

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ЧАСТОТИ

Досліджено і оцінено вплив зміни частоти мережі на точність визначення параметрів режиму у цифрових засобах вимірювання. Запропоновано шляхи зменшення похибки від цього фактора.

Ефективність та надійність роботи електроенергетичних об'єктів багато в чому залежить від своєчасного забезпечення систем керування достовірною інформацією про параметри режиму та стан обладнання. Цю інформацію сьогодні одержують переважно від цифрових засобів вимірювання як результат обробки послідовностей миттєвих значень вхідних струмів і напруг. У процесі аналого-цифрового перетворення безперервний сигнал замінюється послідовністю відліків цього сигналу в дискретні моменти часу. Зазвичай час квантується рівномірно, і частота дискретизації вибирається кратною частоті вхідного сигналу. Проте, якщо частота дискретизації залишається в процесі роботи незмінною, а частота сигналу змінюється, то виникає додаткова похибка, викликана зсувом моментів дискретизації і невідповідністю періоду інтеграції періоду сигналу. З початком впровадження цифрових технологій у практику вимірювання почався пошук шляхів її зменшення. Було запропоновано збільшення частоти дискретизації за фіксованого періоду виміру, вибір числа відліків, найбільш близького до періоду сигналу, введення корекції в алгоритм визначення параметрів у відповідності з вимірюваною частотою тощо [5, 10]. Це не дало змоги цілком усунути зазначену похибку, особливо при спотворених вхідних сигналах, хоча і допомогло знайти прийнятні технічні рішення при розробці приладів.

Стрімкий розвиток мікропроцесорної техніки та інформаційних технологій забезпечив нові можливості одержання вимірювальної інформації. В той же час створення інтегрованих систем керування електроенергетичними об'єктами, впровадження технології синхронізованих векторних вимірювань параметрів режиму, збільшення кількості різкозмінних та нелінійних навантажень висунули підвищені вимоги до номенклатури та якості вимірювальної інформації. Зокрема, це стосується необхідності визначення параметрів режиму з прив'язкою до моменту часу, зменшення інтервалів усереднення до періоду основної частоти сигналу, вимірювання кутів струмів та напруг, постійного моніторингу параметрів якості електроенергії (ПЯЕ) [4, 6]. Наслідком цього є широке застосування алгоритмів перетворення Фур'є, особливо чутливих до нестабільності частоти мережі. Тому дослідження і оцінка впливу цього фактора на похибку вимірювання параметрів режиму та пошук механізмів її компенсації залишаються актуальними і сьогодні. Цим питанням присвячена дана робота.

Визначення середньоквадратичних значень струмів та напруг, активної потужності базується на обчисленні однакових за структурою інтегралів. Наприклад, для струму маємо

такий вираз: $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$, де T – період основної частоти сигналу.

За умови періодичності вхідних сигналів кожен з підінтегральних виразів складається з постійної складової, що є інформативною, і періодичних складових з частотами, кратними основній частоті сигналу. Для струму $i(t)$, представленого сумою гармонік, одержимо

$$i^2(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{I_{(k)m}^2}{2} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{I_{(k)m}^2}{2} \cos(2k\omega t + 2\psi_{(k)}) + \sum_{\substack{i=0 \\ k=0 \\ i \neq k}}^{\infty} I_{(i)m} \cdot I_{(k)m} \cdot \sin(i\omega t + \psi_{(i)}) \cdot \sin(k\omega t + \psi_{(k)}),$$

де $I_{(k)m}$, $I_{(i)m}$, $\psi_{(k)}$, $\psi_{(i)}$ – амплітуди та фази гармонік з номерами k та i .

Інтегралі від періодичних складових на періоді сигналу дорівнюють нулю. У разі неточного, внаслідок зміни частоти, визначення періоду сигналу, а отже, і періоду інтегрування, такої рівності не буде. Це зумовить похибку обчислення. Для її усунення при практичному визначенні параметрів, що розглядаються, можливо застосувати декілька підходів до обчислення інтегралів: а) адаптивний; б) апроксимаційний; в) фільтраційний.

