

## ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Стаття присвячена питанню застосування інструментів вейвлет-перетворення для визначення та оцінки показників якості електричної енергії. Визначено недоліки застосування перетворення Фур'є для проведення гармонійного аналізу сигналу напруги. Проведено аналіз існуючих методів обробки сигналів, визначено їх недоліки при проведенні аналізу сигналу напруги. Представлено основні положення та переваги застосування вейвлет-перетворення для проведення гармонійного аналізу напруги перед іншими методами, зокрема перетворенням Фур'є. Проаналізовано результати досліджень з питання застосування вейвлет-перетворення для визначення параметрів якості електричної енергії. Надано рекомендації щодо можливості та переваги у застосуванні вейвлет-перетворення перед іншими методами при проведенні визначення та аналізу параметрів якості електроенергії. Рекомендовано в інженерній практиці, зокрема при застосуванні положень Методики для проведення вимірювань якості електричної енергії, застосовувати саме вейвлет-перетворення для проведення гармонійного аналізу напруги.

**Ключові слова:** гармонійний аналіз, перетворення Фур'є, частотно-часове представлення сигналу, пакетне вейвлет-перетворення.

### Вступ

Проблема забезпечення якості електричної енергії (ЯЕЕ) набрала за останнє десятиліття особливу актуальність в усіх розвинутих країнах світу. Численні дослідження режимних параметрів в електричних мережах України свідчать, що основні параметри якості електричної енергії (ПЯЕЕ) не тільки не відповідають нормам ГОСТ 13109-97, але й не забезпечують безпеку сталого режиму електропостачання. За експертними оцінками спеціалістів прогнозований збиток від зниження ПЯЕЕ загалом в країні становить близько 10 млрд. грн. щорічно.

В останні роки питанню забезпечення якості електроенергії в Україні приділяється все більше уваги. Зокрема розроблено керівні документи з питань проведення вимірювань параметрів якості електричної енергії в системах електропостачання та розподілу відповідальності за недотримання ПЯЕЕ.

Слід відзначити, що «Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення» (далі – Методика) [1] регламентує проведення гармонійного аналізу сигналу напруги з використанням алгоритму перетворення Фур'є (ПФ), як це було визначено в ГОСТ 13109-97, а також міжнародними стандартами ІЕС 61000-4-7:2002 та ІЕС 61000-4-30:2008.

Методикою також передбачена можливість застосування інших методів проведення гармонійного аналізу сигналу напруги для визначення гармонійних складових, зокрема застосування вейвлет-перетворення.

В даній статті розглянемо методи проведення гармонійного аналізу та визначимо найбільш прийнятний метод з огляду на особливості аналізу сигналу напруги з метою вдосконалення математичної бази розрахунку ПЯЕЕ.

### Основна частина

Як було зазначено, на сьогоднішній день Методика регламентує для проведення гармонійного аналізу сигналу напруги використовувати перетворення Фур'є. Проведення гармонійного аналізу з використанням перетворення Фур'є базується на тому, що будь-яку функцію  $S(t)$  можна представити у вигляді суми гармонійних складових з різними амплітудами та частотою:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + a_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n\omega t), \quad (1)$$

де  $n$  – порядок гармоніки;

$\omega$  – частота основної гармоніки;

$a_i, b_i$  – коефіцієнти ряду (коефіцієнти Фур'є).

Амплітуди гармонійних складових при цьому можна розрахувати наступним чином:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} S(t) \cdot \cos(n\omega t) dt. \quad (2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} S(t) \cdot \sin(n\omega t) dt. \quad (3)$$

Однак алгоритм перетворення Фур'є має деякі недоліки, які впливають на точність проведення гармонійного аналізу та визначення гармонійних складових сигналу. Зокрема ПФ надає інформацію про присутні частоти в сигналі, однак при нестационарному сигналі не має можливості отримати інформацію, в який момент часу виникла та чи інша частота і коли вона закінчилася.

