

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. ЗЕЛЕНСЬКИЙ

ЛАБОРАТОРНИЙ 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-электромехаников, 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

© О.М. Гречко, В.О. Зеленський, 2020

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).

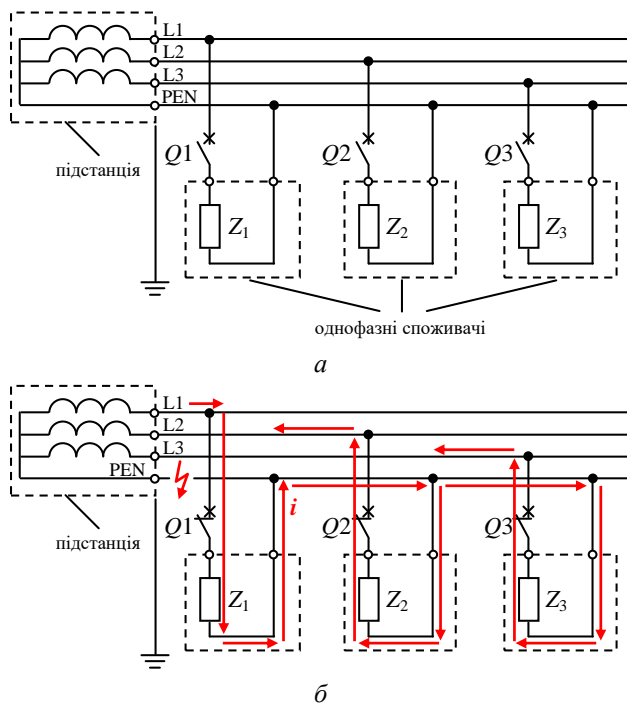


Рис. 1. Системи уземлення TN-C (а – нормальний стан, б – аварійний стан у разі обриву PEN провідника)

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.

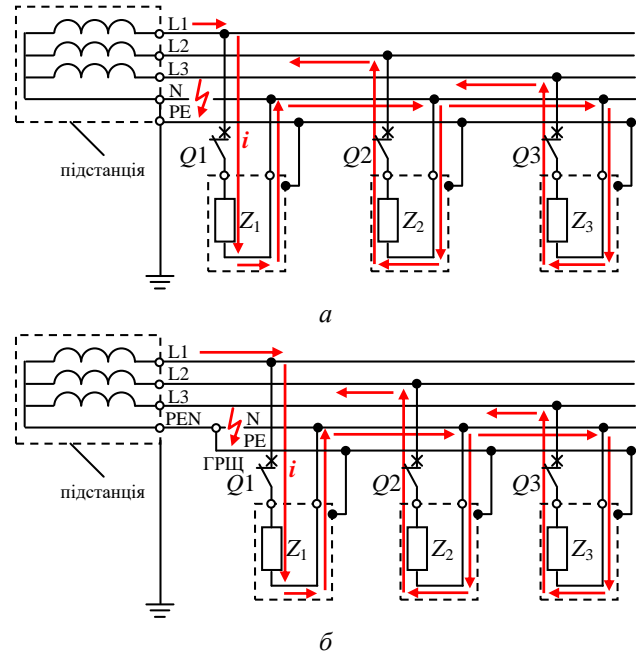


Рис. 2. Шлях протікання струмів у системах уземлення TN-S (а) та TN-C-S (б) у разі обриву N провідника

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 автоматичні відмикачі 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 електро побутові прилади – праску, фен, чайник тощо) та за допомогою цифрового комбінованого амперметру-

вольтметру PA1-PV1 наочно встановити струм і напругу у колі навантаження.

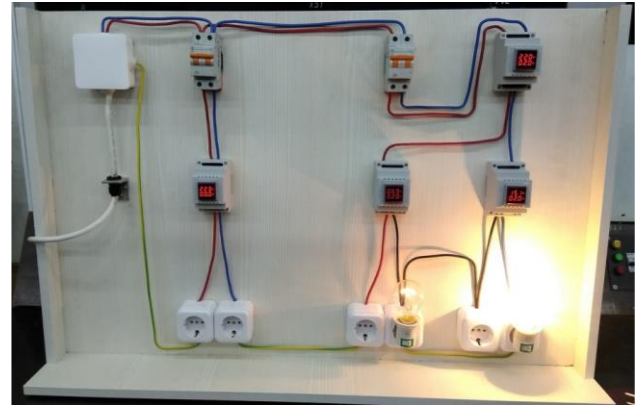


Рис. 4. Перша сторона стенду

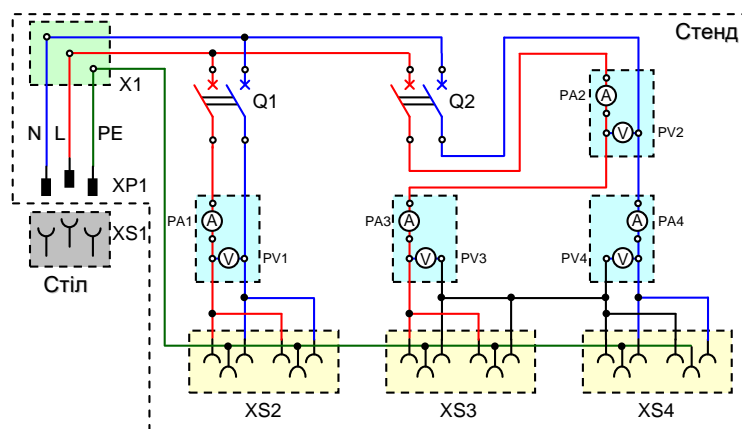


Рис. 5. Принципова схема першої сторони стенду з дослідження паралельного і послідовного підключення навантаження до однофазного джерела живлення

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 амперметрів-вольтметрів PA3-PV3 та PA4-PV4), так і у загальному колі за допомогою амперметра-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 досліди 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.

