

ключаются приборы – измерители ОВПФ, образующие межприборную сеть.

1.О порядке проведения аттестации рабочих мест по условиям труда: Постановление Кабинета Министров Украины №442 от 01.08.1992 г.

2.Методические рекомендации для проведения аттестации рабочих мест по условиям труда, утвержденные постановлением Министерства труда Украины №41 от 01.09.1992 г.

3.Инженерная экология и экологический менеджмент / М.В.Буторина, В.Н.Сидоров, С.И.Фадин и др.; под ред. Н.И.Иванова, И.М.Фадиной. – М.: Логос, 2001. – 528 с.

4.Иванов Н.И., Фадин И.М., Сидоров В.Н., Фадин С.И. Экологический мониторинг параметров окружающей среды / Отчет по НИР Р-47-0505. – СПб.: БГТУ "ВОЕННМЕХ", 2001. – 163 с.

5.Иванов Н.И., Фадин И.М., Сидоров В.Н., Фадин С.И. Мониторинг параметров физических опасных и вредных факторов (ОВПФ) производственных помещений машиностроительных предприятий / Отчет по НИР Р-47-0505. – СПб.: БГТУ "ВОЕННМЕХ", 2002. – 195 с.

Получено 21.06.2010

УДК 621.327

О.Г.ГРИБ, д-р техн. наук, Д.І.АБРАМЕНКО

Харківська національна академія міського господарства

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Визначено можливості використання алгоритмів дискретного перетворення Фур'є при цифровій обробці нестационарних сигналів в системах електропостачання. Вибрано оптимальну процедуру такої обробки для моніторингу показників якості електроенергії в режимі реального часу.

Определены возможности использования алгоритмов дискретного преобразования Фурье при цифровой обработке нестационарных сигналов в системах электроснабжения. Выбрана оптимальная процедура такой обработки для мониторинга показателей качества электроэнергии в режиме реального времени.

Possibilities of the use of algorithms of the discrete Fourier transform are certain at digital treatment of non-stationary signals in the systems of power supply. Chosen optimum procedure of such treatment for monitoring of indexes of quality of electric power real-time.

Ключові слова: якість електроенергії, цифрова обробка, перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз.

Проблемі контролю й забезпеченню якості електроенергії в останні роки приділяється велика увага. І це не випадково, тому що недотримання нормованих показників якості веде до матеріального збитку на підприємствах, що оснащуються усе більш тонкою й досконалою технологією з високим ступенем автоматизації виробничих

процесів. У багатьох промислових електротехнічних системах у силу наявності нелінійних елементів, динамічно змінюючихся навантажень і комутацій, електричні режими мають нестационарний характер, що проявляється у відхиленні струмів і напруг від синусоїдальної форми.

При аналізі електричних режимів, визначенні показників якості електричної енергії (ПЯЕ), а також при розробці заходів щодо оптимізації режимів і умов електромагнітної сумісності необхідно мати у своєму розпорядженні інформацію про зміни в часі діючих значень струмів і напруг, потужностей, спектрів гармонік, коефіцієнтів несиметрії й т.п. Інформацію про зазначені параметри одержують за допомогою цифрових приладів різного типу, що роблять виміри миттєвих значень трифазних струмів і напруг із частотою дискретизації звичайно не менше 6,4 кГц (128 вимірів на період промислової частоти) при наступній обробці сигналів по спеціальних алгоритмах.

У більшості відомих приладів інформація виводиться тільки про усереднені значення змінних. Інформація про миттєві зміни, що відбивають динаміку процесів, користувачеві недоступна. Використовуються, як правило, інтервали усереднення $T_{уср}$, регламентовані нормами стандарту 13109-97 [1] (які взяті у свою чергу з європейського стандарту EN 50160 і із серії стандартів МЕК 61000 [2]), а саме: $T_{уср} = 60$ с для діючих значень напруг (крім процедур визначення доз флікера напруги, де $T_{уср} = 0,01$ с), $T_{уср} = 3$ с для коефіцієнтів, що характеризують несинусоїдальність і несиметрію процесів, $T_{уср} = 20$ с для аналізу частоти.