У разі нестационарного сигналу для ПФ періодом розрахунку є весь період проведення дослідження. Так при двох різних сигналах з однаковими спектральними характеристиками (наприклад один – стаціонарний, другий – нестационарний при тих же значеннях частот) ПФ буде однаковим. Окрім цього при наявності кількох сигналів з близькими частотами не має можливості виділити ці сигнали в окремі.

Таким чином застосування ПФ для нестационарних сигналів, яким є сигнал напруги, є неефективним. ПФ може застосовуватися для нестационарних сигналів якщо нас цікавить лише частотна інформація, а час існування спектральних складових неважливий.

Для вирішення зазначених недоліків при проведенні аналізу частотних характеристик сигналу можна використовувати віконне перетворення Фур'є (ВПФ). Його суть полягає в тому, що нестационарний сигнал можна представити у вигляді частково-стаціонарного. При цьому сигнал ділиться на певні відрізки («вікна») визначеної довжини  $T$ , в межах яких його можна рахувати стаціонарним.

Даний метод дає нам не лише частотне представлення сигналу як при ПФ, а й певне часове представлення. Однак даний метод також має свої недоліки. Проблеми ВПФ мають свою основу в такому явищі, як принцип невизначеності Гейзенберга. Даний принцип при застосуванні до частотно-часового представлення сигналу говорить, що не можна отримати довільно точне частотно-часове представлення сигналу, тобто не можна визначити, для якого моменту часу які спектральні компоненти присутні в сигналі. Єдине, що ми можемо знати, так це часові інтервали, протягом яких в сигналі існують смуги частот. Ця проблема називається проблемою розподільчої здатності.

Проблема ВПФ пов'язана з шириною віконної функції, яка застосовується. Ця ширина називається носієм функції. При застосуванні ПФ часова інформація про сигнал відсутня. При ВПФ вікно має кінцеву довжину, яка накриває лише частину сигналу, тому частотне представлення погіршується. Вузьке вікно забезпечує краще часове представлення, а більш широке – частотне. Проблема в тому, що необхідно вибрати одну ширину вікна для всього інтервалу існування сигналу, тоді як різні його відрізки можуть потребувати застосування вікон різної довжини.

В сучасній практиці для проведення оцінки гармонійного складу сигналів існує широке різноманіття методів: перетворення Гілберта, розподіл Вігнера, перетворення Уолша, вейвлет перетворення та ін.

Перетворення Гілберта базується на тому принципі, що будь-який довільний сигнал можна розглядати у вигляді суми коливальних процесів, які задовольняють умові симетричності і накладених на тренд довільної форми. В цьому випадку правомірна задача розкладу довільного сигналу на складові компоненти та залишковий тренд.

Перетворення Гілберта-Хуанга являється методом розкладу нелінійного і нестационарного сигналу на набір монокомпонентних складових, кожна з яких описує окремий процес, з подальшим аналізом часово-частотного розподілу цих складових за допомогою перетворення Гілберта.

Таким чином можна констатувати, що для простих гармонійних сигналів фізично значима миттєва частота може бути визначена лише для функцій локально симетричних відносно нульового середнього рівня.

Будь-яку функцію і будь-який довільний сигнал, які мають довільну послідовність локальних екстремумів (мінімум 2), можна розкласти на сімейство функцій IMFs і залишковий тренд. Якщо в сигналі відсутні екстремуми, але є точки перегину, то для визначення екстремумів може бути проведено диференціювання сигналу.

Після виконання перетворення Гілберта на кожній компоненті IMF початкові дані  $x(t)$  можуть бути виражені як дійсна частина комплексної форми в наступному вигляді:

$$x(t) = RE[\sum_{j=1}^n a_j(t) \cdot \exp[i\int \omega_j(t) dt]] \quad (4)$$

На відміну від перетворення Фур'є, тут і амплітуда  $a_j(t)$ , і миттєва частота  $\omega_j(t)$  є функціями часу.

