопружних матеріалів.

Основні результати. Виконано дослідження залежності деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при постійній швидкості розведення затискачів в процесі нормативної процедури

визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас.

Експериментальну роботу проведено на базі центральної заводської лабораторії ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ» за участі студентів з кафедри «Електроізоляційна і кабельна техніка» НТУ «ХПІ». Досліджено безгалогенні компаунди фірми Condor Compaunds GmbH.

На рис. 2 представлено характерні залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування при постійній швидкості розведення затискачів в процесі нормативної процедури визначення механічних характеристик для безгалогенних кабельних пластмас.

Для всіх зразків спостерігається три участки залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування: початковий (до 10 – 15 секунд) δL зменшується; середній (тривалість 20 – 25 секунд) δL практично не змінюється; третій (тривалість орієнтовно 20 секунд) δL поступово зменшується або зростає залежно від того, по відношенню до початкової $L(0)$ чи поточної $L(t)$ довжини обчислено δL .

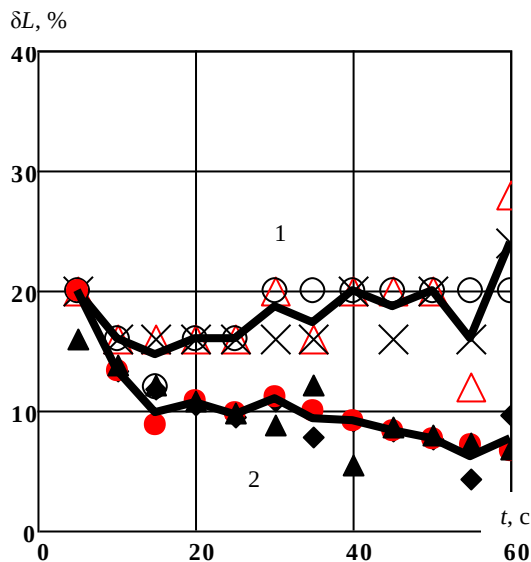


Рис. 2. Характерні залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування для зразків безгалогенних кабельних пластмас: 1 – по відношенню до початкової довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(0)$; 2 – по відношенню до поточної довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(t)$

На наш погляд саме оцінка відносної деформації видовження зразків по відношенню до поточної довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(t)$ (2 на рис. 2) відповідає поставленій меті: дослідженню динаміки деформування безгалогенних кабельних пластмас оскільки в кожен момент часу t швидкість деформування $d\epsilon/dt$ залежить від попередніх деформацій. Відтак найбільш інформативним є початковий участок залежності відносної деформації видовження зразків від часу одноосного розтягування.

В подальшому швидкість розтягування контрольної ділянки зменшується і суттєво відрізняється для різних зразків, що свідчить про нестабільність норма-

тивної характеристики відносного видовження при розриві $\delta = (l - l_0) \cdot 100 / l_0$ на відміну від лінійного збільшення загальної деформації зразка на початковому участку (до 15 секунд).

Процес деформування в'язкопружних матеріалів є одночасним розвитком пружних, в'язкопружних, пластичних і релаксацийних складових, співвідношення яких з часом змінюються.

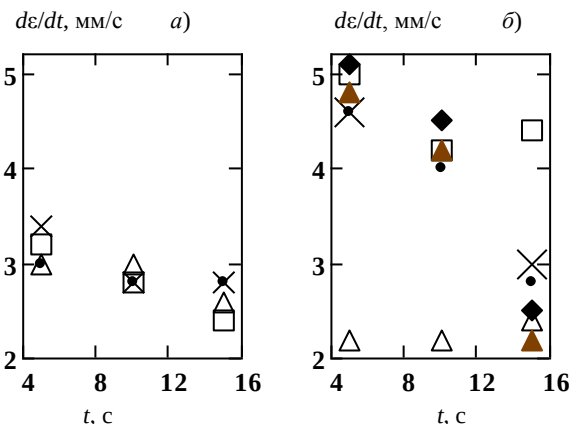


Рис. 3. Початкові участки (до 15 секунд) практично лінійного збільшення загальної деформації зразка при розтягуванні зразків безгалогенних кабельних пластмас характеризуються зменшенням швидкості деформування, однак суттєво різним її розсіюванням для різного вмісту антипіренів: а) – питома маса 1,5 г/см³; б) – питома маса 1,25 г/см³

Важливо те, що існує зв'язок між швидкістю деформації $d\epsilon/dt$ і міцністю під час одноосного розтягування σ_m (коефіцієнт лінійної кореляції 0,8, рис. 4, а). Тому при аналізі впливу технологічних і рецептурних змінних на механічні властивості полімерних матеріалів інформаційний пріоритет має саме динаміка деформації $d\epsilon/dt$ на початковому участку.

