

*Є.Ю. ЗОРІН, О.О. ЧЕПЕЛЮК*

## УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО РЕЛЕ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ ОДНОФАЗНИХ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

В статті приділено увагу алгоритмам роботи однофазних реле контролю напруги, які використовуються для захисту побутових споживачів електричної енергії від недопустимих відхилень напруги в електромережі. Проведено огляд, аналіз та опис алгоритмів роботи, вимірювання напруги та порогів спрацьовування існуючих реле контролю напруги на базі мікропроцесорів та мікроконтролерів. Проведений огляд та аналіз систематизує інформацію щодо технічних та функціональних особливостей конструкції, алгоритмів роботи, схем та компонентів зазначених реле та демонструє перспективи розвитку алгоритмів роботи та захисних характеристик реле напруги відповідно до існуючих міжнародних стандартів. Авторами детально викладено та проілюстровано захисні характеристики та нормативи якості електроенергії стосовно недопустимих відхилень напруги. Також описано алгоритми вимірювання напруги та цифрової обробки сигналу (фільтрації сигналу) у модифікованому реле напруги. Представлено новий підхід у розробці алгоритмів роботи з урахуванням позитивних сторін існуючих реле контролю напруги та нових синтезованих алгоритмів, включаючи концепцію вимірювання напруги прийняття рішень для нових однофазних реле контролю напруги побутових споживачів. Зроблено узагальнення та висновок щодо удосконаленого алгоритму роботи реле контролю напруги побутових споживачів.

**Ключові слова:** однофазне реле контролю напруги, електропобутова техніка, захист електричних мереж від відхилень напруги, перенапруга, недостатня напруга, коливання напруги в електричній мережі.

*Y.Y. ZORIN, O.O. CHEPELIUK*

## IMPROVEMENT OF MICROPROCESSOR VOLTAGE CONTROL RELAY OPERATION ALGORITHMS FOR SINGLE-PHASE HOUSEHOLD CONSUMERS

This paper pays attention to a single-phase voltage control relays work algorithms that are used for protection of the household consumers of electrical energy from unacceptable voltage deviations within power supply network. An overview, analysis and description of operation algorithms, voltage measurements and thresholds of current voltage control relays, based on microprocessors and microcontrollers have been carried out. The conducted overview and analysis systematizes information on the technical and functional features of the operational design, work algorithms, circuits and components of the mentioned relays and demonstrates the prospects for development of voltage relay operational algorithms and protective characteristics according to existing International standards. The protective characteristics and standards of power quality have been outlined and illustrated by the authors in detail. The voltage measuring and digital signal processing (signal filtering) algorithms in modified voltage relay are described as well. Also represented a novel approach in design of operation algorithms taking into account of positive sides in existing voltage control relays and new sintesed algorithms including concept of voltage measurement and decision making algorithms for a new single-phase voltage control relays for household consumers. A generalization and conclusion are made concerning the improved operation algorithm in the voltage control relay for protection of household consumers.

**Key words:** single-phase voltage control relay, household appliances, protection of electrical networks from voltage deviations, overvoltage, undervoltage, voltage fluctuations within electrical network.

**Вступ.** Станом на сьогодні в Україні значна частина мереж електропостачання житлових будинків, особливо старої (до 2000р.) забудови, є застарілою, включаючи силові знижувальні трансформатори, повітряні лінії, кабельні лінії; а також внутрішньобудинкові лінії (під'їзні, квартирні); захисні, з'єднувальні і комутаційні апарати. Зазначені електричні мережі практично виробили свій розрахунковий технічний ресурс або наближаються до такого стану і давно потребують реконструкції і модернізації, що вимагає значних фінансових вкладень. Також слід врахувати, що розподільні мережі більшості багатоквартирних будинків старого спорудження або їх окремі ділянки працюють в перевантаженому режимі, що не тільки істотно скорочує термін їх служби, а й знижує їх надійність. Це відбувається через те, що за останні 20-25 років істотно зросла споживана потужність побутових споживачів, в зв'язку зі збільшенням у них кількості побутових електроприладів і їх потужності, а встановлена проектна потужність таких мереж залишилася на колишньому рівні.

Окремо слід врахувати, що незадовільний стан електричних мереж в Україні спричинений значними руйнуваннями електричних підстанцій, ліній електропередач та іншої інфраструктури внаслідок бойових дій.

Відновлення такої критичної інфраструктури хоч і відбувається, але з невеликою швидкістю. При тому повторні руйнування не можна виключати.

Результатом вказаних вище факторів для зазначених мереж є збільшення числа аварій, пов'язаних з перевантаженням електромереж, відгорянням фазних і PEN-провідників, а також появи недостатньої напруги або перенапруги як наслідок.

Використання однофазних мікропроцесорних реле контролю напруги побутових споживачів допомагає захистити побутове обладнання від пошкоджень в результаті непередбачених коливань напруги живлення за межі допустимих значень.

В даній статті велику увагу приділено удосконаленню алгоритму роботи реле контролю напруги (РКН) однофазних побутових споживачів із залежними та незалежними від часу захисними характеристиками підвищення/зниження напруги.

**Мета роботи** полягає в аналізі алгоритмів роботи сучасних мікропроцесорних РКН для захисту однофазних побутових споживачів, що пропонуються виробниками на електротехнічному ринку як України так і інших країн; аналізі вимог сучасних стандартів, які регламентують те, якими повинні бути захисні характеристики РКН для захисту від перенапруги або недостатньої напруги; удосконаленні алгоритмів роботи РКН.

**Аналіз порогів спрацьовування реле контролю напруги однофазних побутових споживачів.** РКН для захисту побутових споживачів можуть мати фіксовані налаштування параметрів спрацьовування, виконані на заводі виробника, виходячи із міркувань допустимих перенапруг та недостатніх напруг, а також часу затримки на відключення споживача від мережі живлення при виникненні аварійного режиму. При цьому деякі виробники, як наприклад OSI [1] керуються логікою роботи своїх реле, яка може бути описана у паспорті реле і представлена у вигляді діаграм чи осцилограм (рис. 1). А деякі виробники не надають даних про логіку роботи реле.

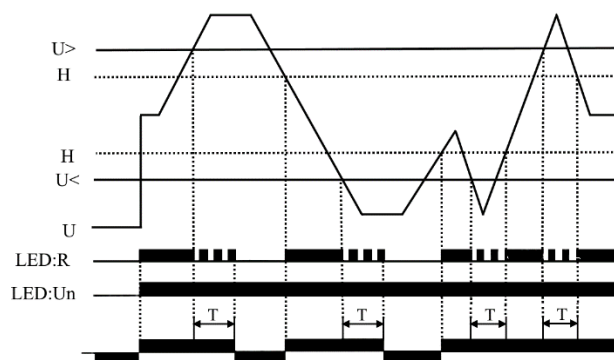
Мікропроцесорні реле, згідно аналізу проведеному у попередніх публікаціях [2, 3], теоретично можуть мати фіксовані параметри спрацьовування, причому під фіксованими параметрами в рамках даної статті варто розуміти саме відсутність можливості налаштування значення напруги і відповідного їй часу спрацьовування та відліку часу до автоматичного повторного включення (АПВ), а не захисну характеристику спрацьовування. Натомість на практиці мікропроцесорні РКН з фіксованими параметрами не зустрічаються.