Розподіл Вігнера забезпечує широку розподільчу здатність по частоті і за часом для монокомпонентних сигналів. Однак, якщо сигнал складається з кількох компонент, з'являється додаткова інтерференція або крос-компоненти (відбувається спотворення або накладення компонент сигналу). В дискретній формі розподіл Вігнера виражається наступним чином:

$$WD(t, \omega) = 2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(t + \tau_k) x(t - \tau_k) \exp(-j2\omega \tau_k) \quad (5)$$

Слід також звернути увагу на необхідність знати значення сигналу в моменти  $t + \tau_k$  і  $t - \tau_k$ , що призводить до можливості застосування розподілу Вігнера лише для сигналів з рівномірною дискретизацією. Більш того, щоб запобігти спотворенням через частотний елайзинг (накладення частотних компонент, яке призводить до спотворення сигналу), частота дискретизації сигналу повинна бути вдвоє більшою ніж за критерієм Найквіста для дійсного сигналу [4].

Відомі також інші методи проведення гармонійного аналізу, зокрема перетворення Уолша [5], метод найменших квадратів [6], метод Проні [7,8], метод статистичного аналізу [9, 10].

Для того, щоб запобігти недолікам крос-компонент при розподілі Вігнера і обмеження по розподільчій здатності при ПФ, може бути застосовано вейвлет перетворення.

Вейвлет-аналіз на сьогодні є однією з найбільш перспективних технологій аналізу даних. Він забезпечує вибір вікна змінного розміру, що на відміну від застосування ВПФ дає нам можливість розглядати сигнал при різній ширині вікна. При використанні великих часових інтервалів отримуємо більш точну інформацію про низьку частоту, а при більш коротких інтервалах – більш точну інформацію про високочастотний спектр [14].

Вейвлет-аналіз дозволяє виявити такі особливості даних, які ігнорують інші методи аналізу сигналів, зокрема точки розриву та різкі нелінійності, що є типовим саме для сигналу напруги.

При проведенні вейвлет-перетворення використовуються спеціальні функції апроксимації, які називаються материнським вейвлетом. Вейвлет – це функція з нульовим середнім значенням:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0.$$

Найбільш поширеними материнськими вейвлетами, які на практиці використовуються для аналізу сигналу напруги є вейвети Хаара, Морле та Добеши [12].

Найбільш простий приклад дискретного вейвлета – це вейвлет Хаара. Недоліком його є несиметричність форми і недостатня гладкість. Серед комплексних вейвлетів найчастіше використовується базис, оснований на добре локалізованому і в часовому і в частотному представленні

вейвлеті Морле  $\psi_t = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$ . Характерний параметр  $\omega_0$  дозволяє змінювати вибірковість базису.

Однак більшість типів вейвлетів не мають аналітичного задання у вигляді однієї формули, а задаються ітераційними виразами, які легко обраховуються комп'ютерами. Прикладом таких вейвлетів є функція Добеши. Для обробки сигналу напруги зокрема використовуються такі вейвети Добеши як db2, db9 й інші.

Аналогічно до перетворення Фур'є пряме вейвлет перетворення визначається як сума по всій тривалості сигналу, помноженого на масштабовані, здвигнуті версії вейвлет-функції:

$$WT(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \cdot \psi\left(\frac{t - \tau}{a}\right) dt, \quad (6)$$

де  $\tau$  – коефіцієнт масштабу або параметр розширення;

$a$  – параметр зсуву або шаг зсуву.

При проведенні вейвлет-перетворення можна використовувати алгоритм Мала (рис.1), або пакетне вейвлет-перетворення (рис.2). При переході з нульового рівня (вихідний сигнал) на 1 рівень декомпозиції сигналу вхідна функція  $x(t)$  за допомогою низькочастотного фільтру (НЧФ) та високочастотного фільтру (ВЧФ) розкладається на частотні смуги, які характеризуються коефіцієнтами апроксимації та деталізації. При переході з 1 рівня на 2 і т.д. при використанні алгоритму Мала коефіцієнти апроксимації в свою чергу розділяються за допомогою фільтрів на коефіцієнти низькочастотні (апроксимації) та високочастотні (деталізації).

