

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Зорін Євгеній Юрійович

УДК 621.316:621.318.5(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА
СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ОДНОФАЗНИХ РЕЛЕ КОНТРОЛЮ
НАПРУГИ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ**

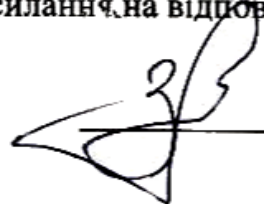
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подается на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

*Зміст містить
за змістом з
першим примір-
ником дисерта-
ції завідувач*




Є.Ю. Зорін

Науковий керівник:

Чепелюк Олександр Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент

Від секретаря:

Юрій Олександрович
Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Зорін Є.Ю. Удосконалення захисних характеристик та схемотехнічних рішень однофазних реле контролю напруги побутових споживачів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 141 – Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка (14 – Електрична інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2023.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення захисних характеристик спрацьовування та схемотехнічних рішень однофазних реле контролю напруги (РКН) побутових споживачів для зменшення споживаної РКН електроенергії, які на відміну від існуючих матимуть можливість вибору стандарту якості електричної енергії і згідно з ними номінальної напруги; разом з тим можливість вибору типу захисних характеристик спрацьовування згідно ІЕС 60255-127:2010 (залежна та незалежна характеристики часу) та можливості розширення їх функціоналу.

Об'єкт дослідження – аварійні режими роботи в трифазних електричних мережах низької напруги з глухоуземленою нейтраллю, що пов'язані з появою недопустимих відхилень напруги в однофазних споживачів (появи перенапруг або недостатніх напруг).

Предмет дослідження – захисні характеристики часу спрацьовування РКН, схемотехніка мікропроцесорних РКН, алгоритми роботи РКН.

У вступі обґрунтовано актуальність захисту однофазних побутових споживачів від недопустимих відхилень напруги в трифазних мережах живлення з глухоуземленою нейтраллю та системою уземлення *TN-C*, представлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, наведено наукову новизну, представлено практичне значення отриманих результатів, апробацію результатів та публікації, надано інформацію щодо особистого внеску здобувача.

У першому розділі проведено аналіз проблематики захисту однофазних побутових споживачів від недопустимих відхилень напруги живлення. Розглянуті і проаналізовані аварійні ситуації в трифазних електричних мережах з глухоуземленою нейтраллю, що призводять до появи недопустимих відхилень

напруги у однофазних споживачів. Оцінено чутливість електропобутової техніки до недопустимих відхилень напруги; проведено огляд та аналіз засобів, що використовуються для захисту від недопустимих відхилень напруги у однофазних споживачів. Обґрунтована актуальність і доцільність застосування саме однофазних РКН побутових споживачів на протиположності іншим електричним апаратам. Проведений огляд однофазних РКН і, на основі вивчення особливостей розглянутих реле, зроблено класифікацію реле за рядом ознак. Проаналізовані конструктивні, схемотехнічні та функціональні особливості однофазних РКН. Розглянуті вимоги стандартів якості електричної енергії в області недопустимих відхилень напруг у однофазних побутових споживачів.

Обрано напрями досліджень, поставлені основні задачі дисертаційної роботи.

У *другому розділі* запропоновані концепція та функціональна схема удосконаленого однофазного РКН, в якому передбачений вибір номінального значення напруги 220 або 230 В згідно одночасно діючих в Україні стандартів якості електричної енергії ГОСТ 13109-97 або ДСТУ EN 50160:2014 відповідно, а також можливість вибору залежної або незалежної захисних характеристик спрацьовування згідно стандарту IEC 60255-127:2010.

Запропонований алгоритм вимірювання напруги, що полягає в оцифруванні вхідної напруги з датчика і подальшої фільтрації сигналу за допомогою синтезованого з використанням з перетворенням Фур'є фільтра, що дозволяє позбутись постійних, перехідних та високочастотних складових мережевої напруги, які можуть призвести до хибних спрацьовувань реле. Розраховані коефіцієнти цифрового фільтру.

У *третьому розділі* розроблено імітаційну Simulink-модель трифазної електричної мережі низької напруги з глухоуземленою нейтраллю та системою уземлення *TN-C* для симуляції аварійних режимів, що пов'язані з появою недопустимих відхилень напруги в електричній мережі живлення кінцевого однофазного споживача.

