

УДК 621.313.333

І. В. ХОМЕНКО

РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ ІНДИКАТОРА ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Розглянуто питання реалізація ефективних засобів контролю електричних параметрів трифазної мережі та основних споживачів електричної енергії. Пропонується розробка індикатора параметрів енергоспоживання трифазних кіл змінного струму до 1000 В, що працює у безперервному режимі. Індикатор розроблений з використанням сучасної елементної бази. Розробка базується на широкому використанні математичного апарату, засобів вимірювальної техніки та нестандартних рішень формування діагностичних параметрів.

Ключові слова: індикатор параметрів енергоспоживання, активна потужність, реактивна потужність, центральний процесор STM32.

Вступ. В сучасних умовах впровадження енергозберігаючих і енергоефективних технологій особлива увага приділяється засобам контролю основних параметрів енергоспоживання. В нашій країні та закордоном розроблені різноманітні прилади та системи. Запропонована розробка відрізняється простотою та технологічністю, що на наш погляд сприятиме її використанню в розподільчих електричних мережах та в системах енергоспоживання [1].

Загальна характеристика і принцип дії. Індикатор параметрів енергоспоживання (ІПЕ) трифазних кіл змінного струму "Спектр" призначено для: контролю параметрів трифазного змінного струму; контролю величини навантаження; відображення результатів контролю в цифровому вигляді; зберігання результатів контролю в енергонезалежній пам'яті; видачі результатів контролю на ПЕОМ або іншу систему зберігання, реєстрації та відображення інформації. ІПЕ може використовуватися як автономний пристрій контролю або входить до складу комплектних електростановак різного призначення.

Мікропроцесорний пристрій здійснює дискретизацію і перетворення вхідних аналогових величин у цифрові, обчислення значень контрольованих параметрів у цифровій формі. Ефективне (діюче) значення фазних напруг і струмів визначається на підставі дискретних відліків їх миттєвих значень відповідно до виразів:

$$U_o = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad I_o = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt},$$

що забезпечує точні вимірювання напруг і струмів довільної форми без використання поправок на коефіцієнт гармонік. Лінійні напруги обчислюються із значень фазних напруг співвідношенням:

$$U_{ab} = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_a U_b}, \quad U_{bc} = \sqrt{U_b^2 + U_c^2 + U_b U_c},$$

$$U_{ac} = \sqrt{U_a^2 + U_c^2 + U_a U_c}.$$

Значення активної та реактивної потужності в кожній фазі обчислюються з вимірюваних дискретних миттєвих значень напруги і струму:

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt, \quad Pr = \sqrt{(u_o i_o)^2 - P_a^2}.$$

За відповідних умов роботи електроустановки активна потужність може приймати негативні значення.

Схемна реалізація і конструкція. Схема пристрою приведена на рис. 1. Основним елементом, що виконує функції вимірювання та розрахунку параметрів, зберігання та видачі інформації є центральний процесор (STM32).

STM32 побудований на ядрі Кора-М3. Дане ядро має багато переваг, але його основна перевага на сьогоднішній день – універсальність. Основна перевага лінійки STM32 полягає у режимах зупинки і резерву, де енергоспоживання падає до 1,6 мкА. Режим зупинки – це режим, в якому всі джерела тактирування зупинені, але вміст RAM-пам'яті зберігається, і перехід в активний режим вимагає всього декількох мікросекунд. У режимі резервний все відключено повністю, крім годинника реального часу. Пробудження від цього режиму вже вимагає декількох десятків мікросекунд. Висока продуктивність STM32 дозволить виконати всі завдання за більш короткий час і повернутися в сплячий режим і в підсумку середнє споживання буде нижче в порівнянні з 8-або 16-бітовим виробом [2, 3]. На аналогові входи ЦП через дільники надходять напруги трьох фаз контрольованого введення. Напруги, пропорційні струмам навантаження по фазах, надходять з опорів шунтів, якими навантажені струмові трансформатори. Після посилення ці напруги також надходять на аналогові входи ЦП. Для розширення динамічного діапазону підсилювачі мають ступінчасте регулювання посилення на 20 дБ, яке включається від ЦП при струмах, що перевищують 0,85 Ін. Результати прямих вимірів (напруга, струм і частота), а також параметри, які обчислюють на основі вимірів (потужність, спожита енергія), відображаються цифровими індикаторами модуля відображення. Індикаторами постійно відображаються: три значення лінійних напруг; три значення фазних струмів; частота; активна потужність. При натисканні кнопки з символом на лицьовій панелі модуля відображення замість лінійних напруг відображаються значення фазних напруг.

