

ВПЛИВ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ЧАСТОТИ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ НА ТОЧНІСТЬ ВЕКТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

М.Ф. Сопель, канд. техн. наук, **І.В. Яковлєва**, канд. техн. наук, **Є.М. Танкевич**, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Аналітично і шляхом чисельного моделювання досліджено й оцінено вплив зміни частоти мережі на векторні вимірювання струму та напруги. Встановлено, що відхилення частоти більше ніж на 0,1 Гц призводить до суттєвих похибок визначення векторних параметрів. Використання одержаних результатів дасть змогу підвищити точність вимірювань векторів струму та напруги. Бібл. 8, рис. 3.

Ключові слова: нестабільність частоти, векторні вимірювання, похибка, струм, напруга.

Достовірний моніторинг параметрів плинних режимів є запорукою надійного та ефективного функціонування енергосистеми. На сьогодні базою такого моніторингу є синхронізовані вимірювання векторів перших гармонік струмів та напруг, за якими можна обчислити інші параметри режиму. Впровадження систем моніторингу дало змогу одержувати синхронізовану інформацію про параметри режиму в різних точках енергосистеми і призвело до розширення застосування технології синхронізованих векторних вимірювань, зокрема в системах керування, автоматики та захисту, керування та регулювання в активно-адаптивних мережах тощо [4].

Застосування технології синхронізованих векторних вимірювань висуває підвищені вимоги до якості обробки сигналів. Зокрема, це стосується необхідності точного визначення параметрів режимів з прив'язкою до моменту часу, особливо за умов нестаціонарних вхідних сигналів та нестабільності частоти мережі, зменшення інтервалів усереднення до періоду основної частоти сигналу, вимірювання векторів перших гармонік струмів та напруг, застосування алгоритмів перетворення Фур'є особливо чутливих до нестабільності частоти мережі.

Зазвичай частота дискретизації вибирається кратною частоті вимірюваного сигналу. Проте, якщо частота дискретизації залишається в процесі роботи незмінною, а частота вимірюваного сигналу змінюється, то при визначенні параметрів сигналу шляхом цифрової обробки миттєвих значень виникає додаткова похибка, викликана зсувом моментів дискретизації і невідповідністю періоду інтеграції періоду сигналу. Особливо відчутним є вплив нестабільності частоти на точність визначення гармонічного складу сигналу і величин, що визначаються на його основі, у тому числі показників якості електричної енергії [7]. З початком впровадження цифрових технологій в практику вимірювання почався пошук шляхів зменшення такого впливу і викликаної ним похибки. Було запропоновано збільшення частоти дискретизації за фіксованого періоду виміру, вибір оптимального числа відліків, введення корекції в алгоритм визначення параметрів відповідно до вимірної частоти тощо [3, 8]. Це не дало змоги цілком усунути зазначену похибку, особливо при спотворених вхідних сигналах, хоча і допомогло знайти прийнятні технічні рішення при розробці приладів. Дослідимо та оцінімо особливості впливу цього фактора на векторні вимірювання струму та напруги.

Векторне представлення синусоїдного сигналу не залежить від його частоти. Так, сигнал $x(t) = X_m \cos(2\pi ft + \varphi)$ представляє вектор $X = (X_m/\sqrt{2}) e^{j\varphi}$, причому значення кута φ залежить від початкового моменту вимірювання. Якщо векторні представлення сигналу визначаються на інтервалах спостереження T_0 і цей інтервал кратний періоду сигналу $T = 1/f$, то за умови стабільності сигналу значення векторів на послідовних інтервалах будуть однаковими. У випадку, коли умова кратності інтервалів T_0 і T не дотримується, вектори, визначені на інтервалах спостереження, мають однакові амплітуди X_m , але різні кути. Зміна кутів проходить зі швидкістю $2\pi(f - f_0)$, де $f_0 = 1/T_0$, тобто на двох послідовних інтервалах спостереження

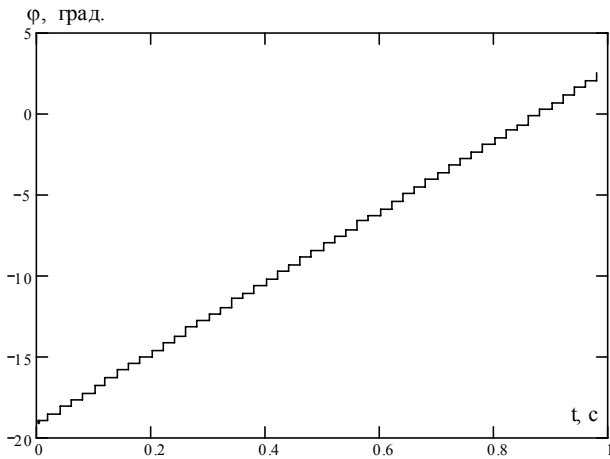


Рис. 1

кути сигналу відрізняються на $2\pi(f-f_0)T_0$. Цей ефект покладено в основу одного зі способів визначення частоти сигналу за відомою величиною зміни його фази за визначений інтервал часу [5].

