

УДК 621.311.13:621.31

В.М. Ванько<sup>1</sup>, М.В. Чорний<sup>2</sup>, Т.В. Парфенюк<sup>1</sup><sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка", Львів<sup>2</sup>Львівський інститут Сухопутних військ Національного університету "Львівська політехніка", Львів

## ВДОСКОНАЛЕНИЙ АНАЛІЗАТОР ТИМЧАСОВИХ ПЕРЕНАПРУГ ТА ЗАПАДИН НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

На основі аналізу відомих засобів вимірювання показників якості електроенергії, призначених для контролю тимчасових перенапруг та западин напруги, запропоновано вдосконалений аналізатор цих процесів з використанням wavelet-перетворення та способу побудови структури з двоступеневою організацією. Наведено алгоритми обчислення показників якості електроенергії з розширеним тлумаченням отриманої інформації, що дозволить формулювати нові нормативні вимоги до якості електроенергії, а також описано роботу основних вузлів розробленої структури аналізатора.

**Ключові слова:** електроенергія, показник якості, тимчасова перенапруга, западина напруги, мікроконтролер, карта пам'яті, wavelet-перетворення.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Електрична енергія (ЕЕ) вважається одним з основних видів енергетичних ресурсів, котрий забезпечує різнобічну виробничу діяльність, побутові і культурні потреби людства. Враховуючи масовий характер застосування, стосовно ЕЕ декларуються відповідні нормативні вимоги з якості, що наведені в [1]. При цьому варто зазначити, що завдання забезпечення якості ЕЕ та гарантування її показників якості (ПЯ) в межах нормально і гранично допустимих значень є комплексною проблемою, тобто вимагає не лише розвитку теорії вимірювання ПЯ ЕЕ, але й вдосконалення нормативно-технічного забезпечення даних вимірювань. Останнє полягає у формуванні оптимальної номенклатури ПЯ ЕЕ та обґрунтованих вимог стосовно граничних значень для сукупності ПЯ, дотримання яких дозволить гарантувати надійну та продуктивну роботу різноманітного устаткування.

Серед негативних, мало вивчених процесів, котрі відбуваються в електричних мережах, є швидкі динамічні спотворення напруги, що називають тимчасовими перенапругами та западинами напруги [1]. Причинами їх появи вважаються: комутації і регулювальні дії в структурах енергооб'єктів; порушення балансу потужностей на різних ділянках енергосистеми; несиметрія трифазної системи напруг та раптові зміни режимів в мережах; виникнення аварійних ситуацій на енергооб'єктах; взаємний вплив внутрішніх мереж сусідніх споживачів ЕЕ; сезонні атмосферні явища у вигляді блискавок і грозових розрядів.

Для виявлення та дослідження цих процесів застосовується спеціальна група засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), яка дозволяє вивчати та аналізувати такі погіршення якості ЕЕ з метою усунення або мінімізації їх впливу.

**Аналіз останніх досліджень в даній галузі.** До ЗВТ, призначених для контролю ПЯ ЕЕ на різ-

них ділянках енергосистеми, висувається ряд суттєвих вимог. Вони повинні забезпечувати вимірювальну інформацію, достовірність якої не буде суттєво залежною від специфічного нестационарного характеру перебігу цих негативних процесів, як на їх початковій, так і заключній стадіях. Зміни часової кривої функції напруги мережі  $f_U(t)$  під час перенапруг чи западин напруги також не мають впливати на надійність функціонування ЗВТ ПЯ ЕЕ.

Варто зазначити, що як і для більшості ЗВТ фізичних величин, відомі вимірювачі ПЯ ЕЕ розподіляються на аналогові та цифрові структури [2]. Перші з них – це здебільшого прості структури релейного типу, котрі лише фіксують моменти виникнення і закінчення тимчасових перенапруг і западин напруги [3, 4], або запам'ятовувальні осцилографи [5] – для наглядного відображення цих процесів. Останні поступово вдосконалювались з розвитком мікроелектронної техніки [3, 4, 6]. Разом з тим, відома низка другої групи розробок ЗВТ ПЯ ЕЕ для контролю таких негативних процесів, котрі реалізовані за допомогою одного з найефективніших методів – аналого-цифрового перетворення  $f_U(t)$  – у поєднанні з математичним опрацюванням цифрової інформації [7 – 10].