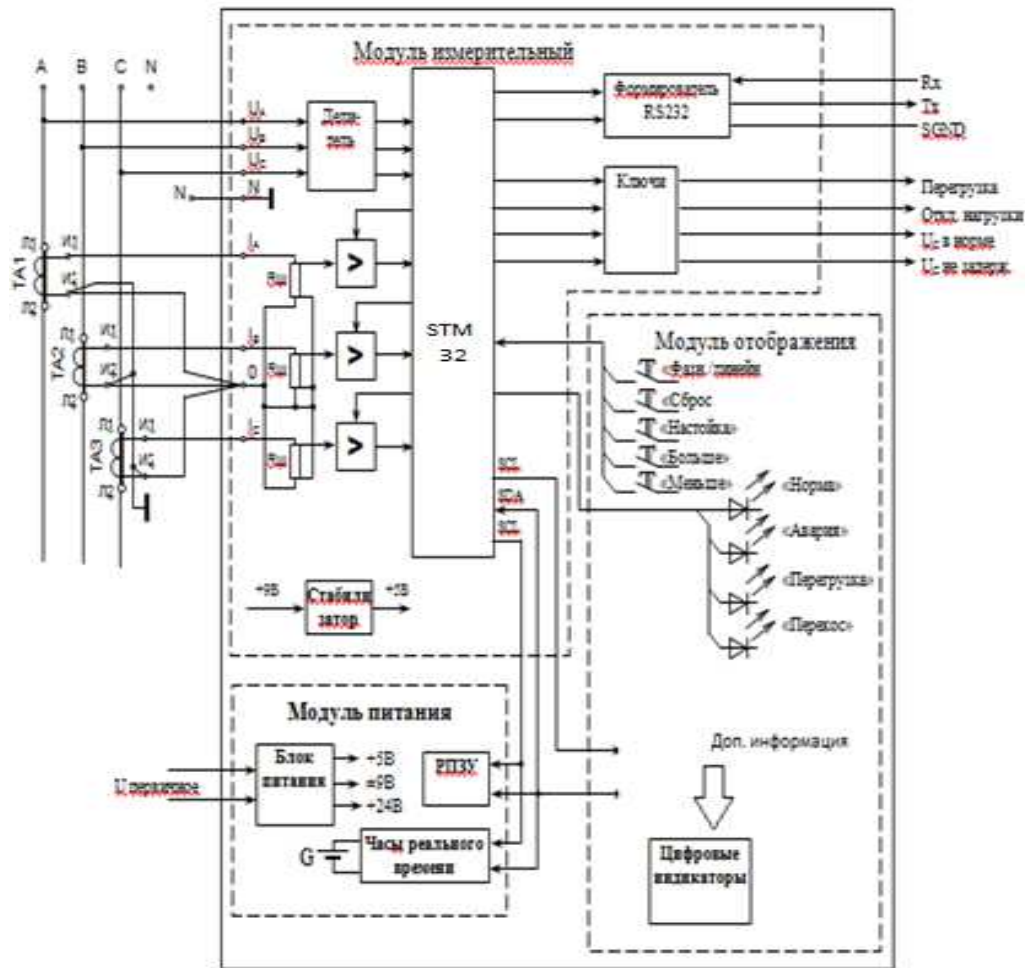


Рис. 1 – Схема індикатора

При натисканні кнопки з символом ("Додаткова інформація") відображаються: показання лічильника активної енергії індикаторами напруги АВ і струму фази А (шість знаків); показання лічильника реактивної енергії індикаторами напруги ВС та струму фази В (шість знаків); замість частоти відображається значення cosφ; замість активної відображається значення реактивної потужності. Якщо фазні напруги перебувають у допустимих межах, на зовнішні системи видаються сигнали "U введення в нормі" і "U введення в нормі не затриманий", підсвічується світлодіод "Норма". При виході напруги за допустимі межі знімається сигнал "U введення в нормі не затриманий" і підсвічується світлодіод "Аварія". Через встановлений час t_{C0} знімається сигнал "U введення в нормі" і згасає світлодіод "Норма". При відновленні параметрів напруг видається сигнал "U введення в нормі не затриманий" і згасає світлодіод "Аварія", а у встановлений час t_{C1} видається сигнал "U введення в нормі" і спалахує світлодіод "Норма". При виявленні перевищення різниці струмів двох будь-яких фаз величини 25% від номінального струму здійснюється напис "Перекус". При виникненні перевантаження більше 10% на зовнішні системи видається сигнал "Перевантаження" і блимає світлодіод "Перевантаження". Через час, відповідний встановленої перевантажувальній характеристиці видається