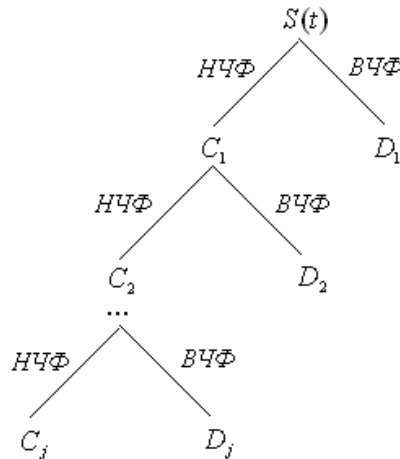


Рис.1 Дерево декомпозиції при застосуванні алгоритму Мала

За даним алгоритмом можна визначати середньоквадратичні величини струму, напруги і потужності, що обумовлює використання даного методу для аналізу та зберігання інформації наприклад про графік навантаження. Однак даний алгоритм не дозволяє визначити середньоквадратичні значення струмів, напруг та потужностей окремих гармонійних компонент. Тому для проведення гармонійного аналізу сигналу напруги застосовується пакетне вейвлет-перетворення (ПВП), при якому, на відміну від алгоритму Мала, на всіх рівнях відбувається декомпозиція як низькочастотних коефіцієнтів вейвлет-перетворення, так і високочастотних коефіцієнтів [12].

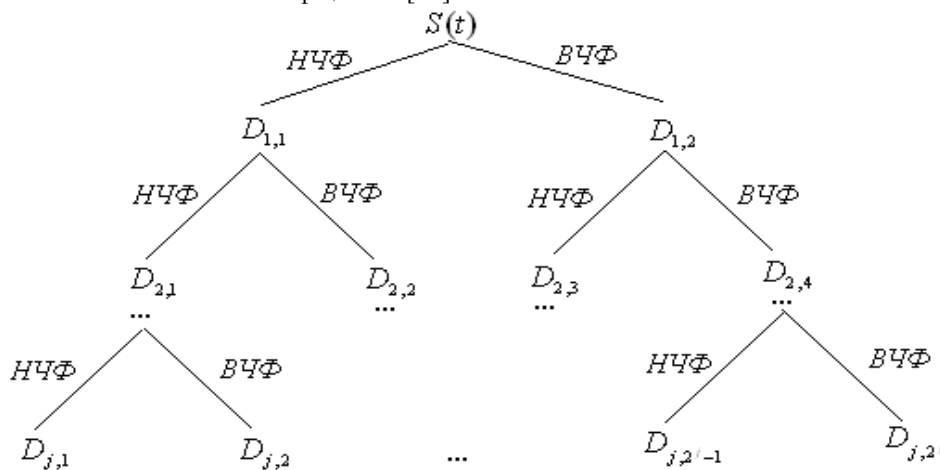


Рис.2 Дерево декомпозиції при пакетному вейвлет-перетворенні

Після проведення ПВП та розрахунку коефіцієнтів вейвлет-перетворення на всіх рівнях деталізації сигналу, можна розрахувати середньоквадратичні значення гармонійних груп сигналу за допомогою відповідних коефіцієнтів вейвлет-перетворення [12].

Сумарний коефіцієнт гармонійних складових (THD) згідно з ІЕС 61000-4-7-2002 розраховується як відношення середньоквадратичного значення суми всіх гармонійних складових ( $U_{H,h}$ ) до середньоквадратичного значення основної складової ( $U_{H,1}$ ). Сумарний коефіцієнт гармонійних груп (THDG) розраховується як відношення середньоквадратичного значення гармонійних груп ( $U_{g,h}$ ) до середньоквадратичного значення гармонійної групи основної частоти ( $U_{g,1}$ ). Сумарний коефіцієнт гармонійних підгруп (THDS) розраховується як відношення середньоквадратичного значення гармонійних підгруп ( $U_{sg,h}$ ) до середньоквадратичного значення гармонійної підгрупи, пов'язаною з основною складовою ( $U_{sg,1}$ ) [13]:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} \left(\frac{U_{H,h}}{U_{H,1}}\right)^2}, \tag{7}$$

$$THDG = \sqrt{\sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \left(\frac{U_{g,h}}{U_{g,1}}\right)^2}, \quad (8)$$

$$THDS = \sqrt{\sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \left(\frac{U_{sg,h}}{U_{sg,1}}\right)^2}, \quad (9)$$

де  $h$  – порядок гармонійної складової:  $h_{\min} \geq 2$ ,  $h_{\max} = 40$  [2].