Як приклад можна навести ЗВТ "Ресурс – UF" виробництва «АЛАН – АБРИС» [8], котрий вимірює: коефіцієнт  $K_{перU}$  і тривалість  $t_{рΣ}$  тимчасової перенапруги та глибину  $\delta U_3$  і тривалість  $t_{зΣ}$  западини напруги. Його метрологічні характеристики є подібними, як і у інших аналогів – ЗВТ ПЯ ЕЕ другої групи. Однак, цей прилад не дозволяє детальніше досліджувати та аналізувати негативні динамічні процеси в мережах через малу кількість ПЯ і, відповідно, обмежену оцінку динамічних спотворень ЕЕ за їх допомогою. Спроби об'єднання функцій осци-

логафа, аналізатора спектру та мультиметра в єдиному приладі (наприклад, Fluke 434 [10]) призводять до значного ускладнення структури ЗВТ.

**Формулювання мети статті.** Отже, для вдосконалення опису тимчасових перенапруг і западин напруги на енергооб'єктах, постає актуальним завдання пошуку нових способів побудови ЗВТ, які забезпечуватимуть розгорнутий аналіз зазначених процесів динамічних знижень якості ЕЕ, причому з достатнім рівнем точності їх виявлення та вимірювання відповідних ПЯ.

### Підхід до реалізації аналізатора динамічних спотворень напруги мережі

Завдяки появі потужних засобів опрацювання та збереження цифрової інформації, таких як однокристалні мікроконтролери (ОМК) та карти на основі flash-пам'яті (КП), можна будувати вимірювальні канали дослідження фізичних величин для проведення експериментів широкого призначення. На основі застосування новітнього математичного апарату – wavelet-перетворення – та способу побудови ЗВТ у вигляді структури з двоступеневою організацією [2], що містить вхідну частину збирання і первинного опрацювання інформації – (ступінь I) та перетворювальну і обчислювальну схему у вигляді персонального комп'ютера (ступінь II – ПК), розроблено аналізатор тимчасових перенапруг і западин напруги в мережах (рис. 1).

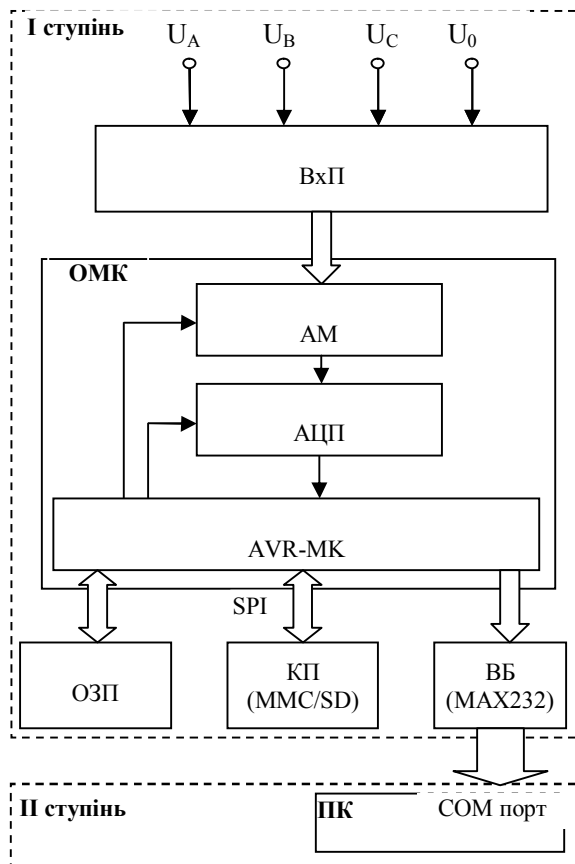


Рис. 1. Структура аналізатора тимчасових перенапруг та западин напруги

Ступінь I представляє собою окремих пристрій, що складається з вхідного перетворювача ВхП, ОМК, оперативного запам'ятовуючого пристрою ОЗП, КП та вихідного буфера ВБ. ОМК містить аналоговий мультиплексор АМ, аналого-цифровий перетворювач АЦП та AVR-RISC-мікроконтролер (AVR-МК).