Сучасні мікропроцесорні РКН мають можливість встановлення порогів спрацьовування як по максимальній, так і по мінімальній напрузі.

Найбільш поширена послідовність роботи реле з регульованими параметрами спрацьовування в аварійній ситуації може бути описана наступним чином: після подачі напруги живлення пристрій витримує час готовності 5-6 с, при цьому індикація не працює, потім світловий індикатор (найчастіше зеленого кольору) починає блимати вказуючи на відлік витримки часу АПВ або якщо РКН має семисегментний індикатор, то відлік витримки часу АПВ можна побачити на ньому. Якщо напруга знаходиться в допустимих межах, навантаження підключається до мережі напруги живлення і загоряється світловий зелений індикатор. Можливо прискорене включення навантаження вручну шляхом натискання кнопки «вкл» на лицевій панелі. Після аварійного відключення, включення реле відбувається автоматично при відновленні напруги до нормального рівня, в залежності від встановленої користувачем витримки часу АПВ або без витримки (якщо в параметрах встановлено 0 с).

У робочому режимі пристрій контролює напругу мережі живлення. Також деякі зразки РКН можуть мати регулювання часу затримки на відключення навантаження в аварійних режимах. Робота таких реле може бути описана наступним чином: при подачі живлення, якщо встановлена затримка спрацьовування і напруга мережі знаходиться в діапазоні між встановленими верхнім і нижнім порогоми, вбудоване силове електромагнітне реле включиться після закінчення відліку часу затримки  $T$  (рис. 1). При цьому контакт (контакти) реле замикаються і включається індикатор, що вказує на наявність напруги на виході РКН. Якщо напруга мережі відхилилася від встановлених значень, виконавче реле вимикається після закінчення відліку часу затримки спрацьовування. Коли контрольована напруга повертається в норму, реле вмикається після

закінчення затримки спрацьовування [2, 3]. У реле із наявністю регулювань параметрів напруги спрацьовування, а також часу затримки на відключення та АПВ, регулювання здійснюється дискретно із заданим кроком (величина кроку може різнитись в залежності від виробника). На рис. 2 представлені реле виробників Аско УКРЕМ та Novatek Electro [4, 5]. На рис. 2,а показане реле із регульованими порогоми спрацьовування по напрузі і фіксованим часом АПВ. Пристрій має трирозрядний семисегментний індикатор. На рис. 2,б показане реле із регульованими порогоми спрацьовування по напрузі, а також регульованим часом АПВ. Пристрій має світлодіодну індикацію стану та трирозрядний семисегментний індикатор, що відображає поточне значення напруги у мережі живлення. Затримка АПВ реле напруги після нормалізації напруги в мережі необхідна для виключення частих повторних включень навантажень при короточасних неприпустимих стрибках/спадах напруги в мережі живлення, які призводять до відключення реле, що тягне за собою скорочення ресурсу роботи таких навантажень і може призвести до виходу їх з ладу (холодильники та ін.). Діапазон регулювання тимчасової затримки повторного включення в реле напруги різних виробників може відрізнятися. На основі паспортних даних реле можна сказати, що діапазон регулювання часу АПВ може починатись від 0,1-0,3 с і закінчуватись значенням 999 с.



$U$  – поточна напруга мережі;  $U>$  – поріг спрацьовування по максимальній напрузі;  $U<$  – поріг спрацьовування по мінімальній напрузі;  $H$  – гістерезис;  $LED:Un$  – робота світлодіода (зеленого кольору) в нормальному режимі;  $LED:R$  – робота світлодіода (червоного кольору) в аварійній ситуації;  $T$  – час затримки відключення РКН  
Рис. 1. Діаграми роботи реле з регульованими параметрами [1]

Сучасні РКН з регульованими порогоми у якості керуючого елементу можуть мати різні за розрядністю та робочою частотою мікроконтролери, наприклад PIC12F для VR40 (рис. 2,а), а там де необхідні додаткові функції такі як індикація, вольтметр тощо, можуть застосовуватись STM8S00 для FIF CP-721 [7], або STM32F030 для Zubr D2-63 [6].

Діапазон регулювання мінімального порогу спрацьовування в таких реле може знаходитись в межах 85-215 В, максимального – 210-310 В.



а – з фіксованим часом АПВ – серія VR40 [5] (Аско УКРЕМ, Україна); б – з регульованим часом АПВ – PH-32t [4] (Novatek Electro, Україна)

Рис. 2. Зовнішній вигляд стаціонарних однофазних РКН з трирозрядними семисегментними індикаторами та регульованими порогами спрацьовування

**Аналіз функціональних особливостей та алгоритмів роботи мікропроцесорних реле контролю напруги.** Конструктивно мікропроцесорні РКН виготовляються стаціонарними (виконуються в модульних корпусах з механічно міцної і термостійкої не підтримуючої горіння пластмаси та встановлюються на DIN-рейку у розподільних щитках) і мобільними (у вигляді мережевого розеткового адаптеру, у розетку чи вмонтованими у мережеві подовжувачі).

Мікроконтролер у складі РКН аналізує напругу в електричній мережі і здійснює аварійні відключення навантаження вбудованим електромагнітним реле [3]. У таких РКН, на відміну від аналогових, час спрацьовування залежить від рівня неприпустимого відхилення напруги. Алгоритм роботи в цифрових реле закладається виробником програмно. Мінімальний час спрацьовування в таких РКН складає 0,02-0,04 с. Також перевагою застосування мікроконтролера в електричних схемах РКН є можливість розширення їх функціоналу, наприклад, додавання функції контролю струму; контролю активної, реактивної і повної потужності; контролю споживання електричної енергії (лічильник електроенергії); статистики аварійних подій; віддаленого керування.

Недоліком моностабільного електромагнітного реле у конструкції РКН є те, що струм, що тривало протікає через керуючу котушку у ввімкненому стані РКН нагріває котушку, корпус реле і електронні компоненти, які знаходяться навколо, що скорочує термін служби РКН у цілому та збільшує споживану ним потужність у ввімкненому стані реле. Тому, у якості силового комутаційного елементу цифрових РКН найбільш часто використовуються бістабільні електромагнітні реле.

Перевагою бістабільних реле є імпульсний характер роботи керуючого кола: їх можна вмикати і вимикати короткочасними імпульсами керуючої напруги або струму, що подається на керуючу котушку.

У проміжку між подачею імпульсів управління струм через котушку не тече, нагріву немає, тому бістабільне реле може надійно працювати при більш ви-

сокій температурі навколишнього середовища, ніж моностабільне реле [3].