Виконання гармонійного аналізу сигналу напруги з використанням вейвлет-перетворення дозволяє нам стверджувати, що при стаціонарному сигналі напруги ПФ дає близьку до вейвлет-перетворення точність розрахунку гармонійних складових сигналу. Однак при нестационарних сигналах та присутніх шумах застосування вейвлет-перетворення дає менші похибки при визначенні гармонійних складових ніж застосування ПФ [11, 13].

#### Висновки

1. При нестационарних сигналах напруги застосування вейвлет-перетворення для визначення гармонійних складових сигналу є більш точним ніж застосування перетворення Фур'є.
2. Застосування вейвлет-перетворення дає можливість використовувати методи очистки сигналу від шуму.
3. Алгоритм вейвлет-перетворення дає можливість створення системи моніторингу параметрів якості електричної енергії, шляхом контролю коефіцієнтів деталізації на різних рівнях декомпозиції сигналу напруги.
4. В подальшій інженерній практиці, зокрема при застосуванні положень Методики для проведення вимірювань якості електричної енергії, рекомендуємо застосовувати вейвлет-перетворення для проведення гармонійного аналізу сигналу напруги.

#### Література

1. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55:2011 «Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. Загальні положення».
2. ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЭК 61000-4-7:2002) Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств.
3. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.
4. М. Грейтанс Усовершенствованная обработка неравномерно дискретизированных нестационарных сигналов. Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. – №3(59). – С. 42–45.
5. Залмазон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1989. – 496 с.
6. Kung S.Y., Arun K.S., Bhaskar Rao D.V. State-space and Singular-value Decomposition-based Approximation Methods for the Harmonic Retrieval Problem // JOSA. – 1983. – Vol. 73 Issue 12. – P. 1799-1811.
7. Захаров И.П. Исследование погрешностей идентификации переходных характеристик аperiodических измерительных преобразователей методом Прони // И.П. Захаров, М.П. Сергиенко // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – №1 (26). – С.44-47.
8. Захаров И.П. Идентификация переходных характеристик средств измерительной техники методом наименьших квадратов Прони // И.П. Захаров, М.П. Сергиенко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Х., 2007. – Вип. 2 (14). – С. 142-145.
9. Stoica P. List of References on Spectral Line Analysis // Signal Processing. – 1993. Vol. 31, Issue 3. – P. 329-340.
10. Cameron M.M. Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1993. – Vol. 29. Issue 1. – P. 60-65.
11. Barros J., Diego R.J. Application of the Wavelet-Packet Transform to the Estimation of Harmonic Groups in Current and Voltage Waveforms // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2006. Vol. 21, №1. – P.533-535.
12. Волошко А.В. Выполнение гармонического анализа с помощью вейвлет-преобразования. Электронное моделирование. 2012. Т.34 №4. С. 65-78.
13. Effrina Yanti Hamid, Zen-Ichiro Kawasaki Instrument for the Quality Analysis of Power Systems Based on the Wavelet Packet Transform // IEEE Power Engineering Review. – March 2002. P. 52-54.
14. Robi Polikar The wavelet tutorial. The Engineer's ultimate guide to wavelet analysis.

**APPLICATION OF WAVELET TRANSFORM TO IDENTIFY AND EVALUATE THE POWER QUALITY INDEXES**

The article focuses on the application of wavelet transform tools for measuring and evaluating power quality. Identified faults of application of the Fourier transform for the harmonic analysis of the signal voltage. However, some deficiencies can be addressed using windowed Fourier transform, but this method has a problem in the phenomenon of the Heisenberg uncertainty principle. Additionally considered such methods of signal processing, the Gilbert transform, the Wigner distribution, the Walsh transform. An analysis of existing methods of signal processing, to determine their defects in analyzing voltage signal. Submitted the fundamentals and advantages of the wavelet transform for voltage harmonic analysis over other methods, including Fourier transform. Results of the studies on the application of wavelet transform to determine the parameters of power quality. The recommendations on the features and advantages of the application of the wavelet transform over other methods in conducting the identification and analysis of power quality parameters. The procedure to calculate the RMS values of the harmonic signal group based on the relevant coefficients of the wavelet transform. Recommended in the engineering practice, particularly in the application of Techniques for measuring the quality of electricity is applied wavelet transform for harmonic analysis of voltage.