сигнал "Відключення навантаження", світлова індикація "Перевантаження" стає безперервною. Сигнали видаються електронними ключами, гальванічно-розв'язаними від ЦП за допомогою оптопар. Сигнали "Перевантаження", "Відключення навантаження" і напис "Перевантаження" зберігаються при наявності живлення до зняття кнопкою "Скидання аварії". Настановні параметри-параметри перевантажувальної лінії, значення t_{C0} і t_{C1}, ознака джерела живлення (мережа або генератор) відображаються по черзі при натисканні кнопки. Налаштування встановлюються кнопками (більше) і (менше). Вихід з режиму налаштування здійснюється автоматично через 10 секунд після останнього натискання кнопок. Зв'язок ЦП зі світлодіодами та кнопками (крім кнопки "Додаткова інформація") здійснюється безпосередньо через паралельні порти. Результати вимірювань усереднюються за 5 хвилин та зберігаються з прив'язкою до астрономічного часу (добовий формуляр). Час виникнення і зняття аварійної ситуації або перевантаження фіксується в аварійному формулярі. Зберігання формулярів здійснюється в електрично-репрограмованому постійному запам'ятовуючому пристрої (РПЗУ). Обмін з РПЗУ здійснюється за протоколом I2C, Адресна шина SDA загальна, синхронізації SCL - роздільні. Вивід поточних значень вимірюваних параметрів з ЦП і

формулярів з РПЗУ на ПЕОМ або інші зовнішні системи здійснюється по інтерфейсу RS232 через відповідний формувач. Таким же чином видаються миттєві значення напруг і струмів, виміряні протягом одного періоду з дискретністю 151мкс. Модуль живлення формує напруги +5 В, +9 В, -9В і +24 В. У виконанні з первинним живленням 24В напруга +24 В не формується. З напруги +9 В стабілізатором вимірювального модуля формується напруга +5 В.

Елементи і схеми пристрою оформлені у вигляді модулів: вимірювального, відображення, пам'яті та живлення. Пристрій може випускатися у вигляді автономного, функціонально закінченого, самостійно використовованого приладу або у вигляді щитового приладу або у вигляді набору модулів. Вимірювальний модуль і модуль відображення мають по два виконання: для контролю трифазних і однофазних мереж. Лицьова панель модуля відображення є панеллю управління. Різні виконання модуля живлення використовуються для живлення пристрою від первинного джерела постійного струму напругою 24 В, 48 В або 60 В, а також від джерела змінного струму напругою 220 В частотою 50 Гц. Мікросхеми модуля пам'яті розташовані на платі модуля живлення.

Функції і параметри пристрою. Пристрій забезпечує вимірювання ефективних значень фазних напруг трьох фаз змінного струму номінальної частоти 50 Гц в мережах з ізолюваною або заземленою нейтраллю. Межі вимірюваних ефективних значень напруг – 30В ... 300В. Межі допустимої абсолютної похибки вимірювання фазних напруг в діапазоні частот 30 ... 75 Гц – $\pm 2\%$. Також «ПЕ» забезпечує вимір ефективних значень лінійних напруг трьох фаз в мережах з ізолюваною або заземленою нейтраллю. Границі допустимої абсолютної похибки вимірювання лінійних напруг – $\pm 3\%$. Пристрій забезпечує вимірювання ефективних значень струмів трьох фаз. Вимірювання струмів здійснюється шляхом підключення пристрою до трансформаторів струму. У виробі передбачена уставка значення коефіцієнта трансформації, відповідно до типу підключаються трансформатори струму з ряду 50/5, 100/5, 200/5, 400/5 А Межі допустимої зведеної похибки вимірювання ефективних значень струмів – відповідно до табл. 1. Похибка вимірювання ефективних значень струмів у діапазоні частот 30 ... 75 Гц наведена без урахування похибки, що вноситься трансформатором струму.