Згідно із паспортом реле FIF моделі CP-721-1 [7], його діапазон робочих температур від  $-25 \dots + 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , відносна вологість повітря до 80% при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Напруга живлення від 50 до 450 В; максимальний струм 30 А (АС-1) та 15 А (АС-15); нижній поріг налаштування по напрузі 140 – 210 В, верхній поріг – 240 – 300 В; нижній поріг часової затримки відключення 0,1 – 5 с, верхній поріг – 0,5 – 25 с; час АПВ – 2 – 599 с.

Алгоритм роботи: контакт реле замкнутий і навантаження включене, якщо контрольована напруга знаходиться в установленому діапазоні. Діапазон (верхнє і нижнє значення) встановлюється за допомогою кнопок на лицьовій панелі. Повторне включення реле (після відключення) відбувається автоматично, через встановлений час, після відновлення напруги.

Дане реле кріпиться на DIN рейку. Гвинтові термінали реле дозволяють підключити кабелі з максимальним поперечним перетином  $2,5 \text{ мм}^2$ . Реле має три розрядний семисегментний індикатор для виводу значення поточної напруги, відліку часу АПВ, додаткової інформації; а також світлодіод, що вказує на поточний стан контактів і блимає із частотою 1 Гц при відліку часу АПВ.

Також деякі функціональні можливості пропонує виробник РКН DS Electronics (Україна) [6], що не часто зустрічаються в мікропроцесорних РКН інших виробників. В своїй документації виробник вказує, що при вимірюванні напруги застосовує алгоритм вимірювання напруги True RMS (root-mean-square), тобто вимірювання істинного середньоквадратичного значення напруги електричної мережі. Такий алгоритм знижує вплив мережевих перешкод на точність вимірювання напруги, коли форма напруги відрізняється від чистої синусоїдальної.

Програмне забезпечення розраховує середньоквадратичне значення напруги, що визначається як квадратний корінь із середнього значення квадратів миттєвих значень величини  $u(n)$ , що періодично змінюється, усередненого за один повний цикл. Рівняння дискретного часу для обчислення середньоквадратичного значення напруги виглядає наступним чином:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} u^2(n)}{N}} \quad (1)$$

Формула (1) може бути проілюстрована, як показано на рис. 3.

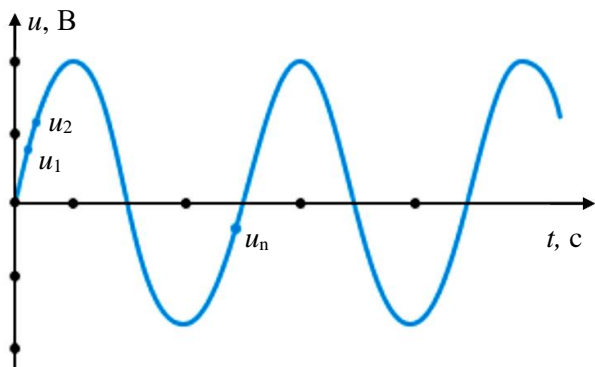


Рис. 3. Змінна напруга синусоїдальної форми [6]

Окрім описаних вище алгоритмів DS Electronics пропонує «професійну модель вимкнення навантаження» [6], яка полягає в затримці часу вимкнення РКН в аварійній ситуації задля запобігання частого вимкнення навантаження, що захищається за допомогою РКН. Таким чином, застосування професійної моделі дозволяє не відключати обладнання за безпечних за величиною та тривалістю відхилень напруги.

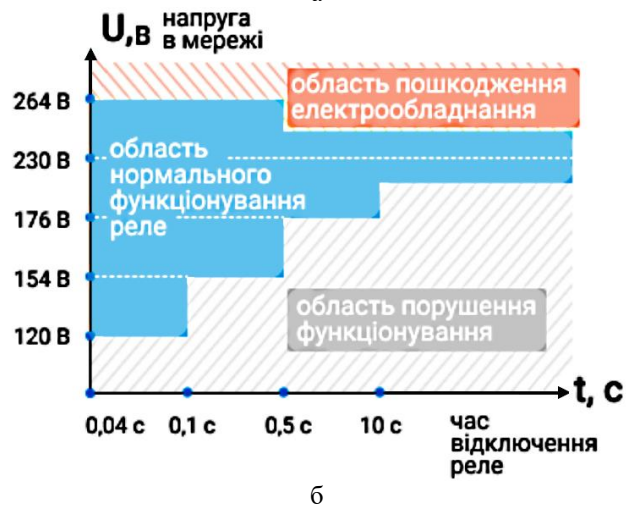
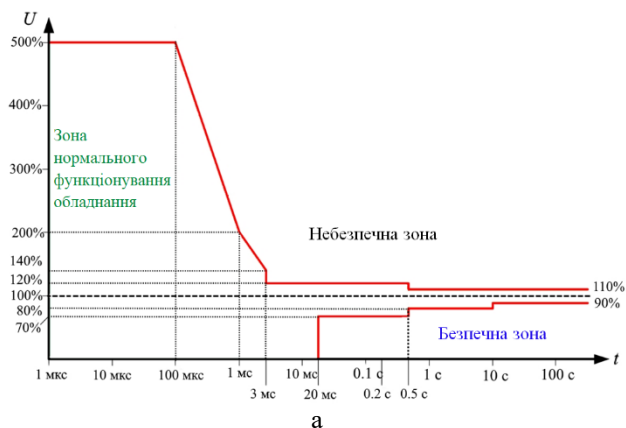
В основі створення режиму «професійної моделі вимкнення навантаження» лежить крива "ITIC (СВЕМА) Curve», що представлена на рис. 4,б.

**Вимоги сучасних стандартів стосовно захисних характеристик спрацювання реле контролю напруги.** Згадана вище крива СВЕМА (Computer and Business Equipment Manufacturers Association), а пізніше відкоригована крива ITIC (Information Technology Industry Council) (рис. 4,а), включена до стандарту IEEE 446 ANSI [8] може бути використана для визначення порогів спрацювання РКН. Ця крива спочатку з'явилась для того, щоб визначити чутливість комп'ютерного обладнання до відхилень напруги живлення від номінальної величини, залежно від тривалості цих відхилень [9].

Крива ITIC – це графік залежності вхідної напруги від тривалості, який охоплює спади, наростання, перехідні процеси, переривання та коливання напруги в стаціонарному стані на вхідних клеммах комп'ютерного обладнання.

Відсотки збережених рівнів напруги, представлені на кривій можна безпосередньо перенести на базу 230 В, якщо керуватись стандартом ДСТУ EN 50160:2014 [10], де в якості рівня номінальної напруги однофазних побутових чи аналогічних споживачів встановлено значення 230 В 50 Гц.

Обмеження кривої щодо застосовуваного обладнання та напруги/частоти мережі робить криву релевантною і для застосування її до обладнання відмінного від комп'ютерного.