Досліджувані трифазні напруги  $U_A, U_B, U_C, U_0$  попередньо нормуються у ВхП, а потім дискретизуються в АМ.

Надалі за допомогою AVR-МК виконуються три основні операції: аналого-цифрове перетворення; виявлення процесів тимчасових перенапруг і западин напруги та запис їх перебігу в КП; передавання отриманих і збережених даних з КП на ПК з метою подальшого аналізу ПЯ ЕЕ.

Дискретний сигнал з виходу АМ послідовно в часі перетворюється АЦП на потоки цифрових кодів, котрі для кожної фазної напруги повинні проходити процедуру перевірки на появу одного чи іншого виду динамічного спотворення. Варто зазначити, що кожна виборка послідовності кодів  $f_U(k)$  відповідної фазної напруги з сумарною часовою тривалістю  $t_B$  за посередництвом ОМК запам'ятовується у ОЗП. Відповідно до [2] з метою перевірки цієї послідовності кодів на наявність негативного процесу спотворення напруги над  $f_U(k)$  здійснюється дискретне wavelet-перетворення (ДВВП). При цьому на першому рівні ДВВП отримуємо масиви коефіцієнтів апроксимації

$$a_{1,x} = (f_U(k), \phi_{1,x}) \quad (1)$$

та деталізуючих коефіцієнтів

$$d_{1,x} = (f_U(k), \psi_{1,x}), \quad (2)$$

де використано базові масштабуючу  $\phi_{1,x}$  та деталізуючу  $\psi_{1,x}$  функції, а  $x$  – параметр зміщення базових функцій на цьому рівні ДВВП. Для даного інтервалу контролю шукають значення автокореляційної функції (АКФ)

$$\Phi_{PZ} = \frac{\sum_x [(d_{1,x})^2 + (a_{1,x})^2]}{N_B}, \quad (3)$$

причому  $N_B$  – число точок дискретизації за  $t_B$ .

В разі появи зазначених негативних процесів мають виконуватись дві умови [2]. На першому рівні ДВВП з'являються імпульсні відхилення значень отриманих коефіцієнтів:  $\text{mod}|d_{1,x}| > d_{оп}$ , де  $d_{оп}$  – розраховане опорне значення, котре вибирається трохи більшим нуля і залежить від необхідного рівня завадостійкості приладу. Поряд з цим фіксується також здійснення нерівностей:

$$\Phi_{PZ}^{0,5} \gg 1, 1 \cdot \Phi_{НОМ}^{0,5}, \quad (4)$$

у випадку появи тимчасової перенапруги та

$$\Phi_{PZ}^{0,5} \ll 0,9 \cdot \Phi_{НОМ}^{0,5}. \quad (5)$$

під час западини напруги, причому  $\Phi_{НОМ}$  – номінальне значення АКФ стосовно досліджуваної мережі.

Якщо виконуються обидві умови, то дана послідовність кодів  $f_U(k)$  об'ємом  $N_B$  переписується з ОЗП у КП. Після цього вибирається, фіксується в ОЗП та аналогічно досліджується наступна послідовність кодів даної фазної напруги з виходу АЦП. Поки справджуються зазначені нерівності всі послідовності по чергово переписуються в КП. Так само опрацьовуються даною структурою **I** (рис. 1) послідовності  $f_U(k)$  інших фазних напруг, підключених до аналізатора.

В подальшому зібрана у ступені **I** вимірювальна інформація переписується через ВБ у ступінь **II** (ПК, СОМ-порт, рис. 1).

Використовуючи програмну систему MATLAB, у ПК проводяться більш деталізовані дослідження цієї інформації з використанням різних базових функцій wavelet-перетворення.