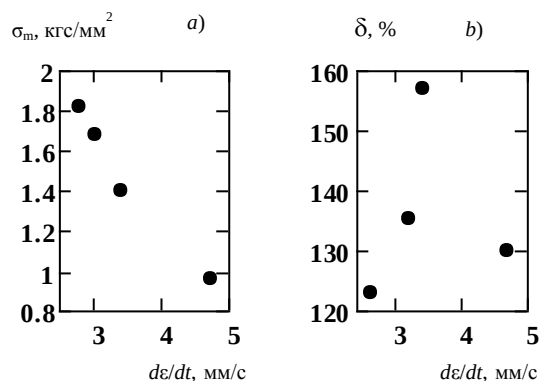


Рис. 4. Ілюстрація зв'язку між швидкістю деформації $d\epsilon/dt$ і а) міцністю під час одноосного розтягування σ_m (коефіцієнт лінійної кореляції 0,8; б) відносним видовженням в момент розривання зразка $\delta = (l - l_0) \cdot 100 / l_0$ (коефіцієнт лінійної кореляції 0,6)

Дані на рис. 4 свідчать про те, що у проміжок часу перед розривом зразка динаміка деформування принципово відрізняється від тієї, що була до моменту досягнення максимального розтягувального зусилля P_m (maximum tensile force).

Тому оцінювання показників динаміки деформації

має бути саме по відношенню до поточної довжини зразка $\delta L = \Delta L / L(t)$ (див. залежність 2 на рис. 2). Відповідні дані наведені в табл. 1 і проілюстровані на рис. 5.

Таблиця 1

№ п/п	Проміжок часу розтягування с	Оцінка змінювання швидкості розтягування мм/с	Оцінка прискорення мм/с ²
1	0 ... 10	1 ... 0,75	-0,025
2	10 ... 30	0,75 ... 0,75	0
3	30 ... 50	0,75 ... 1	+ 0,012
4	50 ... 55	1 ... 1,4	+ 0,25

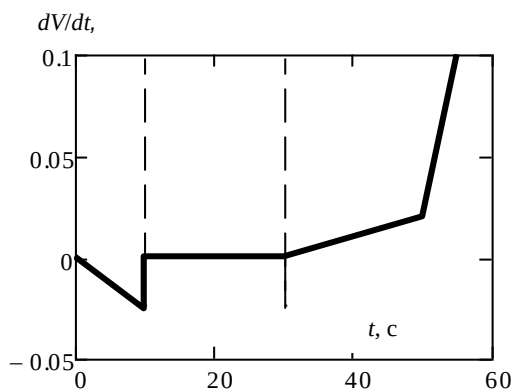


Рис. 5. До порівняння оцінки змінювання швидкості деформації dV/dt , мм/с², впродовж послідовних проміжків часу при одноосному розтягуванні для зразків безгалогенних кабельних пластмас

Дані рис. 5 кількісно підтверджують висновок щодо значної різниці динаміки деформування зразка до і після досягнення максимального розтягуювального зусилля P_m (maximum tensile force). Тому для визначення параметрів пластичності наповненої пластмаси слід кількісно характеризувати перші три ділянки на схемі рис. 5.

Відомо [2], що процес деформування в'язкопружних матеріалів є одночасним розвитком пружних, в'язкопружних, пластичних і релаксаційних складових, співвідношення яких з часом змінюються. Для експлуатації важливою є динаміка процесу деформування на перших двох ділянках, для яких релаксаційна складова найбільш виражена і відповідно в процесі експлуатації внутрішні напруження в матеріалі поступово зменшуються.

Для першої ділянки можливе орієнтовне оцінювання модуля пружності E^* за (1) якщо знехтувати в перші кілька секунд впливом попередніх деформацій $\Delta \varepsilon$:

$$E^* = \sigma(t) / \varepsilon(t). \quad (4)$$

Для другої ділянки можливе орієнтовне оцінювання коефіцієнту динамічної в'язкості η (коефіцієнту внутрішнього тертя [4]) як добуток середнього для цієї ділянки напруження σ_{2cp} на тривалість другої ділянки τ_2 , визначену експериментально:

$$\eta = \sigma_{2cp} \cdot \tau_2. \quad (5)$$

Відповідні оцінки для подібних матеріалів з питомою масою 1,5 г/см³ і 1,25 г/см³ наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Питома маса, г/см ³	Традиційні параметри		Додаткові параметри	
	Міцність при розтягуванні $\sigma_m = P_m/F$ МПа	Відносне видовження $\delta = (l - l_0) \cdot 100/l_0$, %	Модуль пружності E^* , МПа	Динамічна в'язкість η , МПа·с
1,50	13,65	316	16,5	1030
1,25	21,23	321	25,7	680

Параметри, які відображають динаміку деформування наповненого полімеру до досягнення максимального розтягуювального зусилля і тому є важливими саме для умов експлуатації, надають суттєву додаткову інформацію про пластичність матеріалу в цих умовах. Динамічна в'язкість η значно чутливіша до кількості наповнювача, ніж традиційний параметр відносне видовження при розриві.

Оцінки модуля пружності E^* на початку навантаження зразка, по перше, корелюють із традиційним параметром міцності σ_m , але його помітно більші значення свідчать про можливість визначення граничних навантажень, за яких переважають пружні і в'язкопружні деформації, а отже і процеси релаксації внутрішніх напружень в готовому виробі.