Суть першого полягає у визначенні базової частоти сигналу, відповідній зміні частоти дискретизації, подальшій реєстрації сигналу впродовж його періоду з обчисленою частотою дискретизації в еквідистантні моменти часу, обчисленні інтегралу, наприклад, методом прямокутників:

$$I = \sqrt{\frac{1}{n_0} \sum_{l=0}^{n_0-1} i(l) \cdot i(l)},$$

де $i(l)$ – миттєве значення струму в l -й точці вимірювання; n_0 – кількість вибірок миттєвих значень на періоді сигналу.

Для реалізації адаптивного підходу потрібний гнучкий програмно керований блок реєстрації і швидкодіючий спосіб визначення частоти з достатньою точністю.

Підхід апроксимаційний полягає у визначенні частоти сигналу і подальшому уточненні значення інтегралів шляхом інтерполяції. При цьому частота дискретизації не змінюється. Похибка такого методу залежить від характеристик самого сигналу, відносних амплітуд гармонік, їх кількості, кутів, а також від співвідношення основної частоти сигналу і частоти дискретизації. Забезпечення достатньої точності вимагає високих значень останньої.

Фільтраційний підхід полягає у виділенні постійної складової з послідовності миттєвих значень підінтегральної величини і не потребує визначення частоти сигналу. З цією метою можна використати цифрові фільтри з імпульсними характеристиками кінцевої довжини. Достатньо простим і легким методом розрахунку таких фільтрів є метод зважування за допомогою вікна. Використання вікна з цілочисловими коефіцієнтами не призводить до суттєвого збільшення обчислювальних процедур. Такою ваговою функцією може служити функція «ковзного середнього». Шляхом згортки вагової функції такого фільтра з цією ж функцією можна отримати фільтр з ваговою функцією другого порядку і покращеною частотною характеристикою. Аналіз впливу виду вагових функцій на величину похибки, викликані похибкою визначення періоду сигналу, при вимірюванні середнього або середньоквадратичного значення періодичної напруги показав, що використання вагових функцій вищих порядків призводить до істотного зниження похибки. Так, при вимірюванні періоду з похибкою 1 % і застосуванні вагової функції трикутної форми з шириною, що дорівнює двом періодам сигналу, похибка вимірювання не перевищує 0,02 %, а при застосуванні вікна Хеннінга – 0,2 % [2]. Слід зазначити, що застосування фільтраційного підходу дає найбільші переваги при малих частотах дискретизації.

У цифрових засобах вимірювання при визначенні гармонічного складу сигналів, ПЯЕ, кутів сигналів тощо застосовують перетворення Фур'є. У цьому випадку механізм впливу відхилення частоти на похибку вимірювання має свої особливості порівняно з визначенням середньоквадратичних значень струмів та напруг.

Амплітуди ортогональних складових гармонік фазної напруги $U_{\phi(k)x}$, $U_{\phi(k)y}$, виходячи з розкладу в ряд Фур'є, визначають за наступними виразами:

$$U_{\phi(k)x} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u_{\phi}(\omega t) \cdot \sin(k\omega' t) d(\omega t); \quad U_{\phi(k)y} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u_{\phi}(\omega t) \cdot \cos(k\omega' t) d(\omega t), \quad (1)$$

де $\omega = \omega'$ – кругова частота основної гармоніки сигналу; k – номер гармоніки.

У разі застосування перетворення (1), ядро якого залежить від частоти сигналу, при зміні цієї частоти змінюються і самі підінтегральні вирази. Слід зазначити, що при розбіжності частоти ядра перетворення ω' і частоти сигналу ω , підінтегральні вирази не містять постійних складових, тому застосування фільтраційного підходу, описаного вище, не призведе до усунення похибки.

