

модування електромеханічних процесів. – Львів: Вид-во Держ. ун-ту “Львівська політехніка”, 1997. – С. 50–52. 6. Мак-Коннел А.Дж. Введение в тензорный анализ (с приложениями к геометрии, механике и физике). – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 411 с. 7. Норден А.П. Теория поверхностей. – М.: Гос. изд-во тех.-теорет. лит., 1956. – 260 с. 8. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия: Методы и приложения. – М.: Наука, 1986. – 760 с. 9. Повстенко Ю.З., Подстригач Я.С. Дифференцирование по времени тензоров, заданных на поверхности движущейся в трехмерном евклидовом пространстве // ПММ. – 1983. – Т. 47, вып. 6. – С. 1038–1045. 10. Парс Л.А. Аналитическая динамика. – М.: Наука, 1971. – 636 с. 11. Рашевский П.К. Риманова геометрия и тензорный анализ. – М.: Наука, 1964. – 665 с. 12. Райнишке. К. Модели надежности и чувствительности систем. – М.: Мир, 1979. – 449 с. 13. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении / Под ред. Е.Н. Розенвассера и Р.М. Юсупова. – М.: Энергия, 1971. – 344 с. 14. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. – М.: Сов. радио, 1973. – 200 с.

УДК 621.311.13

**В. Ванько**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронно-обчислювальних машин

## **ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС ПЕРЕБІГУ ПРОЦЕСІВ ЧАСОВИХ ПЕРЕНАПРУГ ТА ЗАПАДИН НАПРУГИ В МЕРЕЖАХ**

© Ванько В., 2006

**Наведено алгоритми визначення показників якості електроенергії під час проходження часових перенапруг і западин напруги в електричних мережах загального призначення з використанням перспективного математичного апарату – wavelet-перетворення, а також запропоновано узагальнену структуру засобу вимірювання переліку необхідних показників.**

**Algorithms of determination of electric energy quality indices of the passing of time voltage overstrains and depressions in the electrical networks of common use with the employment of a promising mathematical apparatus – wavelet-transformation and also the generalized structure of the necessary index enumeration measurement means.**

### **Вступ**

Під час виконання комутацій, регулівних та стабілізаційних заходів в структурах перетворення і розподілу електроенергії (ЕЕ) енергопостачальних організацій виникають швидкі процеси різкого погіршення її якості – так звані часові перенапруги та западини напруги [1].

Ці процеси становлять серйозну небезпеку як для основних об'єктів енергосистеми, так і стосовно широкого кола промислового і побутового устаткування різноманітного призначення. Причому, з точки зору надійності незадовільним вважають не лише збільшення напруги мережі відносно до номінального значення  $U_{ном}$ , але й її зменшення нижче від гранично допустимого рівня, що декларується відповідними вітчизняними і міжнародними нормативними документами [1, 2].

Отже, контроль і оцінка якості ЕЕ та постійне вдосконалення засобів вимірювання (ЗВ) її динамічних показників є важливими та актуальними проблемами.

### Обчислення показників часової перенапруги та западини напруги на основі wavelet-перетворення

За даними [1] негативні динамічні процеси – часові перенапруги та западин напруги, що з’являються в електричній мережі, характеризуються такими основними показниками якості (ПЯ) ЕЕ: коефіцієнтом часової перенапруги  $K_{пер.U}$  та глибиною западини напруги  $\delta U_3$ .

Виходячи з аналізу останніх наукових досліджень [3–5] з питань розроблення і вдосконалення ЗВ цих ПЯ ЕЕ та специфіки проходження останніх, можна зробити такі висновки. З розвитком сучасної мікроелектронної, вимірювальної і обчислювальної техніки з’ясувалося, що найефективнішим напрямом побудови даних ЗВ є застосування аналого-цифрового перетворення (АЦП) часової функції  $f_U(t)$  досліджуваної напруги мережі та новітніх математичних методів опрацювання інформації.

Для дослідження динамічної поведінки різних об’єктів та систем управління часто рекомендують як найоптимальніший використовувати спеціальний математичний апарат – wavelet-перетворення (ВВП) [6, 7].