а – стандартний вигляд; б – діаграма часу відключення РКН при виході напруги за межі [6]  
Рис. 4. Крива ITIC (СВЕМА)

На даний час існує стандарт IEC 60255-127:2010 [11], що регламентує захисні характеристики РКН у графічному вигляді та у вигляді математичних виразів, під назвою «Measuring relays and protection equipment – Part 127: Functional requirements for over/under voltage protection» («Вимірювальні реле та захисне обладнання – Частина 127: Функціональні вимоги до захисту від пере-/недостатньої напруги»). Даний стандарт визначає такі основні типи захисних характеристик:

- незалежна характеристика часу (тобто визначена часом витримки);
- залежна характеристика часу (тобто зворотно пропорційна часу витримки).

Часова характеристика визначається часом спрацювання як тривалість від моменту стану, коли вхідна енергія перевищує значення уставки  $G_s$  і до моменту, коли реле спрацює.

Незалежна характеристика часу визначається терміном, що визначає уставку характеристичної величини ( $G_s$ ) і терміном, що визначає час спрацювання  $t_{op}$ . Коли застосовується не назначена витримка часу, це реле часу з незалежною витримкою позначають як реле миттєвого спрацювання.

Для реле перенапруги  $t(G) = t_{op}$ , коли  $G > G_s$ . Ця незалежна характеристика представлена на рис. 5а.

Для реле недостатньої напруги  $t(G) = t_{op}$ , коли  $G < G_s$ . Ця незалежна характеристика представлена на

рис. 5,б.

Для реле захисту від перенапруги із залежною характеристикою спрацьовування залежність часу виражається у вигляді формули:

$$t(G) = \frac{T}{\left(\frac{G}{G_S}\right) - 1}, \tag{2}$$

де  $t(G)$  – теоретичний час спрацьовування, с, при сталому значенні  $G$ ;  $T$  – уставка часу (теоретичний час спрацьовування при  $G = 2 \cdot G_S$ );  $G$  – виміряне значення характеристичної величини;  $G_S$  – значення уставки.

Графічна характеристика залежності часу приведена на рис. 6,а.

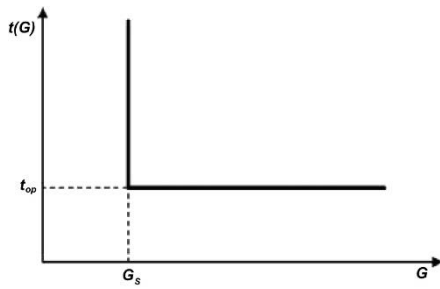
Ефективна зона залежності часу від характеристичної величини розташована між значеннями  $1,2G_S$  і  $G_0$ . Значення  $G_0$  для верхнього значення діапазону уставки повинно бути встановлено виробником.

Для захисту від недостатньої напруги залежність характеристики часу реле описується наступною формулою:

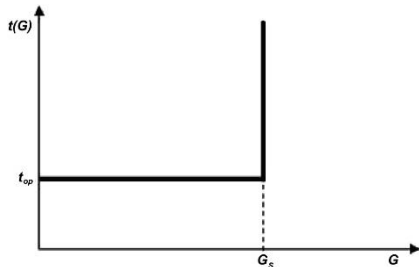
$$t(G) = \frac{T}{1 - \left(\frac{G}{G_S}\right)}, \tag{3}$$

де  $t(G)$  – теоретичний час спрацьовування, с, при сталому значенні  $G$ ;  $T$  – уставка часу (теоретичний час спрацьовування при  $G = 0$ );  $G$  – виміряне значення характеристичної величини;  $G_S$  – значення уставки.

Дана характеристика часу приведена на рис. 6,б.

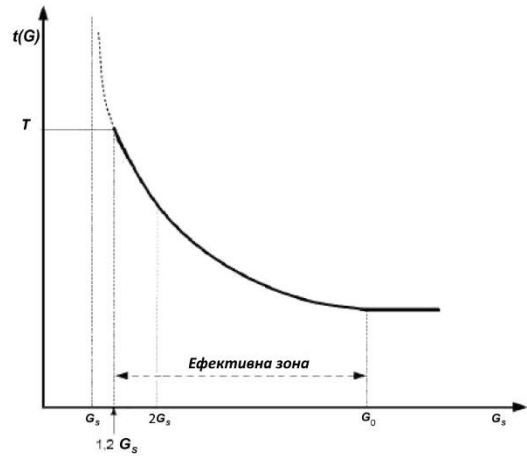


а

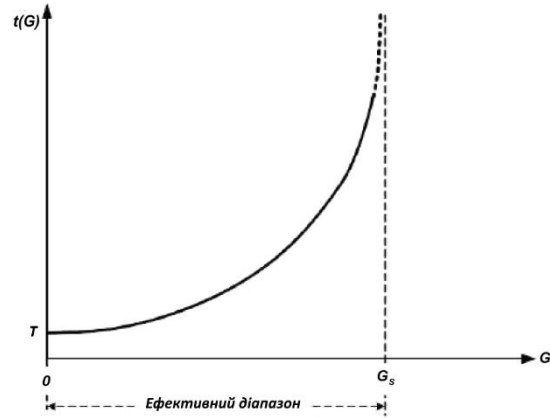


б

а – перенапруги, б – недостатньої напруги  
Рис. 5. Незалежна характеристика часу реле



а



б

а – перенапруги, б – недостатньої напруги

Рис. 6. Залежна характеристика часу спрацьовування реле

Умови пошкодження силової системи живлення визначають залежність часу спрацьовування реле від напруги. Для умов координації між реле із залежною характеристикою і даними умовами, поведінка реле повинна забезпечувати залежність, приведену у формулі (4).

Для  $G > G_0$  (захист від перенапруги) або  $G < G_0$  (захист від недостатньої напруги):

$$\int_0^{T_0} \frac{1}{t(G)} dt = 1. \tag{4}$$

де  $T_0$  – час спрацьовування, що змінюється величиною  $G$ ;  $t(G)$  – теоретичний час спрацьовування, с, при сталому значенні  $G$ ;  $G$  – виміряне значення характеристичної величини.

Час спрацьовування визначається як час, що змінюється коли інтеграл в формулі (4) дорівнює чи більше 1.

В ході аналізу було виявлено, що на даний момент в Україні є чинними два стандарти, що встановлюють вимоги щодо допустимих значень напруги у мережі кінцевого споживача, а саме: ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» [10] та ГОСТ 13109-97 «Норми якості електричної енергії у системах електропостачання загального призначення» [12].

Слід враховувати, що більш жорсткі норми щодо допустимих відхилень напруги в мережі живлення кінцевого споживача встановлює ГОСТ 13109-97 (нор-

мально допустимі значення  $\pm 5\%$  від величини номінальної напруги  $U_n$  та гранично допустимі значення  $\pm 10\%$  від  $U_n$ , а за ДСТУ EN 50160:2014 відхилення напруги  $+10\%$  від  $U_n$  та  $-15\%$  від  $U_n$ ).

Також варто зазначити, що рішення про застосування ГОСТ 13109-97 або ДСТУ EN 50160:2014 приймає організація, яка забезпечує поставки електричної енергії.

Для того, щоб прийняти все ж таки значення часових затримок на відключення навантаження за допомогою РКН, а також врахувати залежні чи незалежні характеристики часу реле при перенапрузі чи недостатній напрузі було прийнято рішення звести значення уставок спрацьовування та часових затримок у табл. 1.