Розроблено імітаційну Simulink-модель РКН із залежними та незалежними захисними характеристиками спрацьовування. Проаналізовані результати імітаційного моделювання.

Розроблено схемотехніку удосконаленого РКН зі зниженим споживанням електричної енергії, розраховані параметри елементів електричної удосконаленої схеми та здійснено їх вибір.

У *четвертому розділі* зроблено опис розробленого макетного зразка РКН, опис структури програми "прошивки" реле, структури меню налаштувань реле.

Розроблено стенд для дослідження часу спрацювання РКН. Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень часу спрацювання макетного зразка РКН.

Розроблені рекомендації щодо практичного впровадження, технічної реалізації та розширення функціоналу удосконаленого РКН.

У *висновках* наведено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених наукових задач дослідження.

За результатами дослідження отримано такі *наукові результати*:

1. *Вперше* запропоновано концепцію однофазних РКН побутових споживачів, які дозволяють встановлювати тип захисних характеристик спрацювання (залежну або незалежну у часі при недопустимому відхиленні напруги за встановлені порогові значення в РКН), що відповідають сучасному міжнародному стандарту IEC 60255-127:2010, при цьому дані характеристики приведено згідно стандартів якості електричної енергії ГОСТ 13109-97 і ДСТУ EN 50160:2014, які діють в Україні одночасно, згідно яких значення номінальних напруг є 220 або 230 В відповідно.

2. *Удосконалено* імітаційну Simulink-модель трифазної електричної мережі низької напруги з глухоуземленою нейтраллю для імітації аварійних режимів, пов'язаних із появою недопустимих відхилень напруги у однофазних споживачів, у частині врахування впливу параметрів кабельних ліній (активний опір та індуктивний опір), потужності сусідніх однофазних споживачів на значення напруги споживача, у якого проводиться дослідження.

Встановлено максимально і мінімально можливі значення напруги у однофазних споживачів в трифазній електричній мережі (при $U_n = 220$ В, у споживачів, що розташовані близько до трансформаторної підстанції, максимальна напруга може бути $U = 380$ В +10%, при $U_n = 230$ В – $U = 400$ В +10% відповідно) в аварійних ситуаціях, які пов'язані з появою недопустимих

відхилень напруги при типових мінімальній і максимальній потужності навантаження споживача, що дозволяє підбирати налаштування порогів спрацьовування однофазних РКН по напрузі відповідно до потужності споживача;

3. *Вперше* створено імітаційну Simulink-модель однофазного РКН побутових споживачів із залежними та незалежними у часі захисними характеристиками спрацьовування згідно з [1], що дозволяє встановлювати параметри спрацьовування РКН, такі як порогові значення максимальної і мінімальної напруг, час автоматичного повторного включення (АПВ), визначати час спрацьовування РКН в залежності від напруги.

Дана модель містить блоки аналогового інтерфейсу на який поступає напруга електричної мережі. Сигнал оцифровується блоком аналогово-цифрового перетворювача і фільтрується синтезованим фільтром, рівняння і коефіцієнти якого в моделі задаються в спеціалізованому файлі редактора Matlab. На виході цього фільтру отримуємо сигнал, що поступає в блоки, які включають у себе логічні елементи та оператори порівняння і затримки сигналу, що визначають умови для спрацьовування реле та здійснення АПВ у випадку повернення напруги у межі допустимих значень.

4. *Удосконалено* алгоритм вимірювання напруги для однофазного РКН побутових споживачів, в якому на відміну від традиційного розрахунку середньоквадратичного значення напруги, здійснюється дискретизація й фільтрація вхідного сигналу напруги за допомогою синтезованого фільтру, що дозволяє позбавитись постійних і перехідних складових, які спотворюють сигнал і можуть призвести до хибного спрацьовування РКН. Удосконалений алгоритм дозволяє одразу визначити амплітуду обробленого сигналу, застосувавши коефіцієнти фільтру. Визначено раціональний крок по напрузі в масиві даних для апроксимації залежної захисної характеристики, який складає від 2 до 4 В, при цьому відносна похибка буде не більше 1%.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

– розроблено схемотехніку удосконаленого РКН зі зниженим споживанням електричної енергії за рахунок використання мікроконтролера з ядром Cortex M0+, що є одним із найменших за площею кристалу 32-розрядних мікроконтролерних ядер та має декілька режимів енергозберігання. Також