У [8] підкреслено, що, беручи до уваги специфіку і властивості досліджуваної  $f_U(t)$ , найефективнішим шляхом для реалізації вимірювання наведених ПЯ ЕЕ є застосування неперервного чи дискретного ВВП. Причому, останній варіант треба вважати привабливішим для побудови портативних вимірювальних пристроїв.

На основі цього було запропоновано оригінальний спосіб виявлення та контролю вказаних негативних процесів за допомогою ВВП [5].

Його суть полягає в тому, що після АЦП над досліджуваним сигналом  $f_U(t)$ , тобто утворенням масиву кодів  $\{f_U(k)\}$ , здійснюється дискретне ВВП (ДВВП) у вигляді операцій декомпозиції на рівнях перетворення  $j = 1, 2, \dots, J$ .

У результаті цього на кожному  $j$ -му рівні отримують вектор з  $k_j$  деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів  $|d_{j,k_j}|$ , а на  $J$ -му – два вектори:  $|d_{J,k_J}|$  та апроксимуючих  $|a_{J,k_J}|$ , аналогічно як в [8].

При цьому особливістю процедури виявлення того чи іншого негативного процесу є два моменти. По-перше, це дослідження графіка вектора першого рівня перетворення  $|d_{1,k_1}|$  як функції часу та знаходження на ньому імпульсних відхилень значень коефіцієнтів від практично нульового значення. Появу останніх в певні проміжки часу сприймають як необхідну умову виникнення процесу.

Другим, достатнім моментом у фіксації початку і закінчення одного з названих процесів вважають обчислення поточних значень автокореляційної функції (АКФ) фрагментів  $f_U(t)$  за виділені інтервали вимірювання  $t_B$ , а також визначення проміжків часу, коли ці значення виходять за встановлені межі [5]. Тут варто брати до уваги ту особливість вибору діапазону рівнів ДВВП, котра полягає у практичній відсутності даних у векторі  $|d_{1,k_1}|$  стосовно енергії досліджуваного частотного спектра  $f_U(t)$ .

Отже, другою умовою виявлення негативних процесів буде додаткове фіксування здійснення нерівностей

$$\left\{ \frac{\left[ \sum_j \sum_{k_j} (d_{j,k_j})^2 + \sum_{k_J} (a_{J,k_J}^2) \right]}{N_{B\delta}} \right\}^{0.5} = \left\{ \frac{\left[ \sum_{k_1} [(d_{1,k_1})^2 + (a_{1,k_1})^2] \right]}{N_{B\delta}} \right\}^{0.5} > 1.1 \cdot \Phi_{ном}^{0.5} \quad (1)$$

для часової перенапруги та наступної – стосовно западини напруги

$$\left\{ \frac{\left[ \sum_j \sum_{k_j} (d_{j,k_j})^2 + \sum_{k_j} (a_{j,k_j}^2) \right]}{N_{B\phi}} \right\}^{0.5} = \left\{ \frac{\left[ \sum_{k_1} [(d_{1,k_1})^2 + (a_{1,k_1})^2] \right]}{N_{B\phi}} \right\}^{0.5} > 0.9 \cdot \Phi_{ном}^{0.5}, \quad (2)$$

де  $N_{B\phi}$  – сумарне число точок дискретизації за спеціально визначений інтервал часу вимірювання  $t_{B\phi}$  під час їхнього виявлення;  $\Phi_{ном}$  – номінальне значення АКФ, властиве для  $U_{ном}$  досліджуваної мережі.

Позитивною рисою запропонованого способу контролю є можливість застосування єдиного алгоритму виявлення обох процесів.

За допомогою описаної процедури виявлення негативних процесів також обчислюють часові параметри названих шкідливих процесів – тривалість  $t_{PZ\Sigma}$  та нумерують точки перебігу.

На основі отриманих значень векторів  $|d_{j,k_j}|$  і  $|a_{j,k_j}|$  розраховують наведені вище основні ПЯ ЕЕ.

При цьому за цим способом виявлення і контролю динамічних процесів  $K_{неpU}$  і  $\delta U_3$  пропонують трактувати двосторонньо, враховуючи особливості та суть wavelet-коефіцієнтів ДВВП.