За допомогою отриманих на кожному  $j$ -у рівні ( $j=1, 2, \dots, J$ ) масивів деталізуючих коефіцієнтів  $|d_{j,x_j}|$ , а на  $J$ -у –  $|d_{J,x_J}|$  та  $|a_{J,x_J}|$ , відповідно до [2] обчислюємо

$$K_{пер.U} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^J \sum_{x_j} (d_{j,x_j})^2 + \sum_{x_J} (a_{J,x_J})^2}}{\sqrt{\Phi_{НОМ} \cdot N_B}} = \quad (6)$$

$$= \sqrt{(K_{пер.U})_{j_{НОМ}}^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_{НОМ}}}^J (K_{пер.U})_j^2};$$

$$\delta U_3 = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^J \sum_{x_j} (d_{j,x_j})^2 + \sum_{x_J} (a_{J,x_J})^2}}{\sqrt{\Phi_{НОМ} \cdot N_B}} = \quad (7)$$

$$= 1 - \sqrt{(K_{nU})_{j_{НОМ}}^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_{НОМ}}}^J (K_{nU})_j^2}.$$

Таким чином, у випадку тимчасової перенапруги одержуємо не лише сумарне значення  $K_{пер.U}$ , але й часткові коефіцієнти перенапруг стосовно певних частотних смуг ( $j_{НОМ}$ -й та  $j$ -і рівні) досліджуваної напруги мережі.

Стосовно виявленої западини напруги можна розглядати  $\delta U_3$  як сукупність коефіцієнтів гармоні-

чних складових  $(K_{nU})_j$   $j$ -их та  $(K_{nU})_{j_{НОМ}}$   $j_{НОМ}$ -го рівнів ДВВП.

Вирази (6) і (7) дозволяють не лише виокремити складові основних ПЯ, що містять дані про рівень якості ЕЕ у частотному інтервалі зі смугою 45...55 Гц ( $j_{НОМ}$ ) та у низько- і височастотних діапазонах, але й у перспективі, за умови збирання достатньої кількості статистичної інформації, зформулювати граничні норми щодо цих складових ПЯ ЕЕ.

Розглянемо детальніше особливості функціонування основних вузлів структури (рис. 1) під час роботи запропонованого аналізатора негативних динамічних процесів в мережах.

Аналого-цифрове перетворення відбувається 10-розрядним 8-канальним АЦП мікроконтролера ATmega32 (AVR-МК, рис. 1). Його багатоканальність, як зазначалось вище, забезпечується АМ, який встановлений на вході єдиного модуля ОМК. Значення кодів з АЦП у випадку виявлення негативних процесів записуються у КП, що являє собою flash-пам'ять. Серед різновидів останньої на нашу думку в запропонованому аналізаторі доцільно застосувати різновид КП – Multi Media Card (MMC), для яких характерний типовий послідовний інтерфейс звертання, сумісний з SPI. Загальний принцип роботи інтерфейсу SPI в КП дещо відрізняється від звичного нам послідовного побайтового доступу [11]. В інтерфейсі SPI відсутній маркер, призначений для розділення даних на байти. Тобто інформація представляє собою встановленого розміру потік бітів, синхронізованих фронтами сигналу по спеціальній лінії SCL даного інтерфейсу.

Карти MMC усередині влаштовані аналогічно будь-яким мікросхемам flash-пам'яті – весь простір поділений на сторінки, розмір яких дорівнює сектору на жорсткому диску (512 байт), які в документації називаються блоками. Як і на жорсткому диску ПК, розмір блоку для операції читання можна змінювати – в межах до 2048 байт. Проте, на даний момент неможливо здійснювати таку ж зміну об'єму блоку КП під час операцій запису. Тому, доцільно вибрати розмір блоку КП для читання і запису однаковим та рівним – 512 байт. Отже, запис даних з ОЗП на КП відбувається через ОМК такими блоками.

Серед команд MMC є операції читання і запису відразу декількох блоків за один цикл, що може використовуватись для роботи з над великими об'ємами інформації. З метою спрощення програмного забезпечення ми застосували одномоментно читання і запис лише одного блоку: `Write_block` та `Read_single_BLOCK`.

Загальний принцип подачі команд і даних на КП ілюструється діаграмою (рис. 2) на прикладі процедури запису блока даних, де DI та DO – відповідно, вхідна та вихідна лінії даних, CS – дозвіл

вибору карти [11].

Довжина команди в картах MMC фіксована і складає 6 байтів (48 бітів). Перші два біти (47-й і 46-й) послані на КП (в термінології опису MMC – називається host), завжди рівні 01. Наступні 6 бітів старшого байта представляють собою код команди. Таким чином будь-яка команда формується з її коду (котрий може знаходитись в межах від 0 до 63) з додаванням до нього числа \$40. Після команди повинно йти чотири байти (32 біти) аргументу. Для команд без аргументу їм присвоюється число \$0. Останній байт в команді повинен нести значення циклічного контрольного коду CRC (Cyclic Redundancy Code), причому він займає сім старших бітів цього останнього байта, а молодший (останній) біт завжди рівний одиниці.