Тому при аналізі впливу технологічних і рецептурних змінних на механічні властивості полімерних матеріалів інформаційний пріоритет має саме динаміка деформації $d\varepsilon/dt$ на початкових ділянках навантаження зразка, які є важливими саме для умов експлуатації і надають суттєву додаткову інформацію про пластичність матеріалу в цих умовах.

Висновки. 1. Оцінки швидкості деформації видовження впродовж малих (3 с ... 5 с) послідовних проміжків часу розтягування (математично похідної деформації видовження $d\varepsilon/dt$) свідчать про те, що динаміка деформації видовження $d\varepsilon/dt$ поступово зменшується. При цьому чутливість динаміки деформації видовження $d\varepsilon/dt$ до зміни рецептури чи технології подібних матеріалів впродовж перших 15 с розтягування суттєва (рис. 2): для матеріалу з питомою масою 1,5 г/см³ $d\varepsilon/dt$ в діапазоні (2,5 ... 3,5) мм/с; для матеріалу з питомою масою 1,25 г/см³ $d\varepsilon/dt$ в діапазоні (2,0 ... 5,0) мм/с.

2. Існує зв'язок між $d\varepsilon/dt$ і міцністю під час одноосного розтягування σ_m (коефіцієнт лінійної кореляції 0,8, рис. 4а) і практично відсутній зв'язок між швидкістю деформації $d\varepsilon/dt$ і відносним видовженням при розриві δ (коефіцієнт лінійної кореляції 0,6, рис. 4б). Тому при аналізі впливу технологічних і рецептурних змін на механічні властивості матеріалу інформаційний пріоритет має саме динаміка деформації $d\varepsilon/dt$ на початкових ділянках навантаження зразка, які є важливими саме для умов експлуатації.

3. Параметри, які відображають динаміку деформування наповненого полімеру до досягнення максимального розтягуювального зусилля і тому є важливими саме для умов експлуатації, надають суттєву додаткову інформацію про пластичність матеріалу в цих умовах. Динамічна в'язкість значно чутливіша до кількості наповнювача, ніж відносне видовження при розриві.

4. Запропоновані додаткові кількісні характеристики динаміки розвитку деформації розтягування наповненого полімеру для порівняння впливу рецептур-

них та технологічних змін в умовах виробництва. накладання пластмаси на механічні властивості в'язко-пружних матеріалів. Визначення модуля пружності та коефіцієнту динамічної в'язкості для початкових ділянках навантаження зразка є важливим саме для умов експлуатації, за яких механічні навантаження мають бути суттєво меншими за так звану «міцність при розриві», а допустимі деформації на порядок менші за відносне видовження при розриві.

Список літератури

- 1 IEC 60811-501:2012. Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 501: Mechanical tests – Test for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds.
- 2 М.С. Шидловський. Нові матеріали: частина 1. Структура і механічні властивості конструкційних полімерів. – Навчальний посібник для вузів. – Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Скоропадського». – 2017. – 192 с.
- 3 Л.А. Щебенюк, С.А. Рябинин, А.И. Стурченко. К анализу зависимости механического напряжения от времени одноосного растяжения для образцов высоконаполнен-

ных антипиренами ПВХ-пластиков / Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – №24/- с. 19 – 21.

- 4 Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Электротехнические материалы. – Учебник для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. – 1985. – 304 с.

References (transliterated)

- 1 IEC 60811-501:2012. Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 501: Mechanical tests – Test for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds.
- 2 M.S. Shchidlovskij. New materials: part 1. Structure and mechanical properties polymer. Kyiv: Polytechnic Institute Publ., 2017. 192 p. (Ukr).
- 3 L.A. Shchebeniuk, S.A. Rjabinin, A.I. Sturchenko. The analysis of dependence mechanical tensile stress of filled PVC-polymers with time elongation. Kharkiv: Kharkiv Polytechnic Institute Publ., 2014. – №24 - p. 19 – 21.(Rus).
- 4 N.P. Bogoroditsky, V. V. Pasynkov, B. M. Tareev. Electrical engineering materials. Moscow. – 1979. – 361p.

Надійшла (received) 13.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Володимир Михайлович (Золотарев Владимир Михайлович, Zolotarev Vladimir Mihailovich) – доктор технічних наук, професор, генеральний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 728-12-48; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Антонець Юрій Панасович (Антонец Юрий Афанасьевич, Antonets Yuri Afanasievich) – кандидат технічних наук, технічний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 728-12-64; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Щебенюк Леся Артемівна (Щебенюк Леся Артемовна, Shchebeniuk Lesia Artemovna) – кандидат технічних наук, професор кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Шурупова Аліна Альбертівна (Шурупова Алина Альбертовна, Shurupova Alina Albertovna) – начальник лабораторії випробувань пластмас ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 754-52-04; e-mail: lab@yuzhcable.com.ua

І.О. КОСТЮКОВ, Ю.Г. ГОНТАР**АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВОГО ЕФЕКТУ НА ВЕЛИЧИНУ АКТИВНОГО ОПОРУ СУЦІЛЬНИХ ТА БАГАТОПРОВОЛОЧНИХ ЖИЛ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ**

У статті проведено аналіз деяких розрахункових співвідношень, що використовуються для визначення впливу поверхневого ефекту на величину активного опору суцільних і багатопроволочних жил силових кабелів. Показано, що застосування розглянутих розрахункових співвідношень призводить до висновку, згідно з яким ускладнення конструкції жили силового кабелю за рахунок її виготовлення з скручених між собою дротів зменшує вплив поверхневого ефекту на опір жили в порівнянні з суцільною жилою аналогічного номінального перерізу.