Аналогічно, використовуючи вирази (1) і (2), ці ПЯ ЕЕ можна з високою достовірністю визначати за допомогою векторів першого рівня перетворення

$$K_{неpU} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_{\phi m}} \cdot \sum_{k_1} [(d_{1,k_1})^2 + (a_{1,k_1})^2]}}{\sqrt{\Phi_{ном}^U(0)}}, \quad (3)$$

$$\delta U_3 = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N_{\phi m}} \cdot \sum_{k_1} [(d_{1,k_1})^2 + (a_{1,k_1})^2]}}{\sqrt{\Phi_{ном}^U(0)}}, \quad (4)$$

причому  $N_{\phi m}$  міститься в частині інтервалу вимірювання ДВВП –  $t_{\phi m} = T_{\phi j} \cdot \langle t_B, T_{\phi j} \rangle$  – поточний період повторення  $f_U(t)$ .

Завдяки цьому одночасно здійснюється вимірювання  $t_{PZ\Sigma}$  та обчислення  $K_{неpU}$  і  $\delta U_3$ . Крім того, подальше виконання багаторівневої декомпозиції  $\{f_U(k)\}$  за цим способом призводить до отримання матриці коефіцієнтів ДВВП, котра надає повнішу інформацію про перебіг того чи іншого шкідливого динамічного процесу, а саме:

- спектральний склад та його зміну в часі протягом вибраного інтервалу спостереження  $t_B$  у вигляді послідовностей значень  $K_{неpU}$  і  $\delta U_3$  з відрізків  $t_{\phi m}$  аналізу;
- дані зазначених ПЯ ЕЕ з сукупності інтервалів  $t_B$  дослідження виявленого процесу чи декількох його проявів;
- динамічні зміни і відхилення форми досліджуваної  $f_U(t)$  під час проходження обох фаз даних процесів, котрі відображаються як короткі імпульси на графіках векторів коефіцієнтів рівнів ДВВП.

Отже, узагальнено вирази (3) і (4) можна подати як

$$K_{пер.U} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^J \sum_{k_j} (d_{j,k_j})^2 + \sum_{k_J} (a_{J,k_J})^2}}{\sqrt{\Phi_{ном}^U(0) N_{вм}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_{вм}} \cdot \left( E_{j.ном} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_{ном}}}^J E_j \right)}}{\sqrt{\Phi_{ном}^U(0) N_{вм}}}, \quad (5)$$

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

$$\delta U_3 = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^J \sum_{k_j} (d_{j,k_j})^2 + \sum_{k_J} (a_{J,k_J})^2}}{\sqrt{\Phi_{ном}^U(0) N_{вм}}} = 1 - \frac{\sqrt{\left( E_{j.ном} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_{ном}}}^J E_j \right)}}{\sqrt{\Phi_{ном}^U(0) N_{вм}}}, \quad (6)$$

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

де  $E_j, E_{j.ном}$  – відповідно, енергії на  $j$ -му рівні перетворення та на рівні  $j_{ном}$ , частотний діапазон якого містить в себе промислову частоту.

Отже, за результатами обчислення у випадку часової перенапруги  $K_{пер.U}$  є геометричною сумою часткових коефіцієнтів гармонічних складових  $(K_{nU})_j$   $j$ -х та  $(K_{nU})_{j.ном}$   $j_{ном}$ -го рівнів ДВВП, котрі також можна трактувати як часткові коефіцієнти перенапруг стосовно певних частотних смуг  $f_U(t)$ .

Аналогічно при западині напруги вираз (6) подаємо у вигляді сукупності параметрів  $(K_{nU})_j$ , що характеризують масив  $\delta U_3$ , котрий описує особливості перебігу цього процесу та спектральний склад досліджуваної  $f_U(t)$ .

За даними [5, 9] важливою характеристикою, яка визначає поведінку в часі СКЗ та інтегральних значень  $f_U(t)$  на момент проходження процесів часової перенапруги та западини напруги, є швидкість зміни напруги в часі.