**Key words:** harmonic analysis, Fourier transform, time-frequency representation of the signal, packet wavelet-transform.

1.SOU-N EE 40.1-37471933-55:2011 «Metodyka vymirjuvannja jakosti elektrychnoi' energii' v systemah elektropostachannja zagal'nogo pryznachennja. Zagal'ni polozhennja».

2.GOST R 51317.4.7-2008 (MJeK 61000-4-7:2002) Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Obshehe rukovodstvo po sredstvam izmerenij garmonik i intergarmonik dlja sistem jelektrosnabzhenija i podkljuhaemyh k nim tehniceskikh sredstv.

3.GOST R 51317.4.30-2008 (MJeK 61000-4-30:2008) Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Metody izmerenij pokazatelej kachestva jelektricheskoi' jenergii.

4.M. Grejtans Uovershenstvovannaja obrabotka neravnomerno diskretizirovannyh nestacionarnyh signalov. Jelektronika i jelektrotehnika. – Kaunas: Tehnologija, 2005. – №3(59). – S. 42–45.

5.Zalmazov L.A. Preobrazovanie Fur'e, Uolsha, Haara i ih primenenie v upravlenii, svjazi i drugih oblastjah. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.- mat. lit., 1989. – 496 s.

6.Kung S.Y., Arun K.S., Bhaskar Rao D.V. State-space and Singular-value Decomposition-based Approximation Methods for the Harmonic Retrieval Problem // JOSA. – 1983. – Vol. 73 Issue 12. – P. 1799-1811.

7.Zaharov I.P. Issledovanie pogreshnostej identifikacii perehodnyh harakteristik aperiodicheskikh izmeritel'nyh preobrazovatelej metodom Proni // I.P. Zaharov, M.P. Sergienko // Radiojelektronika i informatika. – 2004. – №1 (26). – S.44-47.

8.Zaharov I.P. Identifikacija perehodnyh harakteristik sredstv izmeritel'noj tehniki metodom naimen'shij kvadratov Proni // I.P. Zaharov, M.P. Sergienko // Zbirnik naukovih prac' 9.Harkiv'skogo universitetu Povitrjanih Sil im. I. Kozheduba. – Kh., 2007. – Vip. 2 (14). – S. 142-145.

10.Stoica P. List of References on Spectral Line Analysis // Signal Processing. – 1993. Vol. 31, Issue 3. – P. 329-340.

11.Cameron M.M. Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1993. – Vol. 29. Issue 1. – P. 60-65.

12.Barros J., Diego R.J. Application of the Wavelet-Packet Transform to the Estimation of Harmonic Groups in Current and Voltage Waveforms // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2006. Vol. 21, №1. – P.533-535.

13.Voloshko A.V. Vypolnenie garmonicheskogo analiza s pomoshh'ju vejvlet-preobrazovanija. Jelektronnoe modelirovanie. 2012. T.34 №4. S. 65-78.

Effrina Yanti Hamid, Zen-Ichiro Kawasaki Instrument for the Quality Analysis of Power Systems Based on the Wavelet Packet Transform // IEEE Power Engineering Review. – March 2002. P. 52-54.

14.Robi Polikar The wavelet tutorial. The Engineer's ultimate guide to wavelet analysis.