Приклад такої зміни фази показано на рис. 1. Приладом «Регіна» зареєстровано синусоїдний струм амплітудою 1 А частотою 50,06 Гц. Кожні 0,02 с (період частоти 50 Гц) обчислено фазу сигналу. Зміна фази вектора протягом 1 с перевищує 21° .

Розглянемо особливості впливу відхилення частоти сигналу від номінального значення на визначення векторів струму і

напруги порівняно з визначенням їх середньоквадратичних значень. Останнє базується на обчисленні однакових за структурою інтегралів. Наприклад, для струму $i(t)$ 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 підінтегральний вираз складається з постійної складової, що є інформативною, і періодичних складових з частотами, кратними основній частоті сигналу. Для струму $i(t)$, представленого сумою гармонік

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{(k)m} \cos(k\omega t + \psi_{(k)}),$$

одержимо

$$i^2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_{(k)m}^2}{2} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_{(k)m}^2}{2} \cos(2k\omega t + 2\psi_{(k)}) + \sum_{\substack{i=1 \\ k=1 \\ i \neq k}}^{\infty} I_{(i)m} \cdot I_{(k)m} \cdot \sin(i\omega t + \psi_{(i)}) \cdot \sin(k\omega t + \psi_{(k)}),$$

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

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

Апроксимаційний підхід 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. Досить простим і легким методом розрахунку таких фільтрів є метод зважування за допомогою вікна. Використання вікна з цілочисловими коефіцієнтами не призводить до сутте-

вого збільшення обчислювальних процедур. Такою ваговою функцією може служити функція «ковзного середнього». Шляхом згортання 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, спричиненої 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 випадку застосування перетворення Фур'є, зокрема при виконанні синхронізованих векторних вимірювань струму та напруги, 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 $\omega = 2\pi f$ – кругова частота основної гармоніки сигналу; $\omega' = 2\pi f'$ – кругова частота ядра перетворення Фур'є, зазвичай $f' = f_{\text{ном}}$, k – номер гармоніки.

При зміні частоти сигналу ω змінюються підінтегральні вирази у перетвореннях (1). 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.

У разі застосування перетворення (1) похибки визначення векторів перших гармонік фазних струмів і напруг визначаються похибками обчислення їх ортогональних складових. Визначимо ці похибки при зміні частоти напруги мережі. Вони обумовлені зсувом моментів дискретизації від заданих значень внаслідок того, що крок дискретизації $\Delta t_d = T_0/n_d$ стає некратним періоду сигналу, тобто $\Delta t_d \neq T/n_d$. Це призводить до зміщення реального часу l -го виміру відносно необхідного на $\Delta t_{cm(l)}$: $\Delta t_{cm(l)} = l(\Delta t_d - T/n_d)$, де n_d – кількість вибірок миттєвих значень на інтервалі вимірювання.

Такий зсув прогресивно наростає з кожною точкою дискретизації. Відносна величина цього зсуву на періоді частоти сигналу T визначає коефіцієнт γ , що характеризує величину нестабільності частоти:

$$\gamma = \Delta t_{cm(n)}/T = (n_d \cdot \Delta t_d - T)/T = (f - f_0)/f_0.$$

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, становить

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

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

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

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

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

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

Оцінки абсолютної та відносної похибок визначення модуля вектора основної гармоніки напруги по максимуму, що не залежить від початкової фази сигналу, дорівнюють

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

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

$$\psi_{(1)} = -\arctg\left(\frac{U_{(1)y}}{U_{(1)x}}\right) = -\arcsin \frac{U_{(1)y}}{\sqrt{U_{(1)y}^2 + U_{(1)x}^2}},$$

визначимо похибку $\Delta \psi_{(1)}$:

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

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

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

Перша складова цієї похибки, яка не залежить від початкового моменту вимірювання, визначається зміною кута вектора за половину періоду спостереження T_0 .