Ключові слова: поверхневий ефект; внутрішня індуктивність; комплексний опір.

И. А. КОСТЮКОВ, Ю. Г. ГОНТАРЬ**АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА НА ВЕЛИЧИНУ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЛОШНЫХ И МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЖИЛ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ**

В статье проведен анализ некоторых расчетных соотношений, которые используются для определения влияния поверхностного эффекта на величину активного сопротивления сплошных и многопроволочных жил силовых кабелей. Показано, что применение рассмотренных расчетных соотношений приводит к выводу, согласно которому усложнение конструкции жилы силового кабеля за счет ее изготовления из скрученных между собой проволок приводит к уменьшению влияния поверхностного эффекта на сопротивление жилы по сравнению со сплошной жилой аналогичного номинального сечения.

Ключевые слова: поверхностный эффект, внутренняя индуктивность, комплексное сопротивление.

I. KOSTIUKOV, Yu. GONTAR**AN ANALYSIS OF MODELS FOR THE ESTIMATION OF THE IMPACT OF SKIN EFFECT ON THE VALUE OF ACTIVE RESISTANCE OF SOLID AND MULTI-CONDUCTOR CORES OF POWER CABLES**

The article analyzes some relations that are used in order to determine the influence of skin effect on the value of the active resistance of solid and stranded conductors of power cables. It is shown that the applying of the considered relations leads to the conclusion that the complication of the structure of the core of the power cable due to its manufacture from twisted together wires leads to the decreasing of the influence of skin effect on the resistance of power cable core in comparison with a solid core of a similar nominal cross-section. It was shown that this reduction takes place due to the calculation of the electrical resistance of power cable core based on the relation which is based on the applying of the nominal cross-section of the power cable core. In the range of core cable cross-section values from 240 mm² to 500 mm², despite some increase in core resistance, the influence of skin effect is not significant enough to transfer the value of the complex resistance to the region almost independent of the generalized parameter x phase angle. In the same range of values of the cross sections of the core such a transition of its complex resistance in the region of almost constant value of the phase angle can be achieved by increasing the frequency of current flowing through the core, however, this transition occurs in the frequency range much higher than the value of the industrial frequency.

Key words: skin effect; internal inductance; impedance.

Вступ. Величина активного опору жили силового кабелю є одним із багатьох параметрів, що значною мірою визначають таку важливу експлуатаційну характеристику силового кабелю, як його пропускна спроможність [1]. В реальних умовах експлуатації величина активного опору залежить від багатьох різних факторів, серед яких суттєву роль відіграють конструкція жили силового кабелю, технологія її виготовлення, а також нерівномірність розподілу щільності струму по перерізу жили внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості. Вплив поверхневого ефекту та ефекту близькості на пропускну спроможність призводить до необхідності застосування сегментованих жил (типу «Міллікен») для силових кабелів із достатньо великим перерізом жили [2, 3]. В такому випадку, з точки зору розвитку моделей для визначення впливу поверхневого ефекту на величину активного опору жили силового кабелю, суттєве значення має аналіз питання щодо порівняння ступеня впливу поверхневого ефекту на величину активного опору суцільних та багатопроволочних жил силових кабелів. В практиці визначення активного опору жил високо-

частотних кабелів приймається положення, згідно з яким ускладнення конструкції жили кабелю за рахунок її виготовлення із застосуванням декількох проволок призводить до збільшення поверхневого ефекту в жилі кабелю [4]. Згідно із [4] фізичне обґрунтування такого збільшення полягає у існуванні в жилі додаткової компоненти електромагнітного поля, внаслідок відхилення форми шляху протікання струму від прямолінійного через спіральність накладання проволок в жилі кабелю. Одним із можливих шляхів врахування такого збільшення активного опору є застосування методу «еквівалентного перерізу», що полягає у визначенні загального перерізу провідника, що складається з декількох неізолюваних проволок [4]. Оскільки для силових кабелів характерними є значно більш складні конструкції жил, щонайменше внаслідок значно більших значень величин їх можливих перерізів, таке збільшення впливу поверхневого ефекту на величину активного опору жили потребує додаткового аналізу.

Мета статті полягає в аналізі способів врахування впливу поверхневого ефекту на активний опір суціль-

них та багатопроволочних жил силових кабелів із застосуванням відомих в кабельній техніці розрахункових моделей та співвідношень.