Таблиця 1. Параметри тимчасового перенапруження/недостатньої напруги в мережі і відповідні часові затримки (с) РКН

Коефіцієнт $K_U$ , в.о.	ІПС (СВЕМА)	ГОСТ 13109-97	ДСТУ EN50160:2014
Перенапруга			
1,15	0,5	60	0,15
1,31	0,003	20	0,059
1,47	0,002	1	0,037
Недостатня напруга			
0,85	10	-	0,081
0,69	0,5	-	0,045
0,53	0,02	-	0,031

В табл. 1 за основу взято значення напруги  $U_n = 220$  В, що є базовим у стандарті ГОСТ 13109-97.  $K_U$  – коефіцієнт перенапруги або недостатньої напруги у відносних одиницях (в.о.). При цьому, напруга для визначення уставки спрацьовування по кривій чутливості СВЕМА вказана у відсотках і може бути взято за базу  $U_n = 220$  В як у ГОСТі. Натомість для ДСТУ EN 50160:2014  $U_n = 230$  В і всі уставки розраховані по формулах (2) для перенапруги, (3) – для недостатньої напруги. Уставки для ГОСТ 13109-97 взяті із таблиці тривалості тимчасової перенапруги Д.3 [12]. Тривалість тимчасової недостатньої напруги для мереж низької напруги у ГОСТ 13109-97 не вказана.

**Удосконалений алгоритм роботи реле контролю напруги із залежною та незалежною захисними характеристиками спрацьовування.** У минулому з'явилася велика кількість цифрових алгоритмів вимірювання значень критеріїв [13]. На самому початку застосовували усереднення сигналів і деякі інші методи походження аналогової техніки. Однак дуже скоро цифрова техніка з її перевагами, особливо цифровою фільтрацією FIR (англ. finite impulse response) та ортогональними компонентами сигналу, стала фундаментальним і винятковим рішенням.

Критеріальними значеннями цифрового РКН є величина напруги і її частота.

Перш ніж можна буде виконати фактичне вимірювання величини напруги для РКН, вхідний сигнал повинен бути попередньо оброблений, що називається цифровим формуванням сигналу (див. рис. 7).

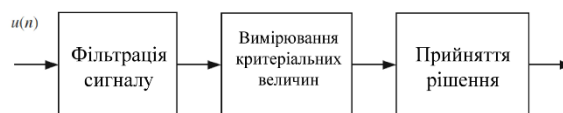


Рис. 7. Цифрове формування сигналу

Якщо вхідним сигналом є напруга у перехідному стані, вона може бути представлена у вигляді:

$$u(\tau) = U_1 \cos(\omega_1 \tau - \alpha_1) + U_0 \exp\left(-\frac{\tau}{T_a}\right) + \sum_{k=2}^p U_k \cos(k\omega_1 \tau - \alpha_k) + \sum_{h=1}^r U_h \left[ \exp\left(-\frac{\tau}{T_h}\right) \right] \cos(\omega_h \tau - \beta_h). \quad (5)$$

Можна помітити, що сигнал складається з наступних компонентів:

- $U_1$  – основна частотна складова (величина вектора),
- $U_0$  – затухаючий компонент постійної напруги,
- $U_k$  – високочастотний компонент,
- $U_h$  – перехідний коливальний затухаючий компонент,
- $\tau$  – постійна часу,
- $k$  – число вимірювань,
- $T_a$  – постійна часу спадаючої складової постійного струму,
- $T_h$  – стала перехідного коливального затухаючого процесу,
- $\alpha, \beta$  – фазові зсуви фільтра парної симетрії,
- $\omega$  – кутова частота.

Корисна інформація міститься в основній частотній складовій, а іноді і в обраних більш високочастотних складових (2-й, 3-й або 5-й). Тому всі інші компоненти відкидаються. Особливо небезпечними є дуже високочастотні компоненти ( $U_k$  та  $U_h$ ), які мають частоти, близькі до частоти дискретизації, оскільки вони можуть спричинити необоротне спотворення цифрового сигналу.

Вибір частоти дискретизації  $f_s$  є компромісним. Частота не повинна бути занадто низькою, щоб уможливити відтворення компонента, який є життєво важливим для рішень про ретрансляцію.

З іншого боку, вона не повинна бути занадто високою, щоб не створювати непотрібний тягар для цифрової обробки.

В основному, мінімальна частота дискретизації є результатом теореми Шеннона-Котельникова, яка визначає умови можливості відновлення сигналу після дискретизації.

Відповідно до цього, має бути принаймні дві вибірки сигналу, взяті протягом періоду компоненти сигналу, який повинен бути представлений у цифровій формі без втрати інформації про частоту.

Якщо компонент, який потрібно правильно відтворити, має частоту  $f_{k1}$ , то частота дискретизації повинна бути:

$$f_s \geq 2f_{k1}. \quad (6)$$

У реальних установках частота дискретизації рідко буває нижчою за 800 Гц (16 вибірок на один період основної частотної складової, 4 вибірки на один період 4-ї гармоніки тощо).

Перед дискретизацією сигнал проходить через

згладжувальні фільтри низьких частот, які використовуються для пропускання всіх компонентів з частотами, нижчими за  $f_{k1}$ , і для усунення частот, вищих за цю. Частота зрізу фільтра  $f_C$  повинна відповідати наступним вимогам:

$$f_{k1} < f_C \leq \frac{f_S - f_k}{3}. \quad (7)$$

Це змусило б усі компоненти з частотами нижчими за  $f_{k1}$  проходити з мінімальними спотвореннями, тоді як компоненти з частотами вищими за цю були б придушені.

Аналогові вхідні фільтри в більшості випадків реалізуються у вигляді каскадних RC-схем.

Необхідний нахил перехідної частини спектру фільтра отримується шляхом вибору відповідного порядку фільтра, що означає, що відповідна кількість чотирьохполюсників RC першого порядку з'єднана послідовно.

І тоді алгоритм вимірювання амплітудного значення величини задається у вигляді:

$$X_{1m}(n) = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_1^2(n-k)}. \quad (8)$$

Можна легко зрозуміти, що всі ці алгоритми можуть бути застосовані, коли використовуються ортогональні компоненти обертових векторів, як приклад у випадку цифрових FIR-фільтрів (FIR скор. від англ. finite impulse response – скінченна імпульсна характеристика). У таких випадках також можна отримати сигнали із затримкою. Навпаки, для постійного вектора, як і в кореляційному методі, можна застосовувати лише рівняння (9):

$$X_{1m} = \sqrt{x_{1C}^2(n) + x_{1S}^2(n)}. \quad (9)$$

Розглядаючи перший випадок, вихідні сигнали пари ортогональних FIR-фільтрів можна записати у вигляді:

$$y_{1C}(n) = F_{1C} X_{1m} \cos(n\Omega_1 + \varphi_1 + \beta), \quad (10a)$$

$$y_{1S}(n) = F_{1S} X_{1m} \cos(n\Omega_1 + \varphi_1 + \beta), \quad (10b)$$

де вихідним сигналом цифрового FIR-фільтра для вхідного сигналу:

$$y_1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} a(k)x_1(n-k) \quad (11)$$

$$\Omega_1 = \omega_1 T_S. \quad (12)$$

$$\omega_1 = 2\pi f_S \quad (13)$$

$F$  – підсилення фільтрів непарної ( $S$ ) та парної ( $C$ ) симетрії імпульсної характеристики для основних частотних складових;  $\Omega_1$  – відносна основна кутова частота;  $T_S$  – час між двома послідовними пробами (період вибірки);  $\omega_1$  – кутова частота основної складової, де  $f_S = 50$  Гц).