Для задач оперативного керування електроенергетичними об'єктами, контролю якості електроенергії, моніторингу режиму найважливішою є інформація про значення перших гармонік фазних струмів і напруг. За їх ортогональними складовими визначають амплітуди і кути сигналів, активні та реактивні потужності, частоту, симетричні складові струму та напруги шляхом переходу від фазних до симетричних координат, частину ПЯЕ тощо. Відповідно і похибки визначення цих величин визначаються похибками обчислення ортогональних складових перших гармонік вхідних сигналів.

Визначимо ці похибки при зміні частоти напруги мережі. Вони обумовлені зсувом моментів дискретизації від заданих значень внаслідок того, що крок дискретизації Δt_δ стає некрратним періоду сигналу: $\Delta t_\delta \neq T/n$. Це призводить до зміщення реального часу l -го виміру відносно необхідного на $\Delta t_{cm(l)}$: $\Delta t_{cm(l)} = l(\Delta t_\delta - T/n)$.

Такий зсув прогресивно зростає з кожною точкою дискретизації. Відносна величина цього зсуву на періоді частоти сигналу T визначає коефіцієнт γ , що характеризує величину нестабільності частоти: $\gamma = \Delta t_{cm(n)}/T = (n_\delta \cdot \Delta t_\delta - T)/T$.

Абсолютна похибка вимірювання ортогональних складових основної гармоніки напруги, викликана зсувом моментів дискретизації, визначається за таким виразом [1]:

$$\Delta U_{(1)} = \gamma \frac{2}{T} \int_0^T tu(t) \cos(\omega t + \beta) dt, \quad (2)$$

де $u(t)$ – вхідний сигнал, який задаємо як суму гармонік $u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{(k)m} \cos(k\omega t + \psi_{(k)})$, $\cos(\omega t + \beta)$ – опорний сигнал при розкладанні напруги в ряд Фур'є: при визначенні похибки $\Delta U_{(1)x}$ він дорівнює $\sin \omega t$, отже $\beta = -\pi/2$; при визначенні похибки $\Delta U_{(1)y}$ $\beta = 0$.

Виконавши перетворення, одержимо $\Delta U_{(1)x} = \Delta U_{(1)x}^1 + \Delta U_{(1)x}^\Sigma$, де складова похибки $\Delta U_{(1)x}^1$, зумовлена першою гармонікою сигналу, обчислюється за виразом

$$\Delta U_{(1)x}^1 = \gamma \frac{U_{(1)m}}{2} (\sin \psi_{(1)} - 2\pi \cos \psi_{(1)}), \quad (3)$$

складова похибки $\Delta U_{(1)x}^\Sigma$, зумовлена сумою вищих гармонік сигналу, дорівнює

$$\Delta U_{(1)x}^\Sigma = -\gamma \sum_{k=2}^{\infty} \frac{2U_{(k)m} k \sin \psi_{(k)}}{(k+1) \cdot (k-1)}. \quad (4)$$

Аналогічно для $\Delta U_{(1)y}$ отримаємо

$$\Delta U_{(1)y} = \Delta U_{(1)y}^1 + \Delta U_{(1)y}^\Sigma;$$

$$\Delta U_{(1)y}^1 = \gamma \frac{U_{(1)m}}{2} (\cos \psi_{(1)} - 2\pi \sin \psi_{(1)}); \quad (5)$$

$$\Delta U_{(1)y}^\Sigma = \gamma \sum_{k=2}^{\infty} \frac{2U_{(k)m} k \cos \psi_{(k)}}{(k+1) \cdot (k-1)}. \quad (6)$$

Зважаючи на характерну форму фазних струмів та напруг у більшості експлуатаційних режимів та для наочності подальшого викладення, розглянемо синусоїдальні вхідні сигнали.

Похибку визначення амплітуди основної гармоніки $U_{(1)m}$ через похибки її ортогональних складових можна виразити таким чином: $\Delta U_{(1)m} = (U_{(1)x} \cdot \Delta U_{(1)x} + U_{(1)y} \cdot \Delta U_{(1)y}) / U_{(1)m}$.