Електричний опір та внутрішня індуктивність однорідного прямолінійного циліндричного провідника. В реальних умовах експлуатації кабельної лінії опір жили силового кабелю змінному струму визначається конструкцією жили, технологією її виготовлення, електромагнітними властивостями матеріалів з яких виконана жила (в тому числі при конкретному струмовому навантаженні, що визначає температуру жили силового кабелю), а також, для деяких важливих для практики випадків, скін-ефектом та ефектом близькості. Зазначені ефекти обумовлюють перерозподіл щільності струму по перерізу жили кабелю. Такий перерозподіл щільності струму призводить до того, що внутрішня частина жили стає менш навантаженою електричним струмом і, відповідно, до збільшення опору жили змінному струму. Інтенсивність впливу поверхневого ефекту та ефекту близькості на активний опір жили силового кабелю залежить від безрозмірного параметру x (узагальнений параметр контролю, згідно із прийнятою в [5] термінологією), що визначається за (1):

$$x = a\sqrt{\omega\mu\gamma}, \quad (1)$$

де a – радіус жили кабелю, γ – питома електропровідність матеріалу жили, ω – кутова частота, μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу жили. На рис. 1 наведено залежності розрахованого згідно із (1) параметру x для суцільних циліндричних мідних та алюмінієвих провідників при частоті 50 Гц. Враховуючи, що типовий розрахунок пропускної спроможності силових кабелів вимагає проведення розрахунків за максимальної тривало допустимої температури жили, розрахунки проводились при температурі жили 90°C, що є максимально тривало допустимою для силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену.

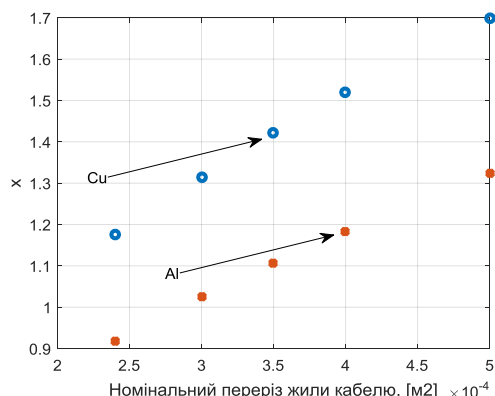


Рис. 1. Залежність розрахованого за (1) параметру x від номінального перерізу жили силового кабелю при температурі 90°C

Крім розрахунків при 90°C, враховуючи роботу кабельної лінії при змінному струмовому навантаженні, і, відповідно, при змінній температурі жили, розрахунки безрозмірного параметру x також були проведені приймаючи температуру жили рівною 50°C.

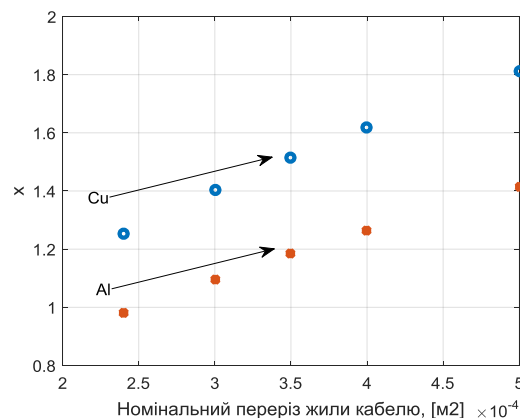


Рис. 2. Залежність розрахованого за (1) параметру x від номінального перерізу жили силового кабелю при температурі 50°C

З наведених на рис. 1 та рис. 2 результатів розрахунків можна зробити висновок, що зменшення температури внаслідок температурної залежності електропровідності матеріалу жили призводить до збільшення розрахованого за (1) параметру x і, відповідно, до збільшення впливу поверхневого ефекту на опір жили кабелю.

Для круглої суцільної жили можливе аналітичне визначення її активного та індуктивного опору, як із врахуванням ефекту близькості, так і при врахуванні скін-ефекту. При нехтуванні впливом ефектом близькості, тобто при врахуванні лише впливу поверхневого ефекту на опір жили, комплексний опір суцільної циліндричної жили можна знаходити згідно із виразом (2) [6]:

$$Z_a = \frac{1}{\gamma\pi a} \frac{\sqrt{ik} I_0(\sqrt{ik}a)}{2 I_1(\sqrt{ik}a)}, \quad (2)$$

де $I_0(i^{0.5}ka)$ – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку, $I_1(i^{0.5}ka)$ – модифікована функція Бесселя першого роду першого порядку, k – коефіцієнт вихрових струмів, що визначається згідно із (3):

$$k^2 = \omega\mu\gamma. \quad (3)$$

Розрахунок модифікованих функцій Бесселя від комплексного аргументу в (2) для зручності можна проводити із використанням відомих формул:

$$I_0(\sqrt{i}x) = \text{ber}_0x + i\text{bei}_0x \quad (4)$$

$$I_1(\sqrt{i}x) = \text{ber}_1x + i\text{bei}_1x, \quad (5)$$

де ber_0x , bei_0x , ber_1x , bei_1x – функції Кельвіна нульового та першого порядку.