Ортогональні компоненти можна отримати простим діленням виходів фільтра на підсилення фільтра:

$$x_{1C}(n) = \frac{y_{1C}(n)}{F_{1C}}, \quad (14a)$$

$$x_{1S}(n) = \frac{y_{1S}(n)}{F_{1S}} \quad (14b)$$

Застосовуючи їх у (9), отримуємо:

$$X_{1m} = \sqrt{\frac{y_{1C}^2(n)}{F_{1C}^2} + \frac{y_{1S}^2(n)}{F_{1S}^2}}. \quad (15)$$

Це фундаментальне рівняння вимірювання амплітудної величини за допомогою пари ортогональних фільтрів. На практиці в більшості випадків підсилення ортогонального фільтра однакові, і тоді рівняння (15) спрощується до:

$$X_{1m} = \frac{1}{F_1} \sqrt{y_{1C}^2(n) + y_{1S}^2(n)}. \quad (16)$$

Найпростішим способом визначення амплітуди вектора  $\epsilon$ :

$$f_-(n) = F_1(n) \sin(n\omega_1 T_S - \beta), \quad (17a)$$

$$f_+(n) = F_1(n) \cos(n\omega_1 T_S - \beta), \quad (17b)$$

звідси:

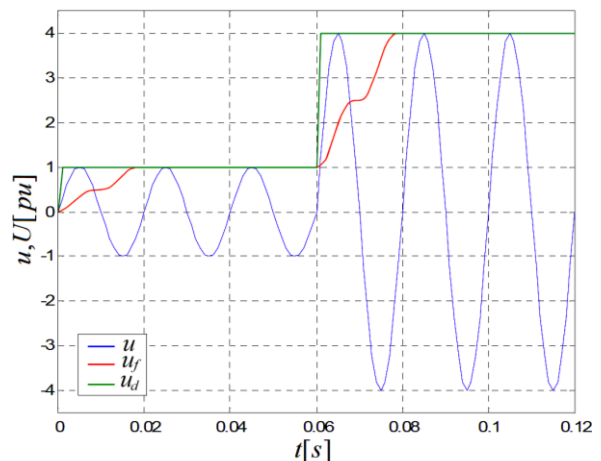
$$F_1(n) = \sqrt{f_-^2(n) + f_+^2(n)}. \quad (18)$$

Аргумент вектора також можна легко обчислити:

$$\begin{aligned} (n\omega_1 T_S - \beta) &= \arctg \frac{f_-(n)}{f_+(n)} = \arcsin \frac{f_-(n)}{F_1(n)} = \\ &= \arccos \frac{f_+(n)}{F_1(n)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Можна також використовувати пару ортогональних FIR-фільтрів, що мають симетричні та асиметричні вікна даних. Можлива ортогоналізація з затримкою часу (одиначна або подвійна) з додатковою фільтрацією шуму або без неї.

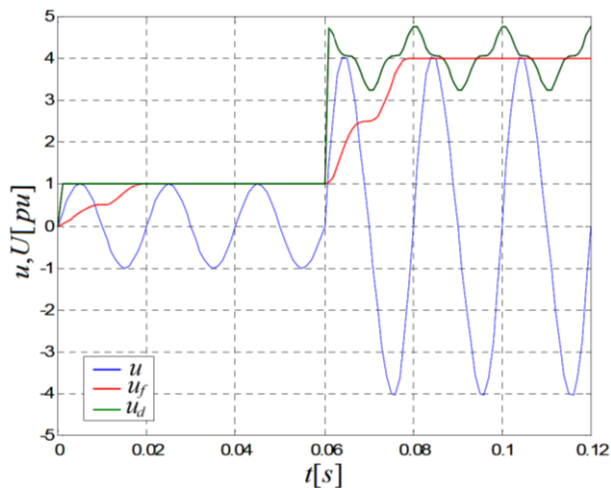
На рис. 7 можна провести порівняння результатів вимірювань, отриманих за допомогою повноциклових фільтрів Фур'є та ортогоналізації з одиничною затримкою. Для чистої синусоїди стаціонарна точність обох підходів однакова, однак динаміка оцінювання відрізняється, з перевагою для методу затримки.



$u$  – крива миттєвого значення напруги;  $u_f$  – крива амплітудного значення напруги, отримана за допомогою фільтра Фур'є;  $u_d$  – крива амплітудного значення напруги, фільтрована методом затримки

Рис. 7. Вимірювання амплітуди сигналу двома методами ортогоналізації для чистого синусового вхідного сигналу

Алгоритм із затримкою часу дуже швидкий, але його поведінка погана, коли вхідний сигнал містить деякий шум. Це показано на рис. 8 для основної складової вхідного сигналу, спотвореної другою гармонікою (10%). Застосування фільтрів Фур'є допомагає позбутися 2-ї гармоніки, що дає ідеальний результат вимірювання амплітудного значення напруги, на відміну від методу затримки, який дає результати зі значними коливаннями.



$u$  – крива миттєвого значення напруги;  $u_f$  – крива амплітудного значення напруги, отримана за допомогою фільтру Фур'є;  $u_d$  – крива амплітудного значення напруги, фільтрована методом затримки

Рис. 8. Вимірювання амплітуди сигналу двома методами ортогоналізації для сигналу з 2-ю гармонікою (після  $t = 0,06$  с)

Найпростішим і в той же час найбільш часто використовуваним підходом до прийняття рішень є детермінований. Детермінований підхід означає, що алгоритм видачі рішення точно визначений, тоді як пороги рішення можуть бути фіксованими або змінюватися відповідно до встановленого сценарію.

Загалом кажучи, при детерміністичному підході рішення щодо стану споживача, який захищається, приймається шляхом порівняння оцінених/вимірних значень критеріїв із відповідно встановленими пороговими значеннями чи характеристиками (залежна характеристика чи незалежна, див. рис. 5-6). Для одновимірної задачі прийняття рішення (враховується єдиний критерій) розрізнення здійснюється, коли сигнал критерію перетинає або перевищує попередньо визначене граничне значення (порог), що розділяє два класи подій, які необхідно розрізнити, наприклад, нормальна робота проти умов несправності. Залежно від проблеми дискримінація може бути одного з двох типів:

- перевищення, коли значення критерію вище порогового значення для захисту від перенапруги див. рис. 8 або
- недосягнення, коли значення критерію нижче за порогове значення, для захисту від зниженої напруги.