Таблиця 1 – Межі допустимої зведеної похибки вимірювання ефективних значень струмів

Коефіцієнт трансформації	Межа виміру, А	Границя похибки	Межа виміру, А	Границя похибки
50/5	1...47	1,5%	47...100	2,5%
100/5	1...85	1,5%	85...200	2,5%
200/5	1...170	1,5%	170...400	2,5%
400/5	1...340	1,5%	340...800	2,5%

Пристрій забезпечує вимірювання значень сумарної активної та реактивної споживаної навантажен-

ням потужності. Межі похибки вимірювання потужності відповідно до табл. 2.

Таблиця 2 – Межі похибки вимірювання потужності

Коефіцієнт трансформації	Межа виміру, кВт	Границя похибки
50/5	0...45	2,5%
100/5	0...90	2,5%
200/5	0...180	2,5%
400/5	0...360	2,5%

Пристрій забезпечує вимірювання середнього по трьом фазам значення коефіцієнта потужності ($\cos\phi$). Похибка вимірювання не нормується. Пристрій забезпечує вимірювання значень спожитих навантаженням активної і реактивної енергії. Похибка вимірювання енергії не нормується. Пристрій забезпечує відображення вимірюваних величин: трьох значень лінійних напруг, трьох значень фазних напруг, трьох значень фазних струмів, частоти змінного струму в одній з фаз, значення сумарної активної або реактивної споживаної потужності, значень спожитих навантаженням активної і реактивної енергії, середнього (за трьома фазами) значення коефіцієнта потужності ($\cos\phi$). Межі відображуваних ефективних значень трифазних напруг – 30 В ... 600 В. Значення напруг відображаються з дискретністю 1В. Межі відображуваних ефективних значень фазних напруг – 30 В ... 300 В. Відображення здійснюється за викликом кнопкою на лицьовій панелі пристрою. Значення фазних напруг відображаються з дискретністю 1В. Межі відображуваних струмів – 1А-999А. Значення струмів відображаються з дискретністю 1А. Межі відображення частоти – 0,1 ... 75,0 Гц. Значення частоти відображаються з дискретністю 0,1 Гц. Межі відображення потужності – 1 ... 999 кВт. Значення потужності відображаються з дискретністю 1 кВт. Відображення активної потужності здійснюється постійно, реактивної потужності - за викликом кнопкою на лицьовій панелі пристрою. Частота оновлення результатів вимірювань – не більше 1 с за винятком часу зчитування формулярів. У виробі передбачена уставка органами управління на лицьовій панелі величини номінального фазної напруги 220 В при контролі параметрів введення промислової мережі. Пристроєм забезпечується видача на зовнішні системи сигналу-ознаки "Напруга введення в нормі", зняття сигналу і світлова індикація при виході параметрів введення за межі допуску ("Аварія"). Виходом за межі допуску вважається: пропажа напруги хоча б однієї з фаз; порушення порядку чергування фаз; вихід хоча б одного фазної напруги за межі $+10\%$, -15% від номінального; вихід частоти за межі $50 \pm 2,5$ Гц. Забезпечується роздільна уставка органами управління на передній панелі пристрою часу затримки сигналу аварії при виході параметрів мережі за межі допуску t_{CO} і затримки зняття сигналу аварії при відновленні нормальних параметрів t_{C1} . Межі уставки – 0-255 с з дискретністю 1 с. Пристроєм забезпечується видача команди на відключення навантаження при досягненні фазною напругою величини 280В. Команда об'єднується із сигналом "Переванта-

ження". Пристроєм забезпечується світлова індикація несиметричності навантаження за фазами в трифазних мережах ("Перекис"). Індикація здійснюється при перевищенні різниці струмів двох будь-яких фаз величини 25% від номінального струму. Пристроєм забезпечується видача на зовнішні системи сигналу-ознаки перевантаження (команди на відключення навантаження) у випадках: перевищення сумарним струмом величини, рівної 1,1 сумарного номінального струму I_n протягом часу $t_{1,1}$, забезпечується уставка часу $t_{1,1}$ у межах 0-120 хв з дискретністю 1 хв; перевищення струмом будь-який з фаз $1,25 I_n$ протягом часу $t_{1,25}$, забезпечується уставка часу $t_{1,25}$ у межах 0-40хв з дискретністю 1 хв; перевищення струмом будь-який з фаз $1,5 I_n$ протягом часу $t_{1,5}$, забезпечується уставка часу $t_{1,5}$ в межах 0-120с з дискретністю 1с; перевищення струмом будь-який з фаз $3,0 I_n$ протягом часу t_3 , забезпечується уставка часу t_3 в межах 0-10с з дискретністю 1с; перевищення струмом будь-який з фаз 10 I_n , сигнал перевантаження видається з затримкою 0,16-0,4 с. Ознака перевантаження видається у вигляді напруги нульового рівня джерела живлення (відкритий колектор транзистора), допустимий струм ланцюга сигналізації – до 0,5 А. У виробі передбачена уставка номінального струму навантаження з ряду, наведеного в табл. 3. Значення номінальних струмів приведені для номінальної напруги 230В, $\cos\varphi = 0,8$.