реалізовані можливості управління IPS-дисплеєм РКН, такі як: автоматичне вмикання дисплею при налаштуванні і при спрацюванні РКН на деякий час, що задається в параметрах меню користувачем; є можливість плавного регулювання і встановлення яскравості дисплею для адаптації під освітлення навколишнього середовища;

– реалізовано макетний зразок конструкції удосконаленого однофазного цифрового РКН із кольоровим IPS-дисплеєм, а також неполяризованим бістабільним силовим реле з двома обмотками, що дозволило реалізувати розгалужене й зручне для читання меню РКН, на відміну від існуючих реле з семисегментним індикатором, а також шляхом застосування двообмоткового силового реле спростити схему його керування й виключити споживання електричної енергії котушкою;

– проведено експериментальні дослідження макетного зразка РКН. Встановлено відхилення значення вимірної напруги макетним зразком удосконаленого РКН, яке складає $(0.21...0.69)\%$, за допомогою еталонного вольтметра з класом точності 0.5. Вказане відхилення є меншим за відхилення вимірювань напруги типових РКН відомих виробників – $(1...2)\%$. Встановлено, що час спрацювання макетного зразка РКН відповідає розрахунковим значенням з похибкою $(2.33...3.14)\%$, що є прийнятним. Перевірено достовірність розрахованих захисних характеристик спрацювання.

Дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, виконані відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри електричних апаратів НТУ «ХП» в рамках ініціативної науково-дослідної роботи на тему: "Удосконалення апаратного захисту електричних приладів побутового і аналогічного призначення" (ДР №0123U103223), де здобувач був відповідальним виконавцем.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємстві ТОВ "АВМ АМПЕР". Розроблені імітаційні математичні моделі електричної мережі та однофазного реле контролю напруги використовуються в наукових дослідженнях підприємства при розробці релейного захисту, алгоритми та

схемотехнічні рішення використовуються при розробці нових конструкцій апаратів релейного захисту.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі електричних апаратів НТУ "ХП" при викладанні дисципліни "Електричні апарати", курсовому і дипломному проєктуванні, та науково-дослідних роботах для студентів спеціальності "141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", освітньої програми "Електромеханіка" (спеціалізації 141.07 "Електричні апарати" та 141.08 "Електропобутова техніка").

Ключові слова: однофазне реле контролю напруги, електропобутова техніка, захист споживачів від відхилень напруги, перенапряга, недостатня напруга, норми якості електричної енергії, тимчасова перенапряга, бістабільне електромагнітне реле, навантаження

Список публікацій здобувача

Наукові праці, які відображають основні наукові результати дисертації:

1. Зорін Є. Ю. Класифікація однофазних реле контролю напруги побутових споживачів з огляду на тенденції їх розвитку / Зорін Є. Ю., Чепелюк О. О., Грищук Ю. С. // *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: «Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика». Харків, 2020. № 1. С. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2020.1.03>.

2. Зорін Є. Ю. Лабораторний стенд для дослідження однофазних реле контролю напруги для захисту побутових споживачів / Чепелюк О. О., Шнейдерович Є. І., Зорін Є. Ю. // *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: «Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика». Харків, 2020. № 2. С. 21-26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2020.2.04>.

3. Зорін Є. Ю. Аналіз конструктивних особливостей бістабільних електромагнітних реле / Зорін Є. Ю., Чепелюк О. О., Грищук Ю. С.,

Лещенко В. М. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика». Харків, 2021. № 1 (5). С. 13-20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.1.03>.

4. Зорін Є. Ю. Аналіз схемотехнічних рішень однофазних реле контролю напруги побутових споживачів / Зорін Є. Ю. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика». Харків, 2022. № 1 (7). С. 13-20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.1.03>.

5. Зорін Є. Ю. Удосконалення алгоритмів роботи мікропроцесорного реле контролю напруги однофазних побутових споживачів / Зорін Є. Ю., Чепелюк О. О. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика». Харків, 2023. № 1 (9). С. 11-20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.02>

ABSTRACT

Zorin Y. Y. Improvement of protective characteristics and circuit design solutions in single-phase voltage control relays for household consumers. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 "Electrical Engineering, Power Engineering and Electromechanics" (14 – Electrical engineering). – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2023.