Тоді, підставивши значення (3) і (5) і виконавши тригонометричні перетворення, отримаємо

$$\Delta U_{(1)m} = \gamma \frac{U_{(1)m}}{2} \cdot \cos 2\psi_{(1)}. \quad (7)$$

Оцінка похибки по максимуму, що не залежить від початкової фази сигналу, дорівнює

$$|\Delta U_{(1)m}| \leq (\gamma \cdot U_{(1)m})/2. \quad (8)$$

Обчислюючи фазу першої гармоніки сигналу $\psi_{(1)}$ через її ортогональні складові за ви-

разом $\psi_{(1)} = \arctg\left(\frac{U_{(1)y}}{U_{(1)x}}\right) = \arcsin\frac{U_{(1)y}}{\sqrt{U_{(1)y}^2 + U_{(1)x}^2}}$, похибку $\Delta\psi_{(1)}$ можна визначити так:

$$\Delta\psi_{(1)} = (\Delta U_{(1)x} \cdot \sin\psi_{(1)} + \Delta U_{(1)y} \cdot \cos\psi_{(1)})/U_{(1)m}.$$

Підставивши значення (3) і (5), отримаємо похибку визначення фази першої гармоніки, зумовлену відхиленням частоти мережі:

$$\Delta\psi_{(1)} = \frac{\gamma}{2}(1 - 2\pi \sin 2\psi_{(1)}). \quad (9)$$

Похибки визначення симетричних складових основної гармоніки при нестабільності частоти мережі виразимо також через похибки ортогональних складових фазних напруг основної гармоніки (3), (5). Абсолютні похибки визначення ортогональних складових прямої послідовності при подачі на вхід приладу симетричної системи синусоїдальних напруг матимуть вигляд

$$\begin{aligned} \Delta U_{I(1)x} &= -\pi \cdot \gamma \cdot U_{(1)m} \cdot \cos\psi_{(1)}; \\ \Delta U_{I(1)y} &= -\pi \cdot \gamma \cdot U_{(1)m} \cdot \sin\psi_{(1)}. \end{aligned}$$

Тоді абсолютна похибка визначення амплітуди напруги прямої послідовності при даному вхідному сигналі практично не залежить від значення кута і визначається виразом

$$\Delta U_{I(1)m} = -(\pi \cdot \gamma)^2 \cdot U_{(1)m}/6. \quad (10)$$

Абсолютні похибки визначення ортогональних складових зворотної послідовності для тих же умов матимуть вигляд $\Delta U_{2(1)x} = (\gamma/2) \cdot U_{(1)m} \cdot \sin\psi_{(1)}$, $\Delta U_{2(1)y} = (\gamma/2) \cdot U_{(1)m} \cdot \cos\psi_{(1)}$, відповідно абсолютна похибка визначення амплітуди напруги зворотної послідовності визначиться так:

$$\Delta U_{2(1)m} = |(\gamma/2) \cdot U_{(1)m}|. \quad (11)$$

Дослідимо вплив нестабільності частоти мережі на визначення ПЯЕ, що характеризують усталені режими роботи електричних об'єктів [8].

З урахуванням формули (8) оцінку абсолютної похибки визначення усталеного відхилення фазної напруги $\delta U_{y\phi}$, спричинену нестабільністю частоти мережі, при номінальній синусоїдальній фазній напрузі можна зробити так: $|\Delta(\delta U_{y\phi})| \leq (\gamma/2) \cdot 100$.

Для перевірки коректності одержаної оцінки було виконано чисельне моделювання визначення ортогональних складових і амплітуди першої гармоніки за допомогою математичної системи Mathcad. Метою моделювання було дослідження абсолютної систематичної похибки визначення усталеного відхилення фазної напруги при варіації частоти в діапазоні 47,5...52,5 Гц, початкової фази напруги від 0 до 360° і різному гармонічному складі напруги (коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги $K_U \leq 10\%$). Моделювання підтвердило достовірність одержаних результатів і показало, що наявність у складі напруги вищих гармонік не суттєво впливає на значення похибки.