При цьому зупинимося на двох ПЯ ЕЕ, котрі описують цю властивість, тобто: швидкості зміни СКЗ напруги  $(s_{UPZ})_{ск}$  між сусідніми періодами  $T_{f1}$  і  $T_{f2}$  (або інтервалами  $t_{B1}$  і  $t_{B2}$ ) сигналу  $f_U(t)$  та короткотривалій інтервальної швидкості зміни напруги  $(s_{UPZ})_r$ . Виходячи з реальних завдань забезпечення якості ЕЕ, застосуємо два види останнього ПЯ, для яких вибираємо часові інтервали вимірювання –  $(t_{вм})_{sU1} = T_f/2$  і  $(t_{вм})_{sU2} = T_f/4$ .

Беручи до уваги специфіку  $f_U(t)$ , визначаємо  $(s_{UPZ})_{ск}$  як відхилення сусідніх  $l$ -го та  $l-1$ -го значень АКФ (СКЗ для періодичного сигналу), знайдених за час аналізу  $t_B$ , тобто [5]

$$(s_{UPZ})_{ck} = \frac{\sqrt{\left[ \sum_{(k_1)_{T_j}} [(d_{1,k_1})^2 + (a_{1,k_1})^2] \right]_l} - \sqrt{\left[ \sum_{(k_1)_{T_{j-1}}} [(d_{1,k_1})^2 + (a_{1,k_1})^2] \right]_{l-1}}}{T_j \cdot \sqrt{N_{\text{вм}}}}. \quad (7)$$

Стосовно іншого ПЯ ЕЕ –  $(s_{UPZ})_r$ , то в цьому випадку використовують ту обставину, що при організації (5) і (6) формується і обчислюється  $t_B$ . Тому надалі можна порівняно просто знайти  $(t_{\text{вм}})_{sU1}$  та  $(t_{\text{вм}})_{sU2}$ . Звідси отримуємо

$$(s_{UPZ})_r = \frac{\sqrt{\left[ \sum_{(k_1)_{(\text{вм}-sU)}} [(d_{1,k_1})^2 + (a_{1,k_1})^2] \right]_r} - \sqrt{\left[ \sum_{(k_1)_{(\text{вм}-sU)-1}} [(d_{1,k_1})^2 + (a_{1,k_1})^2] \right]_{r-1}}}{(t_{\text{вм}})_{sU}^{3/2}}. \quad (8)$$

Проте, ці ПЯ ЕЕ дають лише узагальнену картину про динаміку досліджуваних процесів. У разі потреби детальнішого аналізу вираз (7) можна подати у вигляді матриці

$$[(s_{Un})_{r-PZ}]_{\Sigma} = \begin{vmatrix} [(s_{Un})_{r-PZ}]_{1,1} \cdots [(s_{Un})_{r-PZ}]_{n_B,1} \cdots [(s_{Un})_{r-PZ}]_{(n_B)_{\max}-1,1} \\ \cdots \cdots \cdots \\ [(s_{Un})_{r-PZ}]_{1,j_{cm}} \cdots [(s_{Un})_{r-PZ}]_{n_B,j_{cm}} \cdots [(s_{Un})_{r-PZ}]_{(n_B)_{\max}-1,j_{cm}} \\ [(s_{Un})_{r-PZ}]_{1,j} \cdots [(s_{Un})_{r-PZ}]_{n_B,j} \cdots [(s_{Un})_{r-PZ}]_{(n_B)_{\max}-1,j} \\ \cdots \cdots \cdots \\ [(s_{Un})_{r-PZ}]_{1,J} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

де кожна одинична інтервальна швидкість зміни напруги  $j$ -го рівня

$$[(s_{Un})_{r-PZ}]_{n_B,j} = \frac{\sqrt{\frac{1}{P_N} \cdot \sum_{p_j} (\Delta d_{jp_j}^2)_{n_B,j+1}} - \sqrt{\frac{1}{P_N} \cdot \sum_{p_j} (\Delta d_{jp_j}^2)_{n_B,j}}}{(\Delta t_{dr-PZ})_j}, \quad (10)$$

де  $n_{B,j} = 1, 2, \dots, (n_{B,j})_{\max}$  – поточний номер одного з рівномірних в часі інтервалів вимірювання,

кожен з яких має тривалість  $t_{\text{вм}} = (1 \dots 2)T_f$ , а  $(n_{B,j})_{\max} = \frac{t_B}{t_{\text{вм}}}$ , причому з вектора  $\{f_U(k)\}$

вибираються кількості точок дискретизації  $P_N = \frac{N_B}{n_{B,1}}$ .