The purpose of the dissertation is to improve the protective characteristics of operation and circuit design solutions of single-phase voltage control relays (VCR) for household consumers to reduce the consumed electricity by VCR, unlike the existing ones, will have the opportunity to choose the standard of the electric energy quality and, according to them, the nominal voltage; at the same time, the possibility of choosing the type of protection characteristics of operation according to IEC 60255-127:2010 (time dependent and time independent characteristics) and the possibility of expanding their functionality.

The object of the study is operation fault modes in the three-phase low-voltage electrical power grids with a solidly earthed neutral, which are associated with the appearance of unacceptable voltage deviations in single-phase consumers (the appearance of overvoltages or undervoltages).

The subject of the study is the protective characteristics of the VCR tripping time, the circuitry of microprocessor VCRs, the VCR's operation algorithms.

The introduction substantiates the relevance of protecting single-phase household consumers from unacceptable voltage deviations in three-phase power networks with a dead-grounded neutral and the *TN-C* grounding system, presents the connection of the work with scientific programs, plans and topics, presents scientific novelty, presents the practical significance of the obtained results, approbation results and publication, information is provided regarding the personal contribution of the applicant.

In *the first chapter*, the problem of protection of single-phase household consumers from unacceptable deviations of the supply voltage is analyzed. Considered and analyzed fault cases in three-phase electrical networks with the solidly earthed neutral, which lead to the appearance of unacceptable voltage deviations in single-phase consumers. The sensitivity of electrical household appliances to unacceptable voltage

deviations was evaluated; a review and analysis of the means used to protect against unacceptable voltage deviations in single-phase consumers was carried out. The relevance and expediency of the use of single-phase VCR household consumers against other electrical devices is well-founded. An overview of single-phase VCRs was carried out and, based on the study of the features of the considered relays, a classification of relays was made according to a number of features. The structural, circuit-technical and functional features of single-phase VCRs are analyzed. Considered requirements of electrical energy quality standards in the area of unacceptable voltage deviations in single-phase household consumers.

The scientific objectives of the dissertation research are formulated.

In *the second chapter*, the concept and functional scheme of the improved single-phase VCR are proposed, in which the choice of the nominal voltage value of 220 or 230 V is provided in accordance with the simultaneously valid in Ukraine electricity quality standards GOST 13109-97 or DSTU EN 50160:2014, respectively, as well as the possibility of choosing a dependent or independent protective characteristics of operation according to standard IEC 60255-127:2010.

The voltage measurement algorithm is proposed, which consists in digitalizing the input voltage from the sensor and subsequent filtering of the signal using a filter synthesized using the Fourier transform, which allows to obtain rid of constant, transient and high-frequency components of the network voltage, which can lead to false tripping of the relay. The digital filter coefficients have been calculated.

In *the third chapter*, an imitation Simulink model of a low-voltage three-phase electrical power grid with a solidly earthed neutral and a *TN-C* grounding system is developed for the simulation of emergency modes associated with the appearance of unacceptable voltage deviations in the electrical power supply network of the final single-phase consumer.

The imitation Simulink model of VCR with time dependent and time independent protection characteristics of tripping has been developed. The results of simulation modeling have been analyzed.

The circuit design of the improved VCR with reduced consumption of electrical energy was developed, the parameters of the elements of the electrical of improved circuit were calculated and their selection was carried out.

In *the fourth chapter*, a description of the developed mock-up sample of the VCR, a description of the structure of the relay "firmware" program, and the structure of the relay settings menu are made.

A stand has been developed for the study of the operation time of the RCN. The analysis of the results of experimental studies of the activation time of the mock-up sample of the VCR was carried out.

Recommendations for practical implementation, technical implementation and expansion of the functionality of the improved VCR have been developed.

In *the conclusions*, the main results of the scientific work regarding the solution of the set scientific problems of the research are given.

Scientific novelty of the results

1. *For the first time*, the concept of single-phase VCRs for household consumers was proposed, which allow to set the type of protective characteristics of tripping (time dependent or time independent in case of unacceptable voltage deviation beyond the set threshold values in the VCRs), which correspond to the modern international standard IEC 60255-127:2010, at the same time, these characteristics are given in accordance with the electricity quality standards GOST 13109-97 and DSTU EN 50160:2014, which are in effect in Ukraine at the same time, according to which the nominal voltage values are 220 or 230 V, respectively;

2. The imitation Simulink model of a three-phase low-voltage electrical power grid with a solidly earthed neutral *has been improved* for simulating of faultoperations associated with the appearance of unacceptable voltage deviations in single-phase consumers, in terms of taking into account the influence of cable line parameters (resistance and inductive reactance), the power of neighboring single-phase consumers on the value of the voltage of the consumer in which the study is conducted.