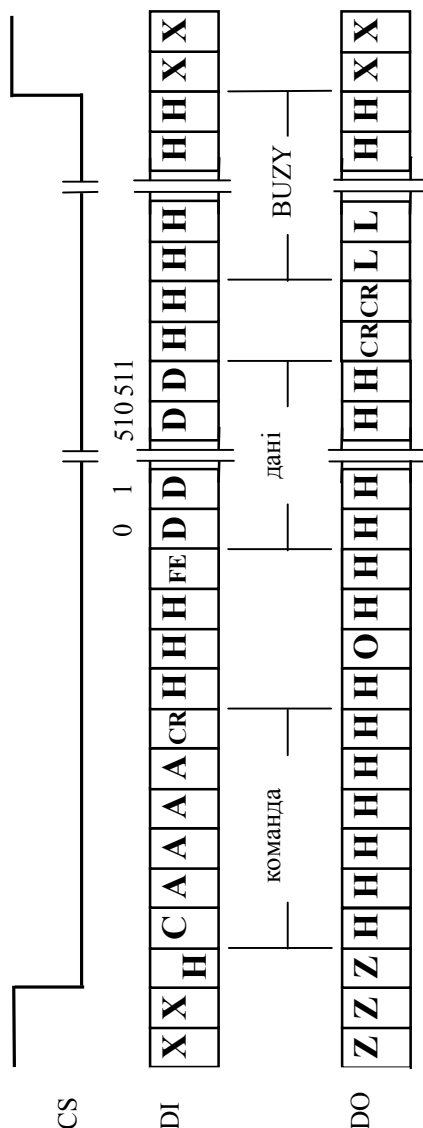


Рис. 2. Часова діаграма подачі команд на карту MMC  
 X – довільний стан; Z – «третій» стан;  
 Н – високий рівень (\$FF); L – низький рівень (\$00);  
 С – байт коду команди (0b01nnnnnn, де n біти коду команди);  
 А – байти аргументу (адреса).  
 С – код CRC; FE – байт із значенням \$FE

Найпершою повинна йти команда скидання карти Go\_idle\_state (з кодом, рівним нулю), в якій CRC є обов'язковим.

Після подавання будь-якої команди запису або читання КП посилає відгук (у SPI-режимі в більшості команд – один байт), який інколи корисно проаналізувати: окремі біти в ньому сигналізують, наприклад, про помилку, якщо досягнутий кінець пам'яті, або про неправильно прийняту команду.

Перед посилкою відгуку КП вичікує як мінімум протягом восьми тактів, посылаючи одиниці (байт рівний \$FF), старший біт відгуку завжди дорівнює нулю. При відсутності помилок відгук повинен містити нулі у всіх розрядах, за винятком сприйнятої в цей момент команди скидання, де відгук повинен бути рівним \$01.

Для повернення карти у вихідний стан і переведення її в SPI-режим необхідно скинути лінію CS в стан логічного нуля і подати команду Go\_idle\_state (без цих дій карта після включення працюватиме в режимі MMC Protocol, недоцільному для даного застосування). Байт відгуку після цього має дорівнювати \$01 (молодший біт, рівний 1, сигналізує про те, що карта знаходиться в стані очікування In\_idle state).

Потім слід почекати деякий час (інструкція рекомендує не менше 74 циклів на лінії CLK), і послати команду ініціалізації Send\_op\_cond (її код дорівнює 1), після подавання якої переконатися в тому, що байт відгуку дорівнює нулю – карта готова до роботи. Якщо відгук відмінний від нуля, то слід подати кілька разів команду Send\_op\_cond. Перед подаванням будь-якої команди, після скидання лінії CS, варто послати пустий байт \$FF, щоб дати можливість карті встановитись у стан готовності (лінія DO при цьому може залишатися ще в третьому стані).

Після закінчення дослідження вхідних  $U_A, U_B, U_C, U_0$  на предмет виявлення динамічних спотворень, здійснюється передавання збереженої в КП інформації на ПК.