Виділяючи дійсну та уявну частину виразу (2) можна записати окремі вирази для активного опору та індуктивного опору прямолінійного циліндричного провідника. Враховуючи (2) а також (4, 5), вираз для фазового кута комплексного опору жили можна записати згідно із (6):

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}\right), \quad (6)$$

де коефіцієнти $A_1..A_4$ та $B_1..B_4$ можуть бути визначені

згідно із виразами:

$$A_1 = \text{ber}_0 x \text{ber}_1 x, \quad (7)$$

$$A_2 = \text{bei}_0 x \text{bei}_1 x, \quad (8)$$

$$A_3 = -\text{bei}_0 x \text{ber}_1 x, \quad (9)$$

$$A_4 = \text{ber}_0 x \text{bei}_1 x, \quad (10)$$

$$B_1 = \text{bei}_0 x \text{ber}_1 x, \quad (11)$$

$$B_2 = -\text{ber}_0 x \text{bei}_1 x, \quad (12)$$

$$B_3 = \text{ber}_0 x \text{ber}_1 x, \quad (13)$$

$$B_4 = \text{bei}_0 x \text{bei}_1 x. \quad (14)$$

Результати розрахунку залежності фазового кута φ від радіусу жили кабелю та від частоти струму, що протікає по жилі кабелю наведено на рис. 3 та рис. 4.

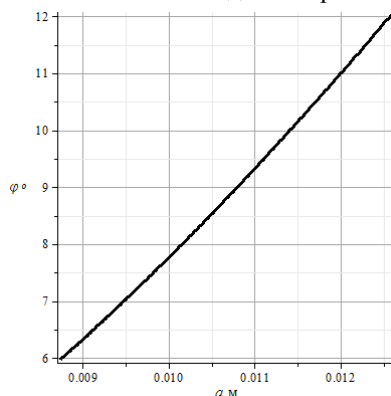


Рис. 3. Залежність розрахованого за (6) фазового кута від радіусу жили кабелю в діапазоні перерізів жили від 240 мм² до 500 мм²

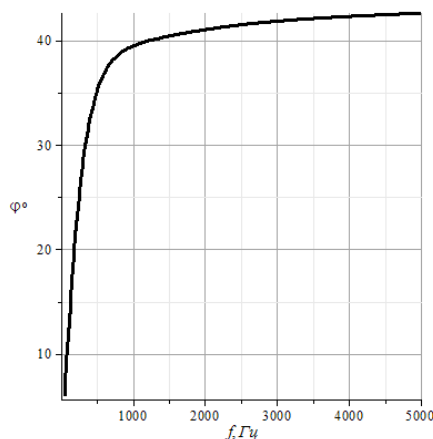


Рис. 4. Залежність розрахованого за (6) фазового кута від частоти змінного струму для перерізу жили силового кабелю 240 мм²

Розрахунок електричного опору багатопроволочних жил силових кабелів. Складна геометрія багатопроволочних жил силових кабелів не дозволяє використовувати аналітичне вирішення задачі, аналогічне до випадку суцільного циліндричного провідника. В загальному випадку, визначення опору багатопроволочної жили силового кабелю змінному струму проводять із використанням формули [7]:

$$R_{\sim} = R_{-}(1 + y_n + y_{\delta}), \quad (15)$$

де R_{-} – опір жили постійному струму, y_n , y_{δ} – допоміжні коефіцієнти, за допомогою яких враховують

вплив скін-ефекту та ефекту близькості на величину опору жили [8].

$$y_n = F(x) \quad (16)$$

$$y_{\delta} = \frac{G(x) \left(\frac{2a}{h}\right)^2}{1 - H(x) \left(\frac{2a}{h}\right)^2} \quad (17)$$

де h – відстань між центрами жил сусідніх кабелів, а $F(x)$, $G(x)$, $H(x)$ – допоміжні функції. Значення функції $F(x)$ наведено в табл. 1. [8]:

Таблиця 1 – Значення допоміжної функції $F(x)$ для розрахунку впливу поверхневого ефекту на опір жили змінному струму

x	$F(x)$
0.5	0
1	0.005
1.5	0.026
2	0.078
2.2	0.111
2.4	0.152
2.6	0.201

При цьому для багатопроволочних жил, на відміну від суцільних, параметр x визначають не за (1) а згідно із формулою (18) [8]:

$$x = \sqrt{\frac{2f\mu_0}{R_{-}}}, \quad (18)$$

Як можна бачити з даних в табл. 1 а також із виразів (15), (16), незважаючи на розрахунок параметру x не за (1), а згідно із виразом (18), його збільшення також призводить до збільшення впливу поверхневого ефекту на активний опір жили силового кабелю, тобто до збільшення різниці між величинами електричного опору жили змінному та постійному струму. В свою чергу, опір жили постійному струму можна знаходити згідно із (19) [7]:

$$R_{-} = \frac{\rho(1 + \alpha(T - 20))(1 + K_0)}{F}, \quad (19)$$

де F – номінальний переріз жили, T – максимальна робоча температура жили, ρ – питомий опір жили при 20 °С, α – температурний коефіцієнт опору, K_0 – коефіцієнт укрутки, який враховує збільшення опору за рахунок збільшення довжини дротин, із яких скручена жила.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнту K_0 для різних типів кабелю [7]

Тип кабелю	K_0
Одножильні силові кабелі із перерізом жили менш ніж 500 мм ²	0,03
Одножильні силові кабелі із перерізом жили 500 – 1000 мм ²	0,04
Одножильні силові кабелі із перерізом жили більше ніж 500 мм ²	0,05
Багатожильні кабелі	0,04

При цьому варто зазначити, що врахування збільшення опору багатопроволочної жили за рахунок збільшення довжини дротин, із яких скручена жила можна проводити не тільки із врахуванням наведених в

табл. 2 коефіцієнтів укрутки, а і шляхом безпосереднього розрахунку середньої укрутки для всієї жили кабелю [8].