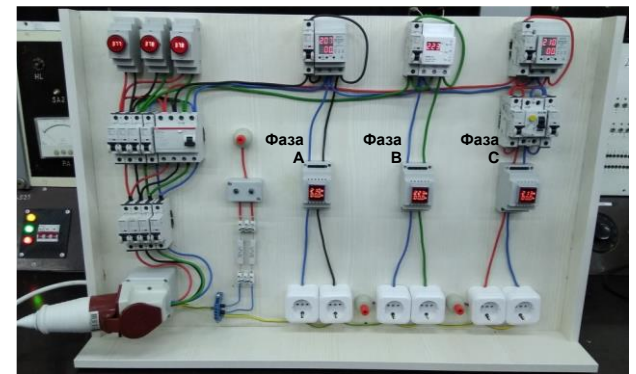


Рис. 6. Друга сторона стенду

Розглянемо принцип роботи схеми. Лабораторний стенд через п'ятививідний роз'єм XP2 за допомогою гнучкого кабелю з роз'ємами XP1 – XS2 підключається до стаціонарного столу із п'ятививідною 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.

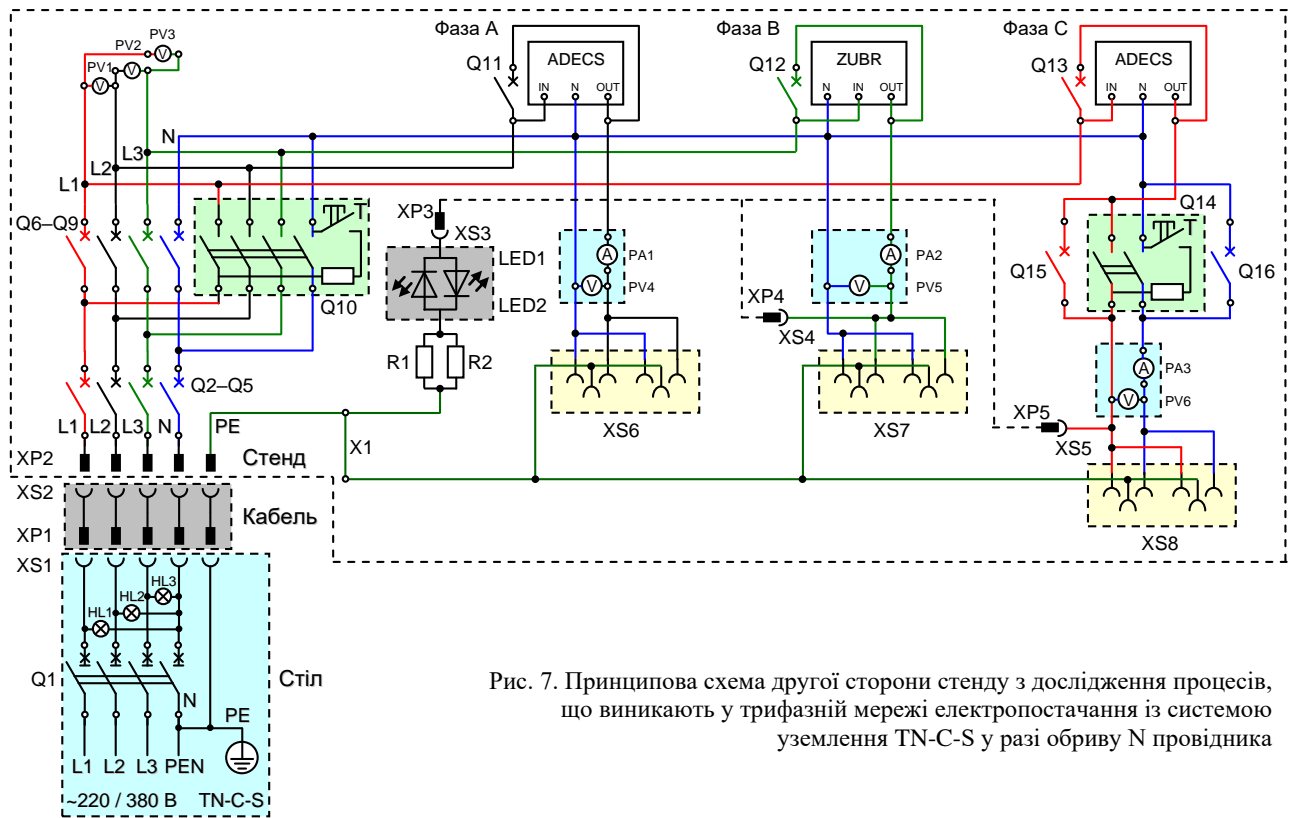


Рис. 7. Принципова схема другої сторони стенду з дослідження процесів, що виникають у трифазній мережі електропостачання із системою уземлення TN-C-S у разі обриву N провідника

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 різницевим 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 різницевим 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 необмежено довгу тривалість 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 увімкнутих 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., Челпек О.О., Пантелят 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. Челпек 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=y5r9E37VJU4>.
6. Челпек 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. Челпек 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. Челпек 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 удосконалення 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 to 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 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 ulashuvannia electrostanovok* [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.