The maximum and minimum possible voltage values for single-phase consumers in a three-phase electrical network are set (at $U_n = 220$ V, at consumers located close to the transformer substation, the maximum voltage can be $U = 380$ V +10%, at $U_n = 230$ V – $U = 400$ V +10%, respectively) in emergency situations, which are associated with the appearance of unacceptable voltage deviations at the typical minimum and maximum power of the consumer's load, which allows you to select the settings of the

thresholds of the activation of single-phase VCRs according to the voltage according to the power of the consumer.

3. *For the first time*, an imitation Simulink model of a single-phase VCR for household consumers with time dependent and time independent protective characteristics of operation was created according to [1], which allows setting parameters of VCR tripping, such as threshold values of maximum and minimum voltages, automatic reclosing time, determine the tripping time of the VCR depending on the voltage.

This model contains blocks of an analog interface to which the voltage of the electrical network is supplied. The signal is digitalized by an analog-to-digital converter block and filtered by a synthesized filter, the equations and coefficients of which in the model are specified in a specialized file of the Matlab editor. At the output of this filter, we receive a signal that enters the blocks, which include logic elements and signal comparison and delay operators, which determine the conditions for the relay to operate and the recloser in case the voltage returns to the limits of permissible values.

4. The voltage measurement algorithm for a single-phase VCR of household consumers has been improved, in which, in contrast to the traditional calculation of the rms value of the voltage, the input voltage signal is discretized and filtered using a synthesized filter, which allows you to get rid of constant and transient components that distort the signal and can lead to false triggering of the VCR. The improved algorithm allows you to immediately determine the amplitude of the processed signal by applying the filter coefficients. A rational voltage step in the data array for approximating the dependent protective characteristic has been determined, which is from 2 to 4 V, while the relative error will be no more than 1%.

The practical significance of the obtained results:

– the circuitry of an improved VCR with reduced electrical energy consumption due to the use of microcontroller with the Cortex M0+ core, which is one of the smallest in terms of crystal area of 32-bit microcontroller cores and has several power saving modes, has been developed. Also implemented are the possibilities of controlling the IPS display of the VCR, such as: automatically turning on the display when setting up and when the VCR is activated for a certain time, which is set by the

user in the menu parameters; it is possible to smoothly adjust and set the brightness of the display to adapt to the ambient lighting;

– a mock-up design of an improved single-phase digital VCR with a color IPS display was implemented, as well as a non-polarized bistable power relay with two windings, which made it possible to implement a branched and easy-to-read menu of the VCR, unlike existing relays with a seven-segment indicator, and also by using a two-winding of the power relay to simplify its control scheme and eliminate the consumption of electrical energy by the coil;

– experimental studies of the VCR mock-up sample were carried out. The deviation of the value of the voltage measured by the mock-up sample of the improved RKN was established, which is (0.21...0.69)%, using a reference voltmeter with an accuracy class of 0.5. The specified deviation is smaller than the deviation of voltage measurements of typical VCR of well-known manufacturers – (1...2)%. It was established that the activation time of the mock-up sample of the VCR corresponds to the calculated values with an error of (2.33...3.14)%, which is acceptable. The reliability of the calculated protective operation characteristics was checked.

The research results which are presented in the thesis, have been completed in accordance with the plan of research works of the Department of Electrical Apparatus of NTU "KhPI" as part of the initiative research work on the topic: "Improvement of hardware protection of for the household and similar purpose electrical devices" (DR №0123U103223), where the applicant was the responsible executor.

The results of the dissertation thesis were implemented at the company "AVM AMPER" LLC. The developed simulation mathematical models of the electrical power grid and single-phase voltage control relay are used in scientific research of the company in the development of relay protection, algorithms and circuit design solutions are used in the development of new designs of relay protection devices.

The materials of the dissertation thesis are used in the educational process at the Department of Electrical Apparatus of NTU "KhPI" as the "Electrical Apparatus" lecture course and providing of diploma projects, and students research works of the program subject area "141 – Electrical Energetics, Electrical Engineering and

Electromechanics", the educational program "Electromechanics " (specializations 141.07 "Electrical apparatus" and 141.08 "Electric household appliances").