Використання таких приладів в електричних мережах з різкозмінним промисловим навантаженням, де ймовірні збільшення фазних струмів до номінального значення за час 0,1 с і менше, а локальна частота у вузлі підключення навантаження внаслідок коливаний фази напруги може змінюватися в межах $\pm 0,5$ Гц, не дозволяє одержувати правдоподібну інформацію про процеси.

При моніторингу ПЯЕ застосовуються різні методи математичного моделювання, аналізу й статистичної обробки гармонійного складу струмів і напруг [3].

Традиційним математичним апаратом, що використовується для аналізу гармонійного спектру струмів і напруг, є перетворення Фур'є (ДПФ), зокрема, його дискретна форма ДПФ на основі швидких алгоритмів розрахунку [3, 4].

ДПФ виконується над кінечною послідовністю N відрахунків. Припустимо, що сигнал дискретизований через рівні проміжки часу

Δt , і в результаті отримана кінцева дискретна послідовність

$$x_n = x(n\Delta t) = x(0), x(\Delta t), x(2\Delta t), \dots, x[(N-1)\Delta t], \quad n = 0, 1, \dots, N-1.$$

ДПФ послідовності $x(n\Delta t)$ визначається як дискретна послідовність з N бінів у частотній області

$$X_k = X(k\omega_1) = X(0), X(\omega_1), X(2\omega_1), \dots, X[(N-1)\omega_1], \\ k = 0, 1, \dots, N-1,$$

де ω_1 – кругова частота першої гармоніки, що задається як

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{(N-1)\Delta t}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1.$$

Послідовність X_k в експонентній формі визначається співвідношенням

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-ik\omega_1 n\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-ik\frac{2\pi}{N-1}n} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n W^{kn},$$

$$\text{де } W = f(N) = e^{-i\frac{2\pi}{N-1}}.$$

Перетворення Фур'є є ефективним засобом дослідження сигналів. Разом з тим воно має ряд недоліків, які особливо помітно проявляються на нинішньому етапі науково-технічного розвитку. Справа в тому, що сучасні системи обробки інформації й керування все більшою мірою орієнтуються на роботу зі складними сигналами в реальному часі. Підвищені вимоги до точності й швидкодії при обробці нестационарних сигналів (а таких в електроенергетиці більшість) створюють серйозні труднощі для застосування ДПФ.

Серед проблем, що виникають при використанні ДПФ для обробки сигналів в системах електропостачання, виділимо наступні:

- базисною функцією для розкладання в ряд Фур'є є гармонійне (синусоїдальне) коливання, що математично визначене в інтервалі часу від $-\infty$ до ∞ й має незмінні в часі параметри;
- у результаті окремі особливості сигналу (наприклад, розриви або піки) викликають незначну зміну частотного образу сигналу на всьому інтервалі частот від $-\infty$ до ∞ , які "розмазуються" по всій частотній осі, що значно ускладнює їхнє виявлення по спектру;
- по складу вищих складових спектра практично неможливо оцінити місце розташування особливостей на часовій залежності сигналу і класифікувати їхній характер.

Проблеми гармонійного аналізу сигналів, обмежених у часі й нестационарних сигналів, частково вирішуються переходом до коротко-

часного або віконного перетворення Фур'є (ВДПФ) [4,5]. Ідея віконно-го перетворення полягає в сегментуванні сигналу на фрагменти (вікна), у межах яких його можна вважати стаціонарним (звичайний для математики підхід), із застосуванням ДПФ для цих фрагментів. З метою зменшення впливу кінцевої довжини ділянок на якість одержуваних спектральних оцінок кожний фрагмент сигналу множиться на вісову (віконну) функцію $w(t, \tau)$, що повинна спадати до країв сегмента (τ – параметр, що задає зміщення вікна на часовій осі). При цьому розмір стаціонарності сигналу необхідно знати апіорі.