УДК 621.317.1

А.В. ВОЛОШКО, А.Л. ХАРЧУК

**К ПРИМЕНЕНИЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Статья посвящена вопросу применения инструментов вейвлет-преобразования для определения и оценки показателей качества электрической энергии. Определены недостатки применения преобразования Фурье для проведения гармонического анализа сигнала напряжения. Проведен анализ существующих методов обработки сигналов, определены их недостатки при проведении анализа сигнала

напряжения. Представлены основные положения и преимущества применения вейвлет-преобразования для проведения гармонического анализа напряжения перед другими методами, в частности преобразованием Фурье. Проанализированы результаты исследований по вопросу применения вейвлет-преобразования для определения параметров качества электрической энергии. Даны рекомендации по возможности и преимущества в применении вейвлет-преобразования перед другими методами при проведении определения и анализа параметров качества электроэнергии. Рекомендовано в инженерной практике, в частности при применении положений Методики для проведения измерений качества электроэнергии, применять именно вейвлет-преобразования для проведения гармонического анализа напряжения.

**Ключевые слова:** гармонический анализ, преобразование Фурье, частотно-временное представление сигнала, пакетное вейвлет-преобразование.

УДК 62-83-52.003(082)

О.М. ЗАКЛАДНИЙ, О.О. ЗАКЛАДНИЙ, В.О. БРОНИЦЬКИЙ, Д.Ю. МОГИЛАТ

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ЕЛЕКТРОНАВАНТАЖУВАЧА

Проведено порівняльний аналіз електроприводів електронавантажувачів з різними типами електродвигунів (постійного струму, асинхронним, синхронним з постійними магнітами). Показано, що за масо-габаритними показниками та ККД найбільш перспективним є електропривод з синхронним двигуном з постійними магнітами. Проаналізовано способи керування вентильним двигуном та вибрано енергоефективний, який полягає в підтриманні сталої величини кута запасу  $\delta$  перетворювача на мінімальному рівні. За допомогою двох моделей досліджено електропривод за схемою вентильного двигуна у середовищі MATLAB та встановлено кращу за високими динамічними та енергетичними показниками - з ПІ-регулятором швидкості з нечіткою логікою.

**Ключові слова:** вентильний двигун, енергоефективність, електропривод, електронавантажувач, нечітка логіка.

**Вступ.** Вибір того або іншого тягового електродвигуна електронавантажувача, насамперед, залежить від галузі застосування і технологічних вимог, що ставляться до нього. Електропривод повинен забезпечувати: високий рівень енергоефективності з урахуванням скінченної ємності акумуляторної батареї (АКБ); легкість керування; рекуперативне гальмування (повернення енергії до АКБ) та реверс; високий момент у робочому діапазоні частот обертання; надійність та зручність обслуговування. Експлуатація електропривода електронавантажувача с низькою енергоефективністю призводить до зростання електроспоживання, зменшення часу роботи від Li-ion АКБ і відповідно - зниження продуктивності.

Механічні та комутаційні обмеження машин постійного струму, а також технологічні вимоги і необхідність підвищення експлуатаційної надійності електронавантажувачів призвели до інтенсивного розвитку регульованих приводів змінного струму, які на сьогодні є найбільш перспективними.

**Аналіз попередніх досліджень.** Сучасною тенденцією розвитку електропривода електронавантажувачів є все більше застосування синхронних машин з постійними магнітами, що живляться від вентильних перетворювачів частоти з інверторами струму керованих за положенням ротора - вентильних двигунів (ВД).

ВД найбільш перспективний тип електропривода змінного струму для електронавантажувачів, у якому регулювання швидкості і моменту обертання здійснюється напругою, що підводиться, струмом збудження і кутом випередження включення вентилів при самокеруванні за частотою живлення [1]. Він має регульовальні якості машин постійного струму і надійність систем змінного струму.

Технологічні досягнення силової електроніки дозволили створити нові прилади, що мають властивості повністю керованих ключів з високими рівнями комутованих струмів при малих втратах, незначних потужностях управління і часі перемикання. Такими приладами є біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT та комутовані за управляючим електродом тиристри IGCT, які знаходять широке застосування в електроприводах, що живлять ся від низьковольтних джерел [2].

**Метою роботи** є обґрунтування доцільності застосування ВД з синхронними машинами з постійними магнітами для привода електронавантажувачів. Завданнями роботи є проведення порівняльного аналізу сучасних електроприводів, аналіз способів керування ВД та вибір