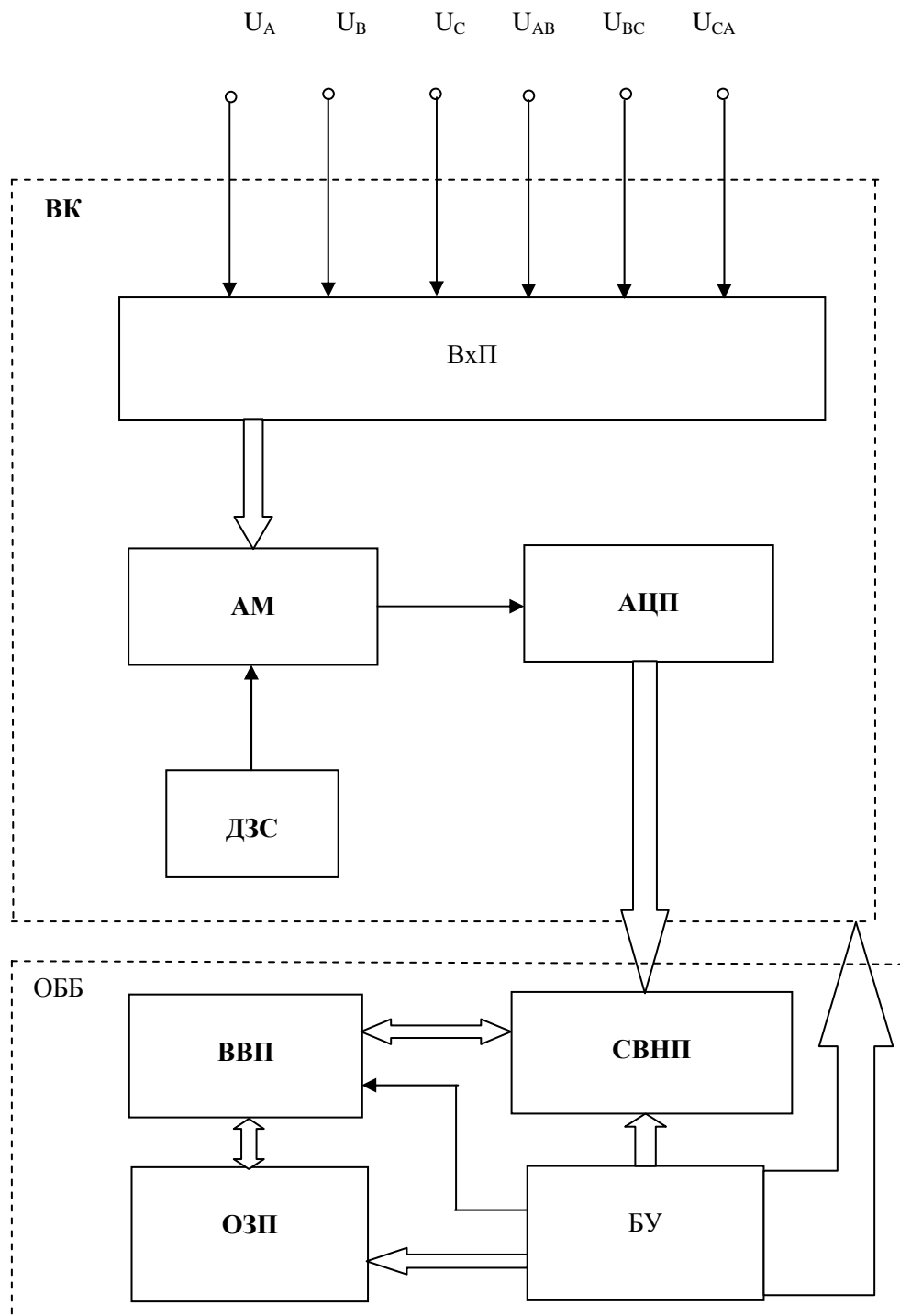
Звідси обидва види цього ПЯ ЕЕ визначають за одним виразом у вигляді зміни усереднених за вказаний  $(t_{\text{вм}})_{sU} = (t_{\text{вм}})_{sU1} \vee (t_{\text{вм}})_{sU2}$  значень енергії  $f_U(t)$ .