Формула прямого ВДПФ при використанні вагової функції й вимірі частоти в Гц має вигляд:

$$XW_k(\tau, f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n w_n(\tau) e^{-i2\pi k f_n \Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n w_n(\tau) e^{-i2\pi k \frac{n}{N-1}}.$$

Віконне перетворення Фур'є не дозволяє міняти ширину вікна в процесі перетворення – віконна функція фіксована протягом усього перетворення.

На практиці віконна функція звичайно застосовується з перекриттям у часовій області з наступним усередненням результатів ВДПФ.

Множення сигналу на вагову функцію відповідає згортці спектрів сигналу й вагової функції. Це приводить до того, що піки, що є в спектрі сигналу, розширюються. Однак при цьому стає можливо зменшити рівень бічних пелюстків спектральної функції. Платою за це є розширення центрального пелюстка частотної характеристики.

Для проведення гармонійного аналізу сигналів за допомогою ВДПФ в електричних мережах у режимі реального часу розроблений алгоритм універсальної програми, орієнтованої на виявлення частот у заданому діапазоні й без твердої лімітації на кількість відрахунків.

Лістинг такої програми для прикладу аналізу нестаціонарного сигналу, в якому в різні моменти часу послідовно присутні компоненти частотою 300, 200, 100 і 50 Гц, кожна тривалістю у чверть довжини реалізації, наведений нижче.

```
clc;clear;
f1=1;           % Частота 1-ї гармоніки f1
fmax=350;       % Максимальна частота спектру fmax
T=1/f1;         % Інтервал часу виміру сигналу T
f=[300 200 100 50];
Nfr=2;          % Завдання кількості непересічних фрагментів
Kz=1;dt=1/(Kz*2*fmax); % Крок дискретизації сигналу за часом
t=0:dt:T;       % Дискретизація сигналу за часом
Nd=length(t)    % Кількість дискретних відрахунків
Nfri=(Nd-1)/Nfr % Кількість інтервалів дискретності в одному фрагменті
```

```

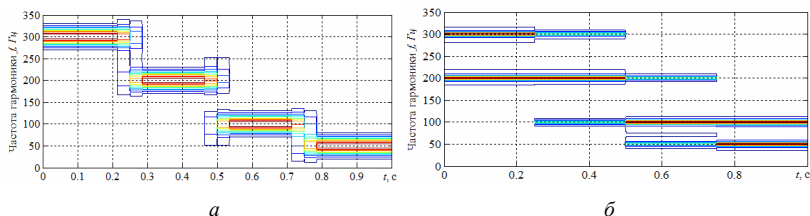
Ns=(Nd-1)/4;      % Кількість інтервалів дискретності в одній синусоїді
x1=sin(2*pi*f(1)*t(1:Ns+1)+pi/2);
x2=sin(2*pi*f(2)*t(Ns+2:2*Ns+1)+pi/2+t(Ns+1)*(f(1)-f(2)));
x3=sin(2*pi*f(3)*t(2*Ns+2:3*Ns+1)+t(2*Ns+1)*(f(2)-f(3)));
x4=sin(2*pi*f(4)*t(3*Ns+2:4*Ns+1)+t(3*Ns+1)*(f(3)-f(4)));
x=[x1 x2 x3 x4]; Nss=length(x)
fd=Kz*2*fmax;      % Частота дискретизації сигналу
f=[0:f1:fd];        % Дискретизація зображення по частоті f
fn=[0:f1:Kz*fmax];  % Дискретизація зображення по частоті до частоти Найквіста
Nfn=length(fn)
M=zeros(Nfn,Nd);
% w=tukeywin(Nfri+1,0.6); % Дискретизація віконної функції Тьюкі
% w=rectwin(Nd);         % Дискретизація прямокутної віконної функції
w=gausswin(Nfri+1,a);   % Дискретизація віконної функції Гауса
s=[1:Nfri/2:Nd];
n=[0:Nd-1];             % Формування шкали номерів дискретних відрхунків
for k=[1:2*Nfr-1]        % Кількість вікон
    xwnul=zeros(size(x)); % Формування початкового масиву зваженого сигналу
    for k1=s(k):s(k+2)
        xwnul(k1)=x(k1)*w(k1-(k-1)*Nfri/2); % Зважування сигналу
    end
    for k2=0:Nd-1
        % Визначення k-ї гармоніки i-го вікна зображення XWk по ОДПФ
        XWNUL(k2+1)=sum(xwnul(n+1)).*exp(-i*k2*2*pi*n/Nd)/Nd;
    end
    % Визначення амплітуди k-ї гармоніки зображення XWk
    XWNULk=2*abs(XWNUL(1:Nfn));
    for k3=1:Nfn
        for k4=s(k):s(k+2)
            if (M(k3,k4)==0)
                M(k3,k4)=XWNULk(k3);
            else
                M(k3,k4)=(M(k3,k4)+XWNULk(k3))/2;
            end end end
M=2*abs(M);
[Acx,Acf]=meshgrid(0:dt:T,0:f1:Kz*fmax);
% [Acf,Acx]=meshgrid(0:dt:T,0:f1:Kz*fmax);
% contour(Acf,Acx,M);grid on;
surf(Acx,Acf,M);grid on;
set(gcf,'color','white');
set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',12);
title(' Амплітуди гармонік зображення по ДПФ сигналу {\itx(t)}');
xlabel({'\it{t}', 'c'});ylabel({'\it{f}', '\Gamma'});xlabel({'\it{Ak}'});
colormap(jet);shading interp;