З урахуванням формули (10) абсолютна похибка визначення усталеного відхилення напруги δU_y у трифазній мережі, викликана нестабільністю частоти, при подачі на вхід приладу симетричної системи синусоїдальних напруг номінального значення дорівнює $\Delta(\delta U_y) = ((\pi \cdot \gamma)^2/6) \cdot 100$.

З урахуванням формули (11) модуль абсолютної похибки визначення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} , викликаної нестабільністю частоти мережі, при подачі на вхід приладу симетричної системи синусоїдальних напруг визначається таким чином: $\Delta K_{2U} = |(\gamma/2) \cdot 100|$.

Шляхом математичного моделювання досліджувалась залежність абсолютної систематичної похибки визначення усталеного відхилення напруги δU_y у трифазній мережі, коефіцієнтів несиметрії напруг по зворотній K_{2U} і нульовій K_{0U} послідовностях за тих же умов, що і в попередньому випадку. Результати для нульової початкової фази напруги наведені на

рис. 1. Результати моделювання для системи симетричних синусоїдальних напруг показано штрих-пунктирними кривими; за наявності у складі напруги 3-ї гармоніки з амплітудою, що становить 10 % від амплітуди основної гармоніки, показано пунктирними кривими; за наявності у складі напруги 7-ї гармоніки з амплітудою, що становить 10 % від амплітуди основної гармоніки – точковими кривими. Там же наведено значення похибок, визначені аналітично (суцільні криві). Наведені результати показують залежність похибок визначення значень симетричних послідовностей від номера присутньої в сигналі гармоніки.

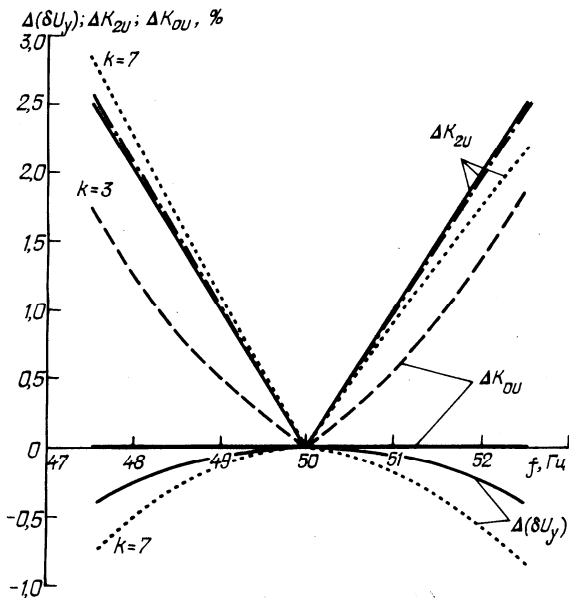


Рис. 1

(початкова фаза 0°) і відповідної гармоніки n з амплітудою, що дорівнює 10 % першої гармоніки, і початковою фазою, рівною 0° , показують, що ці похибки істотно зростають зі зростанням номера гармоніки (рис. 2).