Key words: single-phase voltage control relay, electrical household appliances, consumer protection against voltage deviations, overvoltage, undervoltage, power quality standards, temporary overvoltage, bistable electromagnetic relay, load.

List of the applicant's publications

1. Zorin Y. Classification of single-phase voltage control relays for household consumers taking into account the tendencies of their evolution / Zorin Y., Chepeliuk O., Hryshchuk Y. // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* Kharkiv, 2020. № 1(3). P. 15-21.
2. Zorin Y. Laboratory stand for investigation of single-phase voltage control relays for protection of domestic consumers / Chepeliuk O., Shneiderovych Y., Zorin Y. // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* Kharkiv, 2020. № 2(4). P. 21-26.
3. Zorin Y. Analysis of bistable electromagnetic relays design features / Zorin Y., Chepeliuk O., Hryshchuk Y. Leshchenko V. // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* Kharkiv, 2021. № 1(5). P. 13-20.
4. Zorin Y. An analysis of circuit design solutions of single-phase voltage control relays for household consumers / Zorin Y. // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* Kharkiv, 2022. № 1(7). P. 13-20.
5. Zorin Y. Improvement of microprocessor voltage control relay operation algorithms for single-phase household consumers / Zorin Y., Chepeliuk O. // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* Kharkiv, 2023. № 1(9). P. 11-20.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ЗАХИСТУ ОДНОФАЗНИХ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ ВІД НЕДОПУСТИМИХ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ.....	17
1.1 Аварійні ситуації в електричних мережах однофазних побутових споживачів, пов’язаних з недопустимими відхиленнями напруги на частоті мережі живлення	20
1.2 Чутливість електропобутової техніки до недопустимого зниження напруги живлення	25
1.3 Сучасні способи захисту однофазних побутових споживачів від недопустимих відхилень напруги на частоті мережі живлення	32
1.3.1 Стабілізатори напруги.....	33
1.3.2 Джерела безперебійного живлення.....	34
1.3.3 Модульні автоматичні вимикачі з розчіплювачами мінімальної і максимальної напруги.....	36
1.3.4 Реле контролю напруги для захисту однофазних побутових споживачів.....	39
1.4 Різновиди існуючої схемотехніки, функціональних особливостей та порогів спрацювання реле контролю напруги для захисту однофазних побутових споживачів.....	40
1.4.1 Конструктивні, схемотехнічні і функціональні особливості аналогових РКН та їх порогів спрацювання.....	40
1.4.2 Конструктивні, схемотехнічні і функціональні особливості цифрових РКН та їх порогів спрацювання.....	42
1.5 Аналіз вимог стандартів з якості електричної енергії стосовно недопустимих відхилень напруги в мережі живлення побутових споживачів.....	46

1.6 Висновки по першому розділу та постановка задачі.....	49
РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПЦІЯ, ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ УДОСКОНАЛЕНОГО РЕЛЕ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ.....	53
2.1 Аналіз вимог стандартів стосовно захисних характеристик реле контролю напруги.....	53
2.2 Концепція та функціональна схема удосконаленого реле контролю напруги.....	57
2.2.1 Блок живлення РКН.....	59
2.2.2 Мікроконтролер.....	61
2.2.3 Датчик вхідної напруги.....	62
2.2.4 Рідкокристалічний дисплей.....	63
2.2.5 Комутаційний елемент.....	64
2.2.6 Пристрої вводу.....	68
2.3 Алгоритми роботи удосконаленого реле контролю напруги.....	68
2.3.1 Вимірювання амплітудного значення напруги.....	69
2.3.2 Алгоритм прийняття рішень за визначеним критерієм.....	77
2.4 Висновки по другому розділу.....	79
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ, СХЕМОТЕХНІКА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО РЕЛЕ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ.....	81
3.1 Моделювання аварійних режимів недопустимих відхилень напруги в електричній мережі живлення однофазних побутових споживачів.....	81
3.1.1 Результати моделювання.....	92
3.2 Імітаційна модель реле контролю напруги та аналіз результатів моделювання.....	100
3.2.1 Аналіз результатів моделювання.....	108
3.3 Схемотехніка удосконаленого реле контролю напруги.....	113
3.3.1 Опис електричної схеми реле.....	114