```

Аналіз отриманих результатів показав, що шляхом підбору типу віконної функції й ширини вікна можна досягти хороше розв'язання за часом, але погане по частоті (рисунок, а), або хороше розв'язання по частоті, але погане за часом (рисунок, б).

Результуючі погрішності у визначенні діючих значень і спектрів

змінних залежать не тільки від точності знання поточної частоти першої гармоніки, але й від частоти дискретизації змінних, ширини вікна обробки сигналів, від застосованих методів чисельного інтегрування, від початкової фази змінної у вікні обробки.



Порівняння здатності розв'язання ВДПФ по частоті й часу

Розрахунки показали, що при частоті дискретизації $f_d = 6,4$ кГц ВДПФ забезпечує при мінімальній ширині вікна обробки, рівній періоду основної частоти, погрішності визначення діючих значень змінних і рівнів основної гармоніки не більшими 0,2%, а для 11-ї і 40-ї гармонік не більшими 0,8% і 5,0% відповідно. Ці дані задовольняють вимогам стандарту 13109-97 відносно точності визначення гармонік.

При застосуванні вікон обробки до 10 періодів основної частоти ці погрішності зменшуються в 2-4 рази.

Зазначені дані про точність розрахунків справедливі лише при спостереженні за частотою першої гармоніки. Якщо слідкування за частотою не проводиться, й вона відхиляється до значень $\pm 0,5$ Гц, то погрішності у визначенні основної, 11-ї і 40-ї гармонік будуть не меншими, ніж 1,5, 15 і 97% відповідно.

Збільшення інтервалу $T_{уср}$ при визначенні частоти до значення $T_{уср} = 0,2$ с в 5 разів зменшує фіксуємі коливання частоти, а при $T_{уср} = 3$ с коливання частоти практично непомітні. Тому для запобігання появи додаткових погрішностей у визначенні спектрів змінних бажано використовувати інформацію про частоту, визначену на мінімальних інтервалах обробки.

Для оцінок динаміки зміни діючих значень змінних в мережах з різкозмінним навантаженням варто проводити розрахунки, як мінімум, на кожному періоді чергування основної частоти.

При нестабільних режимах нелінійного навантаження в спектрах струмів і напруг крім кратних основній частоті гармонік наявні також проміжні гармоніки із частотами вище й нижче промислової частоти 50 Гц.

Для спостереження за цими гармоніками ширину вікна ВДПФ T_w слід приймати меншою періода основної частоти. Якщо при $T_w = 0,02$ с можливе визначення тільки цілочисельних гармонік, кратних основній частоті, то при $T_w = k \cdot 0,02$ с можна спостерігати всі проміжні гармоніки з частотами $50/k$ Гц.