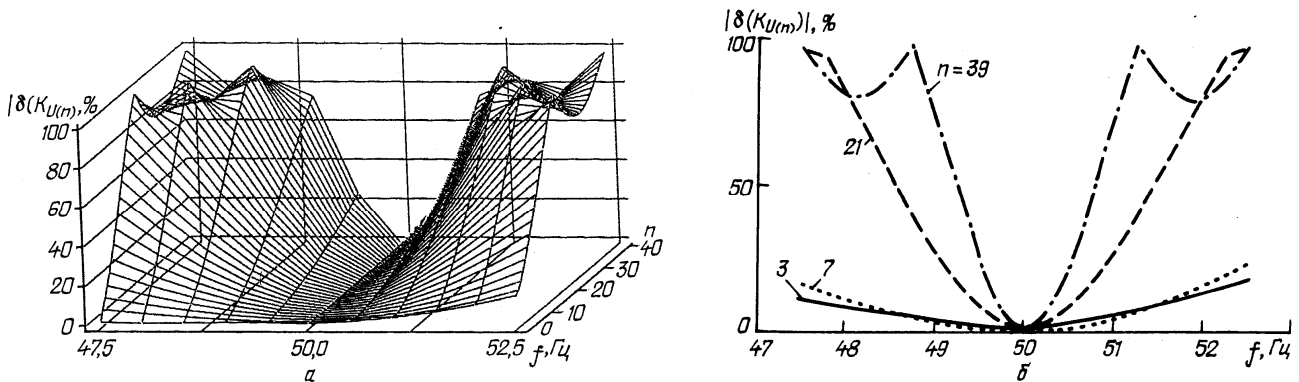


Рис. 2

Проведений аналіз показав, що для вибраного вхідного сигналу при варіації кутів від 0 до 360° і відхиленні частоти основної гармоніки на $0,1$ Гц похибки $K_{U(n)}$ не перевищують 3% .

Всі наведені вище міркування справедливі при визначенні ортогональних складових на одному періоді сигналу. Рекомендована ширина вимірювального вікна для сталої напруги складає від $0,1$ до $0,5$ с, тобто приблизно $5 \dots 25$ періодів сигналу [8]. У цьому випадку похибка при відхиленні частоти ще більше зростає.

При визначенні частоти мережі цифровим способом, що базується на обчисленні фаз першої гармоніки напруги, похибка від досліджуваного фактора дорівнює [7]: $\Delta(f) = - (2 \cdot \pi \times \gamma^2 \cdot \cos 2\psi_{(1)}) / T$, а оцінити її по максимуму, не залежно від початкової фази сигналу, можна так: $|\Delta(f)| \leq (2 \cdot \pi \cdot \gamma^2) / T$.

З метою зменшення значення цієї похибки, зважаючи на її залежність від моменту вимірювання, тобто початкової фази сигналу, доцільно усереднювати результати вимірювань у трьох фазах.

Для дослідження впливу нестабільності частоти на визначення складових вищих гармонік було виконано моделювання алгоритму визначення коефіцієнтів гармонічних складових напруги $K_{U(n)}$. Одержані за результатами моделювання значення відносних похибок $\delta(K_{U(n)})$ для вхідного сигналу, що складається з суми сигналу основної частоти

Результати моделювання визначення похибок розглянутих вище ПЯЕ, а також відхилення частоти Δf , при зміні частоти сигналу для симетричної системи вхідних напруг як синусоїдальної, так і за наявності різних гармонік наведено в таблиці. Рекомендовані похибки засобів вимірювання ПЯЕ наведено за даними [3], враховуючи різницю між похибкою вимірювання [8] і похибкою засобу вимірювання.

Гармонічний склад сигналу, %	Похибки ПЯЕ					
	$ \Delta(\delta U_{y\phi}) $, % по фазі	$ \Delta(\delta U_y) $, % 3-фазне	ΔK_{2U} , %	ΔK_{0U} , %	$ \delta(K_{U(n)}) $, %	$ \Delta(\Delta f) $, Гц
$ f - f_d/n_d = 0,1$ Гц						
$K_U = 0$	0,1	0,0007	0,1	0	–	0,0002
$K_{U(3)} = 10$	0,145	0,0007	0,1	0,046	0,102	0,0002
$K_{U(5)} = 10$	0,14	0,0044	0,097	0	0,11	0,0002
$K_{U(7)} = 10$	0,14	0,0059	0,098	0	0,121	0,0002
$K_{U(2l)} = 10$	0,138	0,0007	0,1	0,092	0,287	0,0002
$ f - f_d/n_d = 0,3$ Гц						
$K_U = 0$	0,3	0,0059	0,301	0	–	0,0018
$K_{U(3)} = 10$	0,443	0,0059	0,301	0,145	0,325	0,0018
$K_{U(5)} = 10$	0,433	0,021	0,305	0	0,409	0,0018
$K_{U(7)} = 10$	0,43	0,027	0,302	0	0,52	0,0018
$K_{U(2l)} = 10$	0,429	0,0059	0,301	0,328	2,38	0,0018
Рекомендовані похибки засобів вимірювання ПЯЕ						
	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	± 5	$\pm 0,02$