Як можна бачити з аналізу виразів (15), (16), (18) а також із наведених в табл. 2 та табл. 1 даних, при врахуванні збільшення активного опору жили кабелю постійному струму за рахунок скручування проволок в жилу силового кабелю шляхом застосування коефіцієнта укрутки K_0 в (19), розрахований за (19) параметр x зменшується. Таке зменшення автоматично призводить до висновку, згідно з яким ускладнення конструкції жили силового кабелю, що пов'язане із застосуванням не суцільних а багатопроволочних жил, призводить до зменшення впливу поверхневого ефекту на електричний опір жили силового кабелю. Зазначене зменшення впливу поверхневого ефекту викликано використанням в (19) саме номінального перерізу жили а не значення її перерізу, що враховує збільшення маси жили за рахунок її скручування із багатьох проволок.

Висновки. Застосування наведених та проаналізованих моделей для розрахунку впливу поверхневого ефекту на величину активного опору жили силового кабелю призводить до висновку, за яким ускладнення конструкції жили за рахунок скручування окремих проволок в жилу силового кабелю призводить до зменшення впливу поверхневого ефекту на активний опір жили кабелю. Зазначене зменшення пов'язане із розрахунком електричного опору жили постійному струму із застосуванням виразу, що передбачає використання величини номінального перерізу жили силового кабелю. В діапазоні значень перерізу жил силових кабелів від 240 мм² до 500 мм², незважаючи на деяке збільшення активного опору жили, вплив поверхневого ефекту не є достатньо суттєвим для переходу величини комплексного опору в область практично незалежного від узагальненого параметру x фазового кута. В цьому ж діапазоні значень перерізів жили такий перехід її комплексного опору в область практично незмінного значення фазового кута може бути досягнутий за рахунок збільшення частоти струму в жилі, проте і такому випадку зазначений перехід відбувається в діапазоні частот, що є набагато більшими за промислову частоту.

Список литературы

1. Kropotin O., Tkachenko V., Shepelev A., Petrova E., Goryunov V., Bigun A. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation, *Przeglad Electrotechniczny*, 2019. Vol. 94, No. 6, P. 77-80
2. Золотарев В.М., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Анализ высокочастотных процессов в кабеле на напряжение 330 кВ с сегментированной жилой при возникновении частичных разрядов в его изоляции, *Технічна електродинаміка*, 2010. № 2, С. 3-9
3. Лету Ф. Токопроводящие жилы высокого качества для высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей (типа «Милликен»), *Кабели и провода*, 2008. № 1, С. 18-21
4. Ефимов И. Е., Останкович Г. А. *Радиочастотные линии передачи*. М.: Связь, 1977. 408 с.
5. Себко В.П., Пушай И.А. К расчету электромагнитных параметров проводящего стержня с продольным током, *Електротехніка і електромеханіка*, 2005. № 2, С. 91-92
6. Кулешев В.Н. *Теория кабелей связи*. М.: Связьиздат, 1950. 419 с.
7. Ларина Э.Т. *Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии*. М.: Энергоатомиздат, 1996. 464 с.
8. Карпушенко В.П., Шибенюк Л.А., Антоненко Ю.А., Науменко О.А. *Силові кабелі низької та середньої напруги*. Х.: Регіонінформ, 2000. 376 с.

References (transliterated)

1. Kropotin O., Tkachenko V., Shepelev A., Petrova E., Goryunov V., Bigun A. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation, *Przeglad Electrotechniczny*, 2019. Vol. 94, No. 6, P. 77-80
2. Zolotarev V.M., Shherba A.A., Podol'cev A.D., Kucherjavaja I.N. Analiz vysokochastotnyh processov v kabele na naprjazhenie 330 kV s segmentirovannoj zhiloy pri vznikenovienii chastichnyh razrjadov v ego izoljacii [Analysis of high-frequency processes in a cable with a voltage of 330 kV with a segmented core in the event of partial discharges in its insulation] *Tekhnichna elektrodinamika*. 2010. no. 2. pp. 3-9.
3. Letu F. Tokoprovodjashhie zhily vysokogo kachestva dlja vysokovol'tnyh i sverhvysokovol'tnyh kabelej (tipa «Milliken»). [High quality conductors for high-voltage and ultra-high-voltage cables (Milliken type)] *Kabeli i provoda*. 2008. no. 1, pp. 18-21
4. Efimov I. E., Ostankovich G. A. *Radiochastotnye linii peredachi* [RF transmission lines] Moscow, Svjaz' Publ., 1977. 408 p.
5. Sebko V.P., Pushhaj I.A. K raschetu jelektromagnitnyh parametrov provodjashhego sterzhnja s prodol'nym tokom, [Calculation of the electromagnetic parameters of a conducting rod with longitudinal current] *Elektrotehnika i elektromehnika*, 2005. no 2, pp. 91-92
6. Kuleshev V.N. *Teorija kabelej svjazi*. [Communication cable theory] Moscow, Svjaz'izdat Publ., 1950. 419 p.
7. Larina Je.T. *Silovye kabeli i vysokovol'tnye kabel'nye linii*. [Power cables and high voltage cable lines] Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 464 p.
8. Karpushenko V.P., Shhebenjuk L.A., Antonec Ju.A., Naumenko O.A. *Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oi naprugi*. [Low and medium voltage power cables] Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p.