У стандарті 13109-97 для нестабільних режимів рекомендується застосовувати вікна з $T_w = (0,08 \div 0,32)$ с, або $k = 4 \div 16$.

Однак розрахункові величини гармонік, у тому числі й кратних основній частоті, принципово залежать від вибору вікна T_w .

У стандарті МЕК ІЕС 61000-4-7 приводиться поняття про групи гармонік, що містять крім цілочисельних гармонік також і найближчі до них проміжні гармоніки. У цьому стандарті рекомендується для застосування вікно з $T_w = 0,2$ с. При цьому стає доступною інформація про дев'ять спектральних проміжних ліній між сусідніми цілочисельними гармоніками.

Користувачам вітчизняних приладів для виміру ПЯЕ, орієнтованим на вимоги стандарту 13109-97, доступна інформація тільки про цілочисельні гармоніки. Оскільки оптимальна ширина вікна априорі звичайно невідома, то в мережах з швидкозмінним навантаженням інформація навіть про величини цілочисельних гармонік є непередставницькою, яка не точно характеризує нелінійні збурення. Усереднення результатів розрахунку гармонік на трьохсекундному інтервалі (вимоги стандарту) тим більш не дозволяє простежити динаміку змін гармонічного спектру.

Тому для коректного виміру параметрів струму і напруги у різкозмінних електричних режимах бажано застосовувати вікно, що відповідає попередньо розрахованому періоду основної частоти для досліджуваних моментів часу.

Відповідно до стандарту 13109-97 у системах електропостачання необхідно контролювати гармоніки в діапазоні 50-2000 Гц. Оскільки виконне перетворення оперує з вікнами, що мають однакову ширину, протиріччя розв'язання відповідно до принципу Гейзенберга для цього методу нерозв'язно.

Таким чином, використання приладів для виміру ПЯЕ в мережах з нестабільним нелінійним навантаженням є проблематичним по причинах реалізованих у них алгоритмів усереднень результатів розрахунків і орієнтацією на розрахунок тільки цілочисельних гармонік.

Доцільно провести дослідження можливості застосування для аналізу таких сигналів напрямку в гармонійному аналізі, що з'явився

зовсім недавно – методів вейвлет-аналізу, які з самого початку орієнтовані на аналіз нестационарних процесів у частотно-часовому просторі [4,5].

Основна концепція побудови вейвлет-методів складається в поданні сигналу у вигляді сукупності змищень і стисків деякої функції – вейвлета. Вейвлет-функція локалізована в часі й по частоті, що забезпечує вейвлет-перетворення властивістю виявляти локальні короткочасні особливості сигналу. Саме за рахунок зміни масштабів вейвлети здатні виявити розходження в характеристиках на різних шкалах, а шляхом змищення проаналізувати властивості сигналу в різних точках на всьому досліджуваному інтервалі.

При побудові алгоритмів діагностики й моніторингу стану нестационарних електротехнічних систем на базі даних методів, потрібне вивчення структурних властивостей сигналів, що характеризують поводження об'єкта. Тому актуальною є реалізація завдань математичного моделювання таких об'єктів із застосуванням чисельних методів вейвлет-аналізу.

1.ГОСТ 13109-97. Качество электрической энергии. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2.IEC 61000-4-7:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.

3.Висящев А.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах. – Иркутск: ИрГТУ, 2005. – 693 с.

4.Айфичер Э., Джервис, Барри У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – 2-е изд. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2004. – 992 с.

5.Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. – 2-е изд. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.

Отримано 21.06.2010

УДК 621.331

В.В.ПАНЧЕНКО

Українська державна академія залізничного транспорту, м.Харків

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ВИПРЯМЛЯЮЧОЇ УСТАНОВКИ З ВОЛЬТОДОДАВАЛЬНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Розроблено динамічну модель випрямляючої установки з вольтодобавочним перетворювачем для аналізу динамічних процесів у замкнутих системах автоматичного регулювання гармонічного складу випрямленої напруги.

Разработана динамическая модель выпрямительной установки с вольтодобавочным преобразователем для анализа динамических процессов в замкнутых системах автоматического регулирования гармонического состава выпрямленного напряжения.