Таким чином, для досліджуваних значень вхідного сигналу похибки визначення ПЯЕ, викликані відхиленням частоти, більшим за 0,1 Гц, можуть перевищувати допустимі. З метою зменшення впливу нестабільності частоти слід постійно визначати частоту мережі і змінювати крок дискретизації так, щоб на періоді основної гармоніки сигналу укладалося ціле число кроків дискретизації [7]. Враховуючи дані про можливі коливання частоти мережі і аналіз похибок визначення ПЯЕ, рекомендується виконувати підстроювання частоти дискретизації не рідше 2-х раз за секунду.

Висновки. Досліджено, аналітично і шляхом чисельного моделювання, вплив зміни частоти мережі на точність визначення параметрів режиму. Показано, що характер цього впливу, величина викликаних ним похибок і способи їх усунення залежать від алгоритмів обробки миттєвих значень сигналів. Особливо великим є вплив нестабільності частоти на точність визначення гармонічного складу сигналу і величин, що визначаються на його основі, у тому числі векторів сигналів і показників якості електричної енергії. Зокрема, відхилення частоти більш ніж на 0,1 Гц призводить до неприпустимих похибок визначення цих параметрів. При комплексному визначенні параметрів режиму ефективним шляхом підвищення точності їх вимірювання є постійна адаптація частоти дискретизації до частоти сигналу на базі вимірювання частоти мережі цифровим способом.

Исследовано и оценено влияние изменения частоты сети на точность определения параметров режима в цифровых средствах измерения. Предложены пути уменьшения погрешности от этого фактора.

Influence of network frequency changes on accuracy of mode parameters determination on digital measuring means are investigated and estimated. The means of this factor error reduction are proposed.

1. Горлач А.А., Миц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. – К.: Техніка, 1985. – 151 с.
2. Желбаков И.Н., Янков А.В. Измерение среднего значения периодических напряжений методом цифровой обработки сигналов // Измерительная техника. – 1991. – № 10. – С. 43–45.
3. Карташев И.И., Пономаренко И.С., Ярославский В.Н. Требования к средствам измерения показателей качества электроэнергии // Электричество. – 2000. – № 4. – С. 11–17.

4. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А., Сапунов М.В. Вопросы измерения параметров электрических режимов и гармонических спектров в сетях с резкопеременной и нелинейной нагрузками // Пром. энергетика. – 2005. – №3. – С. 44–48.
5. Праховник А.В., Волошко А.В., Гузенфельд З.М. Влияние нестабильности частоты сети на точность измерения количественных и качественных характеристик электропотребления // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1988. – № 4. – С. 3–9.
6. Стогний Б.С., Уцаповский К.В., Мольков А.Н., Сопель М.Ф., Павловский В.В., Пилипенко Ю.В. Система глобального мониторинга, синхронизации и регистрации системных параметров ОЭС Украины – основа нового качества автоматизированного и оперативного управления // Энергетика та електрифікація. – 2006. – №4. – С. 8–11.
7. Танкевич Е.Н., Яковлева И.В. Реализация цифрового способа измерения частоты сетевого напряжения в средствах измерения характеристик электропотребления // Техн. електродинаміка. – 1998. – № 3. – С. 65–69.
8. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.01.2000. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с.
9. Eichhorn K. Fr., Hosemann G., Schneider E. Digitale Messungen von Wechsel- und Drehstromgroben für die Netzschutz- und Leittechnik //Elektric. – 1990. – 44, №7. – С.249–253,279.

Надійшла 19.02.2009