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

$$|\Delta \psi_{(1)\max}| \leq |\gamma| \cdot (\pi + 1/2). \quad (10)$$

Відповідно до міжнародних стандартів точність векторних вимірювань визначається за допомогою критерію точності *TVE* (total vector error), який враховує як похибки вимірювання величини та фази вектора, так і точність синхронізації вимірювань. Враховуючи зв'язок між значенням *TVE* і похибками вектора за амплітудою (7) та кутом (9) [6], одержимо

$$TVE = \frac{\gamma}{2} \sqrt{1 + 4\pi^2 - 4\pi \sin 2\psi_{(1)}},$$

і тоді оцінка по максимуму співпадає з виразом (10):

$$|TVE_{\max}| \leq |\gamma| \cdot (\pi + 1/2).$$

Для перевірки коректності одержаних оцінок було виконано чисельне моделювання процедури визначення ортогональних складових, амплітуди і фази сигналу при варіації частоти і початкової фази сигналу за допомогою математичної системи Mathcad. Моделювання підтвердило достовірність одержаних результатів.

На рис. 2 наведено результати обчислення похибок, зумовлених відхиленням частоти сигналу від номінального значення ($f=49,8$ Гц), а саме відносної похибки визначення амплітуди сигналу δ , похибки визначення кута сигналу $\Delta\psi$ і TVE , при зміні початкової фази сигналу ψ .

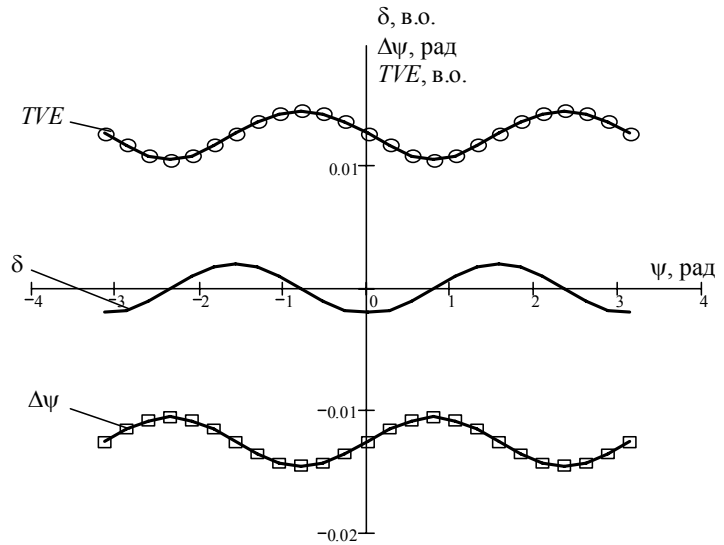


Рис. 2

Значення похибок, обчислених за одержаними вище виразами і в результаті моделювання, практично співпадають, тому на рисунку наведено по одній кривій для кожної похибки.

На рис. 3 зображено границі зон, в яких знаходяться значення досліджуваних похибок визначення векторів струму та напруги при зміні частоти сигналу. Зважаючи на зростаючі вимоги до точності векторних вимірювань, похибки, особливо кутову та TVE , що виникають при відхиленні частоти більше ніж на 0,1 Гц, слід вважати суттєвими. В той же час одержані вирази (7) і (9) дають можливість досить просто коригувати ці похибки у засобах векторних вимірювань, які зазвичай крім векторів напруги та струму вимірюють і частоту сигналів.

У багатьох задачах, в яких застосовують векторні вимірювання, розглядають різницю кутів векторів. Зупинимось на цьому випадку окремо. Враховуючи вираз (9), одержимо рівняння для похибки визначення різниці кутів двох векторів, зумовленої відхиленням частоти:

$$\Delta(\psi_1 - \psi_2) = \frac{\gamma}{2} (\sin 2\psi_2 - \sin 2\psi_1) = \gamma \sin(\psi_2 - \psi_1) \cos(\psi_2 + \psi_1).$$

Максимальне значення цієї похибки не перевищує $\gamma \sin(\psi_2 - \psi_1)$ незалежно від моменту вимірювання, тобто вона суттєво менша, ніж похибка кута вектора і має приблизно такий же рівень, як і похибка вимірювання модуля вектора. Наприклад, при вимірюванні різниці кутів, що дорівнює 30° , похибка буде не більше ніж $\gamma/2$.