### Структура засобу вимірювання показників часової перенапруги та западини напруги

На основі запропонованого способу виявлення, вимірювання та контролю часових перепадів і западин напруги розроблено структуру ЗВ наведених динамічних ПЯ ЕЕ з використанням вказаних вище алгоритмів.

Відповідно до рисунка цей ЗВ містить дві частини: вимірювальний канал ВК, що складається з вхідного перетворювача ВхП, амплітудного мультиплексора АМ, АЦП і джерела зразкових

сигналів ДЗС, а також обчислювальний блок ОББ – із схеми виявлення негативних процесів СВНП, вузла ВВП, оперативного запам'ятовувального пристрою ОЗП і блока управління БУ.



*Структура засобу вимірювання часової перенапруги та западини напруги*

Досліджувані трифазні напруги  $U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  попередньо нормуються в системі ВхП, потім дискретизуються в АМ та послідовно в часі перетворюються в АЦП на потоки цифрових кодів.

Надалі за допомогою СВНП і ВВП одночасно проводиться пошук процесів часових перенапруг і западин напруги за наведеною процедурою, а також – згідно з (3)–(10) розрахунки динамічних ПЯ ЕЕ:  $K_{перУ}$ ,  $\delta U_z$ ,  $t_{PZ\Sigma}$ ,  $(s_{UPZ})_{ск}$  і  $(s_{UPZ})_r$ .

Специфічною особливістю даного ЗВ є застосування однокристальних мікроконтролерів для реалізації вузлів СВНП та ВВП. Причому, завдяки наявності ОЗП зберігається отриманий масив цифрової інформації після АЦП. Надалі з цими даними можна здійснювати різні варіанти неперервного чи дискретного ВВП безпосередньо у розробленому ЗВ або в допоміжному персональному комп'ютері, що забезпечить всебічний і повний аналіз перебігу виявлених негативних процесів у досліджуваній мережі.

За допомогою БУ виконується весь перелік управлінських і сервісних функцій у ЗВ, виділення інтервалів вимірювання  $t_B$  і  $t_{вм}$  та синхронізація роботи основних вузлів, їх програмних частин, а також відображення результатів проведених обчислень.

Крім того, в ЗВ передбачено додаткове опрацювання зразкових сигналів від ДЗС, що забезпечує корекцію основних похибок вимірювання.

### Висновки

Проаналізовано ефективний спосіб виявлення, вимірювання та контролю показників якості часових перенапруг та западин напруги, завдяки якому можна забезпечити максимальну і різнобічну інформацію щодо проходження цих процесів в електричних мережах загального призначення. При цьому наведено алгоритми для обчислення як основних, так і додаткових ПЯ ЕЕ, які надають нові можливості для оцінки та підвищення якості ЕЕ. На основі цього розроблено сучасну структуру ЗВ наведеного переліку показників.

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с. 3. Ванько В.М. До питання виявлення і контролю часових перенапруг та западин напруги в електричних мережах загального призначення // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 500. – С. 31–36. 4. Ванько В.М. Аналіз точності виявлення часових перенапруг та западин напруги в електричних мережах // Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвідом. наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 65. – С. 45–54. 5. Ванько В.М. Спосіб виявлення та вимірювання часових перенапруг та западин напруги в електричних мережах // Вісн. Львів. Держ. аграрного ун-ту. – 2006. – № 10. – С. 514–523. 6. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с. 7. Białasiewicz J.T. Falki i aproksymacje. – Warszawa: Wydawnictwo Nauk.-Techn., 2004. – 253 s. 8. Ванько В.М. Вимірювання показників якості електроенергії на основі дискретного wavelet-перетворення // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2006. – № 551. – С. 13–19. 9. Ванько В.М. Дослідження явищ часової перенапруги та западини напруги в електричних мережах загального призначення // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 521. – С. 206–210.