З посиланням на рис. 9 рішення про відключення захищеного елемента приймається, коли виміряна напруга (миттєве значення або величина сигналу) перевищує значення спрацьовування:

$$U(n) > U_{ref} \quad (20)$$

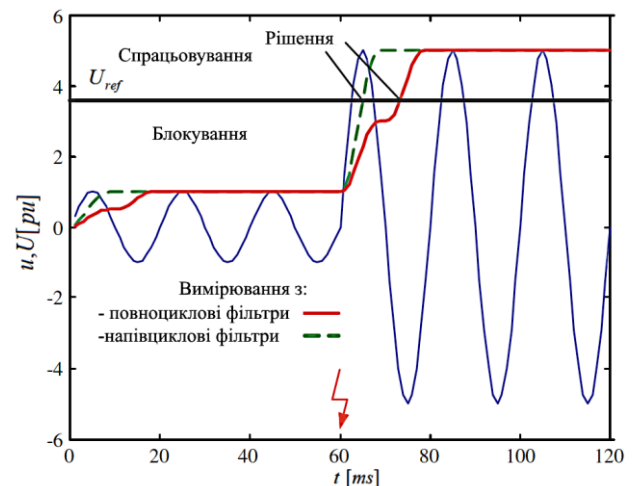


Рис. 9. Швидкість прийняття рішення на відключення

Адаптацію в блоці захисту електромережі можна розуміти як процес автоматичного пристосування до мінливих умов електромережі, таким чином, що деякі функціональні алгоритми та внутрішня логіка трансформуються, щоб досягти можливо найвищого рівня захисту у всіх передбачуваних випадках ненормальної роботи [13]. Обов'язковою умовою здійснення ефективною адаптації є надходження на РКН сигналів, які ініціювали спрацьовування у відповідний момент часу (рис. 9). Добре розроблена адаптація завжди повинна призводити до покращення чутливості та селективності, завдяки відхиленню від консервативних припущень, які приписують реле працювати з постійними (і не завжди оптимальними) налаштуваннями для всіх можливих збурень електричної мережі.

З функціональної точки зору адаптація може бути пов'язана з деякими змінами в одному або декількох з наступних блоків захисту (рис. 10):

- аналогова фільтрація (перехід на інший набір фільтрів),
- аналого-цифрове перетворення (зміна частоти дискретизації),
- цифрова обробка сигналу (вибір алгоритму обробки, модифікація частотних характеристик фільтрів),
- вимірювання напруги (зміна параметрів та/або типу алгоритму).

Стійкість алгоритму вимірювання до забруднення сигналу, особливо до загасаючої компоненти постійного струму, також важлива. Можливе перехідне переоцінювання величини напруги (перерегулювання) може призвести до помилкових рішень, якщо не буде застосовано відповідну затримку часу. Проте затримку часу спрацьовування можна реалізувати обравши відповідну залежну чи незалежну характеристики як для перенапруги, так і для недостатньої напруги.

На рис. 10 представлений алгоритм прийняття рішення на відключення із врахуванням захисних характеристик.



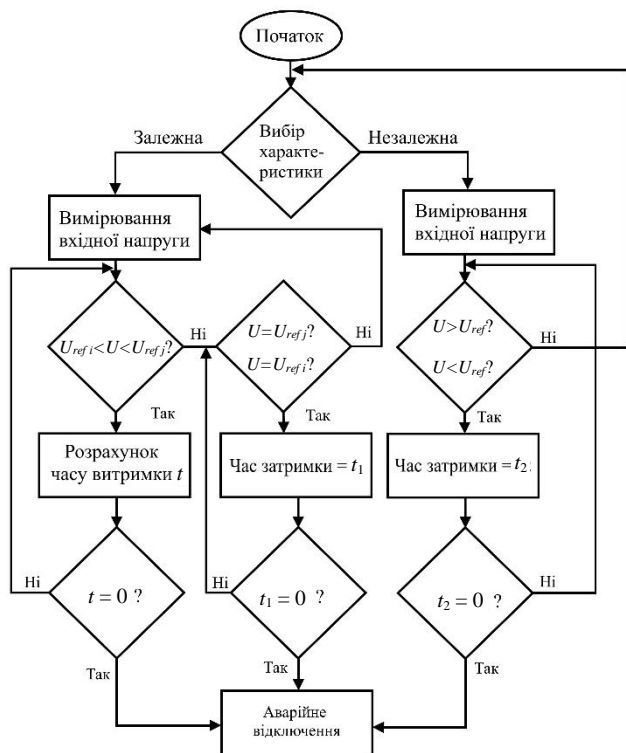


Рис. 10. Удосконалений алгоритм роботи мікропроцесорного РКН однофазних побутових споживачів

Згідно алгоритму, при включенні РКН відбувається ініціалізація, відлік часу АПВ, згідно встановленого значення користувачем. Вибір захисної характеристики теж здійснюється користувачем. При виборі незалежної характеристики встановлюється поріг спрацьовування як по перенапрузі, так і у випадку недостатньої напруги, затримка часу на відключення обирається із масиву даних, що відповідає тому чи іншому порогу спрацьовування.

У випадку із залежною характеристикою встановлення порогів спрацьовування по мінімальній і максимальній напрузі відбувається аналогічно описаній вище послідовності.

Далі сигнал з датчика напруги поступає на аналоговий вхід мікроконтролера, що керує РКН, фільтрується із застосуванням алгоритмів фільтрації описаних вище, отримується амплітудне значення напруги, яке за необхідності може бути перераховане у середньоквадратичне. Потім отримане значення напруги  $U$  порівнюється з уставками.

Якщо обрали роботу із залежними захисними характеристиками (рис. 6), то використовуються уставки  $U_{ref i}$  і  $U_{ref j}$  – дві сусідні точки в масиві даних характеристики, при цьому виконується нерівність:

$$U_{ref i} < U < U_{ref j}. \quad (21)$$

Для захисту від перенапруги або недостатньої напруги використовується свій масив даних залежності. Коли виконується нерівність (21), тоді час затримки розраховується  $t = (t_j + t_i)/2$ , де  $t_i$  та  $t_j$  відповідні часові затримки до  $U_{ref i}$  та  $U_{ref j}$ .

Якщо обрали незалежні характеристики (рис. 5), то виконуються нерівності:

$$U < U_{ref} \quad (22a)$$

для недостатньої напруги і

$$U > U_{ref} \quad (22b)$$

для перенапруги.

При цьому час затримки на відключення обирається мікроконтролером із масиву даних характеристики у відповідності до встановленого користувачем порогу спрацьовування.

### Висновки.

1. Проведений аналіз особливостей існуючих мікропроцесорних РКН однофазних споживачів електричної енергії та проаналізовані пороги їх спрацьовування на прикладі деяких зразків. Наведені приклади захисних характеристик РКН деяких виробників, які їх вказують у відкритих джерелах.