Таблиця 3 - Номінальний струм навантаження

Номінальна активна потужність, кВт	24	30	48	60	75	100	200
Номінальний струм, А	43	54	87	109	136	181	362

Пристроєм забезпечується запам'ятовування (за наявності напруги живлення) та незалежне зберігання значення фазних напруг, струмів, частоти, потужності, коефіцієнта потужності: за час не менше 24 годин, що перевищує поточному астрономічному часу (добовий формуляр) – з усередненням за інтервал часу 5 хвилин; за час не менше 7 діб, що перевищує поточному астрономічному часу (тижневий формуляр) – з усередненням за інтервал часу 30 хвилин; за час не менше 31 діб, що перевищує поточному астрономічному часу (місячний формуляр) – з усередненням за інтервал часу 3 години; за час не менше 12 місяців, що перевищує поточному астрономічному часу (річний формуляр) – з усередненням за інтервал часу 24 години; формуляра



Хоменко Ігор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри "Передача електричної енергії", тел. (057) 70-76-246 e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com

Khomenko Ihor Vasyl'ovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Transmission of electricity; tel.: (057) 70-76-246; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

аварійних станів контрольованої мережі. Забезпечується видача на зовнішні системи по інтерфейсу RS232 наступної інформації: поточних значень фазних і лінійних напруг, струмів, частоти, активної та реактивної потужності; активної та реактивної енергії, спожитої на момент видачі; добового, тижневого, місячного і річного формулярів; формуляра аварійних станів; відліків миттєвих значень фазних напруг і струмів за один період, дискретність відліків – 151 мкс. Програмне забезпечення для ПЕОМ дозволяє здійснювати: дистанційний контроль поточних значень вимірюваних параметрів; контроль форми напруг і струмів в режимі осцилографа; спектральний аналіз і оцінку нелінійних спотворень; налаштування перевантажувальної характеристики і допустимих значень; зчитування і перегляд формулярів у вигляді таблиць і графіків; роздруківку графіків і таблиць формулярів, осцилограм і спектрів.

Прилад може експлуатуватися в наступних умовах: при температурі навколишнього середовища від 5 °С до 40 °С; відносної вологості не більше 80 % при температурі 25 °С; при атмосферному тиску (84-106,7) кПа (630-800) мм рт.ст.

Пристрій забезпечує виконання всіх функцій після перебування в неробочому стані в умовах: впливу граничних температур від мінус 40 до 60 °С; впливу відносної вологості повітря не більше 95% при температурі 25 °С. Номінальна напруга контрольованих джерел (вводів) змінного струму з номінальною частотою 50 Гц: мережі – 380 В, дизель-генератора – 400 В. Струм, споживаний пристроєм від джерела електроживлення, не більше 0,4 А. Розміри пристрою не більше 130x130x100 мм.2.1.5 Маса пристрою не більше 2,5 кг. Призначений ресурс пристрою становить 10 років. Гарантійний термін зберігання – 18 міс. Гарантійний термін експлуатації – 12 міс.

Список літератури: 1. Хоменко І.В. Розробка засобів та методів безперервного контролю енергоспоживання в трифазних мережах / Хоменко І.В. // Вісник НТУ "ХПІ". – 2009. – №27. – С. 139-141. 2. http://easyelectronics.ru/img/ARM_kurs/CMSIS/stm32.pdf. 3. <http://geektimes.ru/post/257654/>

Bibliography (transliterated): 1. Khomenko, I.V. "Rozrobka zasobiv ta metodiv bezperernvnoho kontrolyu enerhospozhyvannya v tryfaznykh merezhakh". *Visnyk NTU «KhPI»*. No. 27. 2009. 139-141. Print. 2. http://easyelectronics.ru/img/ARM_kurs/CMSIS/stm32.pdf. 3. <http://geektimes.ru/post/257654/>.

Надійшла (received) 09.10.2015