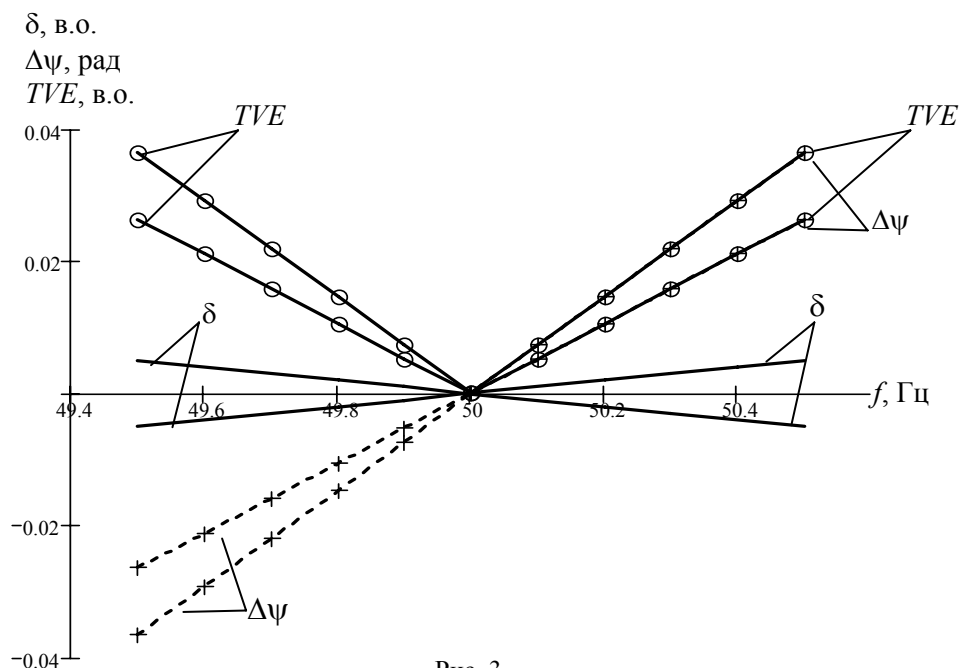


Рис. 3

Висновки. Дослідження, аналітичне і шляхом чисельного моделювання, дало змогу оцінити вплив зміни частоти мережі на точність визначення векторів струму і напруги й показало особливості цього впливу порівняно з визначенням їх середньоквадратичних значень. Встановлено, що відхилення частоти більше ніж на 0,1 Гц призводить до суттєвих похибок визначення векторних параметрів, особливо кутових (більших 25°) та *TVE* (більших 0,7 %). Одержані результати складають базу для підвищення точності векторних вимірювань в умовах нестабільності частоти шляхом введення коригуючих поправок до результатів вимірювання з метою виключення систематичних похибок.

1. Горлач А.А., Миц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. – К.: Техніка, 1985. – 151с.
2. Желбаков И.Н., Янков А.В. Измерение среднего значения периодических напряжений методом цифровой обработки сигналов // Измерительная техника. – 1991. – № 10. – С. 43–45.
3. 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.
4. Стозний 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.
5. 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.
6. Танкевич Е.М., Варський Г.М., Яковлева І.В. Вплив компонентів вимірювального каналу на похибки вимірювання векторів напруги // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 6. – С. 41–47.
7. Яковлева І.В. Вимірювання параметрів режиму в умовах нестабільності частоти // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 125–131.
8. Eichhorn K. Fr., Hosemann G., Schneider E. Digitale Messungen von Wechsel- und Drehstromgroßen für die Netzschutz- und Leittechnik // Elektr. – 1990. – 44, № 7. – С. 249–253, 279.

М.Ф. Сопель, канд. техн. наук, **И.В. Яковлева**, канд. техн. наук, **Е.Н. Танкевич**, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Влияние нестабильности частоты электросети на точность векторных измерений тока и напряжения

Аналітично і шляхом чисельного моделювання досліджено і оцінено вплив зміни частоти мережі на векторні вимірювання струму і напруги. Встановлено, що відхилення частоти більше ніж на 0,1 Гц призводить до суттєвих похибок визначення векторних параметрів. Використання отриманих результатів дозволить підвищити точність вимірювань струму і напруги. Бібл. 8, рис. 3.

Ключевые слова: нестабильность частоты, векторные измерения, погрешность, ток, напряжение.

M.F. Sopol, I.V. Yakovlieva, E.M. Tankevych

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Influence of instability of power grid frequency on accuracy of phasor measurements of current and voltage

Influence of grid frequency changes on accuracy of phasor measurements of current and voltage are investigated and estimated analytically and by numerical simulation. The frequency deviation more than on 0,1 Hz results in the substantial errors of determination of phasor parameters. Use of the got results will allow to increase of accuracy of measurements of current and voltage phasors. References 8, figures 3.

Key words: instability of frequency, phasor measurements, error, current, voltage.

Надійшла 5.08.2013

Received 5.08.2013