2. На основі відкритих даних і даних виробників РКН у технічній документації, проаналізовані алгоритми роботи мікропроцесорних РКН. Варто відмітити, що практично у всіх мікропроцесорних реле є функція АПВ при нормалізації величини напруги в мережі. У деяких зразків спостерігається фіксована часова затримка на відключення при відхиленні напруги від норми для унеможливлення частих і хибних спрацьовувань. У деяких РКН часову затримку відключення можна регулювати. Також в залежності від виробника можуть відрізнятися алгоритми вимірювання напруги електричної мережі: в одних випадках це середнє значення напруги поміж декількох вимірювань, в інших – алгоритм вимірювання і обчислення середньоквадратичного значення напруги "True RMS", який дає більш точні значення.

3. Описані вимоги сучасних стандартів стосовно залежних і незалежних захисних характеристик спрацьовування РКН. А також проаналізовані пороги спрацьовування РКН і часові затримки на відключення у відповідності до стандартів якості електричної енергії.

4. Наведені удосконалені алгоритми мікропроцесорних РКН для захисту однофазних побутових споживачів електричної енергії, що включають в себе особливості вже існуючих зразків реле (АПВ, можливість налаштування порогів спрацьовування та часу АПВ), а також нові можливості такі як:

- покращений алгоритм вимірювання напруги, що включає в себе аналого-цифрове перетворення і подальшу фільтрацію сигналу, для виключення збурень, компонент перехідних процесів та складових постійного струму, які можуть призвести до хибних спрацьовувань;

- можливість вибору типу захисної характеристики РКН: залежної, незалежної – для захисту як від перенапруги, так і від недостатньої напруги. У випадку залежної характеристики додатково може розраховуватись часова затримка на відключення навантаження.

### Список літератури

1. 1 Phase voltage monitoring relay minimum and maximum thresholds 230V, Din Rail [Електронний ресурс] / <https://www.ebay.com/itm/174952961891> (дата звернення 15.02.2023).
2. 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.
3. Класифікація однофазних реле контролю напруги побутових споживачів з огляду на тенденції їх розвитку / Є.Ю. Зорін, О.О. Чепелюк, Ю.С. Гришук. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2020. №1. С.15-21.
  4. Реле напруги Novatek Electro PH-32t [Електронний ресурс] / <https://novatek-electro.com/product/rele-naprugi-m-32t.html> (дата звернення 15.02.2023).
  5. Реле контролю напруги Аско Укрем [Електронний ресурс] / [https://www.acko.ua/e-store/xml\\_catalog/](https://www.acko.ua/e-store/xml_catalog/) (дата звернення 15.02.2023).
  6. Реле напруги Zubr D2-63 [Електронний ресурс] / <https://ds-electronics.com.ua/rele/d2-63/> (дата звернення 19.02.2023).
  7. Przekaznik napięciowy CP-721 [Електронний ресурс] / <https://www.fif.com.pl/pl/przekazniki-napięciowe/398-przekaznik-napięciowy-cp-721.html> (дата звернення 20.02.2023).
  8. ITI (CBEMA) Curve Application Note”, Information Technology Industry Council [Електронний ресурс] / <http://www.iti.org> (дата звернення 20.02.2023).
  9. The 230 V CBEMA curve – preliminary studies / Elphick, S., Smith, V. *Australasian Universities Power Engineering Conf., AUPEC'11, Christchurch* : 5–8 December 2010. New Zealand, 2010, pp. 1-6.
  10. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. [Чинний від 2014-10-01]. Київ, 2014. 27 с. (Інформація та документація).
  11. IEC 60255-127:2010. Measuring relays and protection equipment – Part 127: Functional requirements for over/under voltage protection. [Чинний від 2010-04-27]. International Standard, 2010. 49 с. (Інформація та документація).
  12. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [Чинний від 2000-01-01]. Москва, 2000. 32 с. (Інформація та документація).
  13. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control / W. Rebizant : Springer, 2011. 316 p.
- References (transliterated)**
1. 1 Phase voltage monitoring relay minimum and maximum thresholds 230V, Din Rail [Elektronnyi resurs]. <https://www.ebay.com/itm/174952961891> (data zvernennia 15.02.2023).
  2. Chepeliuk A.A. K voprosu klasyfikatsyy rele napriazhe-nyia dlia zashchyty bytovykh odnofaznykh potrebytelei ot nedopustymykh otklonyeni napriazheniya v pytaiushchei sety. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka.* 2014. No 41. Pp. 25-36.
  3. Klasyfikatsiia odnofaznykh rele kontroliu napruhy pobutovykh spozhyvachiv z ohliadu na tendentsii yikh rozvytku / Ye.Yu. Zorin, O.O. Chepeliuk, Yu.S. Hryshchuk. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Problemy udoskonalivannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka.* 2020. Pp 1. S.15-21.
  4. Rele napruhy Novatek Electro PH-32t [Elektronnyi resurs]. <https://novatek-electro.com/product/rele-naprugi-m-32t.html> (data zvernennia 15.02.2023).
  5. Rele kontroliu napruhy Asko Ukrem [Elektronnyi resurs]. [https://www.acko.ua/e-store/xml\\_catalog/](https://www.acko.ua/e-store/xml_catalog/) (data zvernennia 15.02.2023).
  6. Rele napruhy Zubr D2-63 [Elektronnyi resurs] / <https://ds-electronics.com.ua/rele/d2-63/> (data zvernennia 19.02.2023).
  7. Przekaznik napięciowy CP-721 [Elektronnyi resurs]. <https://www.fif.com.pl/pl/przekazniki-napięciowe/398-przekaznik-napięciowy-cp-721.html> (data zvernennia 20.02.2023).
  8. ITI (CBEMA) Curve Application Note”, Information Technology Industry Council [Elektronnyi resurs]. <http://www.iti.org> (data zvernennia 20.02.2023).
  9. The 230 V CBEMA curve – preliminary studies / Elphick, S., Smith, V. *Australasian Universities Power Engineering Conf., AUPEC'11, Christchurch* : 5–8 December 2010. New Zealand, 2010, pp. 1-6.
  10. DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh mrezhakh zahalnoi pryznachenosti. [Chynnyi vid 2014-10-01]. Kyiv, 2014. 27 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia).
  11. IEC 60255-127:2010. Measuring relays and protection equipment – Part 127: Functional requirements for over/under voltage protection. [Chynnyi vid 2010-04-27]. International Standard, 2010. 49 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia).
  12. GOST 13109-97. Normi kachestva elektrycheskoi enerhyu v systemakh elektrosnabzheniya obshecho naznacheniya. [Chynnyi vid 2000-01-01]. Moskva, 2000. 32 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia).
  13. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control. W. Rebizant : Springer, 2011. 316 p.

Поступила (received) 02.03.2023

*Відомості про авторів / About the authors*

**Зорін Євгеній Юрійович (Zorin Yevhenii Yur'yevii)** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра електричних апаратів; e-mail: yevgeny.zorin@gmail.com.

**Чепелюк Олександр Олександрович (Chepeliuk Oleksandr Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; e-mail: chep1@i.ua.