Поступила (received) 15.12.20

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Костюков Іван Олександрович (Костюков Иван Александрович, Kostiuikov Ivan) – кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail iakostiukow@gmail.com.

Гонтар Юлія Григорівна (Гонтарь Юлия Григорьевна, Gontar Yuliya Grygorivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», майстер виробничого навчання кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail gontar.yuliya@gmail.com.

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

<i>Гречко О.М., Зеленський В.О.</i> Лабораторний стенд з дослідження причин виникнення та засобів боротьби з неприпустимими відхиленнями напруги мережі живлення у побутових приміщеннях.....	3
<i>Гришук Ю. С., Лещенко В. М., Пантелят М. Г., Варв'янська В. В., Шевлюга О. І.</i> Стенд для дослідження електричних апаратів на базі ARM-мікроконтролера	11
<i>Максєв С.О., Вировець С.В.</i> Сучасна апаратура та обладнання систем «Розумний будинок»	16
<i>Чепелюк О.О., Шнейдерович Є.І., Зорін Є.Ю.</i> Лабораторний стенд для дослідження однофазних реле контролю напруги для захисту побутових споживачів.....	21

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

<i>Борцов А.В.</i> Аппроксимация вольтамперной характеристики вентильной солнечной батареи	27
<i>Долинюк С.І., Баженів В.А.</i> Оптимізація конфігурації електромережі методом по контурної оптимізації.....	30
<i>Калінчик В.П., Побігало В.А., Луців П.Д.</i> Реалізація концепції Smart Grid для побудови системи обліку електроенергії	33

ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНА ТА КАБЕЛЬНА ТЕХНІКА

<i>Золотарьов В.М., Антоненко Ю.А., Щербенюк Л.А., Шурупова А.А.</i> О необходимости определения динамики развития деформации при механических испытаниях в условиях кабельного производства	38
<i>Костюков І.О., Гонтар Ю.Г.</i> Аналіз моделей для оцінювання впливу поверхневого ефекту на величину активного опору суцільних та багатопроволочних жил силових кабелів	43

CONTENT

ELECTRIC APPARATUS

<i>Grechko O.M., Zelenskyi V.O.</i> Laboratory bench for the study of the causes and means of combating unacceptable deviations of the supply voltage in domestic premises.....	3
<i>Grishchuk Yu.S., Leshchenko V.M., Pantelyat M.G., Varvianska V.V., Shevliuha O.I.</i> A stand for research of electrical devices based on ARM-microcontroller.....	11
<i>Makieiev S.O., Vyrovets S.V.</i> Modern apparatus and equipment of the "Smart House" systems	16
<i>Chepelyuk O.O., Shneiderovych Y.I., Zorin Y.Y.</i> Laboratory stand for investigation of single-phase voltage control relays for protection of domestic consumers	21

STRONG ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

<i>Bortsov A.V.</i> Approximation of current-voltage characteristic of ventiled solar battery	27
<i>Dolynyuk S.I., Bagenov V.A.</i> Optimization of the grid configuration by the method of contour optimization.....	30
<i>Kalynchik V.P., Pobigaylo V.A., Luciv P.D.</i> Implementation of Smart Grid concept for construction of electricity accounting system.....	33

ELECTRICAL INSULATION AND CABLE ENGINEERING

<i>Zolotarev V.M., Antonets Y.A., Shchebeniuk L.A., Shurupova A.A.</i> On the necessity of determining the dynamics of development of deformation during mechanical tests under conditions of cable production.....	38
<i>Kostiukov I., Gontar Yu.</i> An analysis of models for the estimation of the impact of skin effect on the value of active resistance of solid and multi-conductor cores of power cables.....	43

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: ПРОБЛЕМИ УДОСКОНАЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І АПАРАТІВ.
ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА

Збірник наукових праць

№ 2 (4) 2020

Головний редактор Є.І. Байда, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар: І. С. Варшамова, НТУ «ХПІ», Україна

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра "Електричні апарати"
Тел.: (057) 707-69-76; e-mail: varshamova.i.s@gmail.com

Підп. до друку 20.12.2020 р. Формат 60×90 1/8. Папір офсетний.

Друк лазерний. Умов. друк. арк. 9,25.

Тираж 300 пр. Зам. № . Ціна договірна.

ТОВ «Друкарня «Мадрид»»

61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11

Тел.: (057) 756-53-25

www.madrid.in.ua info@madrid.in.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК №4399 від 27.08.2012 року