Як правило, ОМК має універсальний послідовний інтерфейс – UART, тобто асинхронний послідовний протокол. Синхронізація за ним відбувається, виходячи із заздалегідь встановленої для приймача і передавача частоти обміну інформацією.

Для узгодження рівнів цифрових сигналів між ОМК та COM-портом ПК використовується ВБ, реалізований на MAX232. Простота реалізації і низька вартість апаратної частини UART та відсутність певних вимог до швидкості передавання являється основною причиною використання даного інтерфейсу.

## Висновки

Запропонована структура аналізатора надається для проведення експериментальних досліджень якості ЕЕ, а саме – з вивчення перебігу тимчасових пере-

напруг і западин напруги в мережах енергосистеми. На основі отриманої інформації можна вжити заходів, направлених на послаблення впливу або усунення цих шкідливих процесів. Крім того, завдяки розширеним даним з їх опису можна сформулювати нові покращані нормативні вимоги для динамічних показників якості електроенергії в різних мережах.

### Список літератури

- ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.01.2000. – К.: Держстандарт України, 1999. – 32 с.
- Ванько В.М. Развитие теоретических основ и нормативно-технического обеспечения оценки качества электрической энергии в сетях общего назначения: автореф. дис. на добуття наук. ступ. доктора техн. наук / В.М. Ванько. – НУ “Львівська політехніка”. – Л.: НУ “Львівська політехніка”, 2008. – 36 с.
- Гурвич И.С. Защита ЭВМ от внешних помех. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.С. Гурвич. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
- Жежеленко И.В. Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко, О.Б. Шиманский. – К.: Вища школа, 1986. – 119 с.
- Бабилов М.А. Техника высоких напряжений / М.А. Бабилов, Н.С. Комаров, А.С. Сергеев. – М. – Л-д: Госэнергоиздат, 1963. – 671 с.
- Catalogue ELFA (2006). The ELFA website [Online]. – [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: available: <http://www.elfa.com/>.
- Анікін В. Метрологічне забезпечення якості електроенергії в мережі / В. Анікін, О. Колбасін, О. Гриб, В. Левін // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2003. – №4. – С. 49-52.
- АЛАН-АБРИС. Оборудование. Продукция. Измерители показателей качества электроэнергии “Ресурс – УФ”. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.retar.m.ru/elektro.html/>.
- АСТОН-ЭНЕРГО. Каталог. Приборы ПАРМА анализа показателей качества электроэнергии. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:– <http://www.aston-e.ru/>.
- Catalogue Fluke (2007). The Fluke 434/435 Three Phase Hfwer Quality Analyzer. The Fluke website [Online]. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: available: <http://www.fluke.com/>.
- Ревич Ю.В. Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера / Ю.В. Ревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 384 с.

Надійшла до редколегії 20.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Р.І. Байцар, Національний університет “Львівська політехніка”, Львів.

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ АНАЛИЗАТОР ВРЕМЕННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В.М. Ванько, Н.В. Чорный, Т.В. Парфенюк

На основании анализа известных средств измерения показателей качества электроэнергии, предназначенных для контроля временных перенапряжений и провалов напряжения, предложен усовершенствованный анализатор этих процессов с использованием wavelet-преобразования и способа построения с двухступенчатой организацией. Приведены алгоритмы вычисления показателей качества электроэнергии с расширенным истолкованием полученной информации, позволяющие формулировать новые нормативные требования к качеству электроэнергии, а также описана работа основных узлов разработанной структуры анализатора.

**Ключевые слова:** электроэнергия, показатель качества, временное перенапряжение, провал напряжения, микроконтроллер, карта памяти, wavelet-преобразование.

### MODERN ANALYSER OF TEMPORARY OVER-VOLTAGE AND VOLTAGE DEPRESSION PROCESSES

V.M. Vanko, M.V. Chorniy, T.V. Parfeniuk

Improved analyser of temporary over-voltage and voltage depression processes with the use of wavelet-transformation and structure forming technique with two-degree organization is proposed on the basis of known, electric energy quality index calculation algorithm with the widened interpretation of the gained information that enables us to form new normative requirements to electric energy quality is notified, and also analyses developed-structure main block's operation is described.

**Keywords:** electric energy, quality index, temporary over-voltage, voltage depression, microcontroller, memory map, wavelet-transformation.