

УДК 621.376.5

В.М. Чинков, Ю.О. Белікова

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ОЦІНКА ПОХИБКИ ВИМІРУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ З МОДУЛЯЦІЙНИМ ПЕРЕМНОЖУВАННЯМ НАПРУГИ І СТРУМУ ТИПУ ШІМ-ЧІМ

Досліджено метод вимірювання активної потужності на основі спільного використання широтно-імпульсного і частотно-імпульсного АЦП, та наведено оцінку похибок таких вимірників потужності.

Ключові слова: електрична потужність, широтно-імпульсна модуляція, часово-імпульсна модуляція.

Вступ

Постановка задачі У сучасному розвитку вимірювальної техніки впроваджується багато методів виміру електричної потужності. У даній статті розглянемо більш перспективний з існуючих методів - цифровий метод вимірювання електричної потужності, заснований на одному з варіантів модуляційного перемноження напруги і струму є актуальним для промисловості.

Аналіз літератури У використаній для цієї статті літературі описується метод безпосереднього перемноження напруги та струму [1]. Зустрічається поняття модуляційних типів ШІМ (або ЧвІМ)-ЧІМ, де ШІМ – широтно-імпульсна (ЧвІМ – часово-імпульсна модуляція), ЧІМ – частотно-імпульсна модуляція [1, 2]. В літературі [3, 4] представлені методики, за допомогою яких виконується оцінка статичних інструментальних похибок.

Мета даної статті є оцінка похибки виміру електричної потужності з модуляційним перемноженням напруги і струму типу ШІМ-ЧІМ

Основний матеріал

Розглянемо випадок коли миттєві значення напруги (або струму) у заданих точках дискретизації t_j перетворюються в пропорційний часовий інтервал τ_j , а заповнення цього тимчасового інтервалу здійснюється імпульсами, миттєва частота f_j яких пропорційна миттєвим значенням струму (або напруги) у тих же точках дискретизації. t_j . Такі вимірювальні перетворювачі потужності називають модуляційних типу ШІМ (або ЧвІМ)-ЧІМ, де ШІМ – широтно-імпульсна (ЧвІМ – часово-імпульсна модуляція), ЧІМ – частотно-імпульсна модуляція [1, 2].

На рис. 1 наведено дії такого цифрового вимірювача стосовно активної потужності за спрощеною структурною схемою, наведеною на на якому зображені: ВБ1, ВБ2 – вхідні блоки; ШІМ – широтно-імпульсний модулятор; ЧІМ – частотно-імпульсний модулятор; НД – часовий селектор; РСч – реверсивний лічильник; АЗ – аналізатор знака; БУ – блок управління; БІ – блок індикації. Як ЧІМ може вико-

ристовуватися перетворювач струм-частота або перетворення напруга-частота, при цьому струм $i(t)$ перетворюється в блоці ВБ2 в пропорційне напругу.

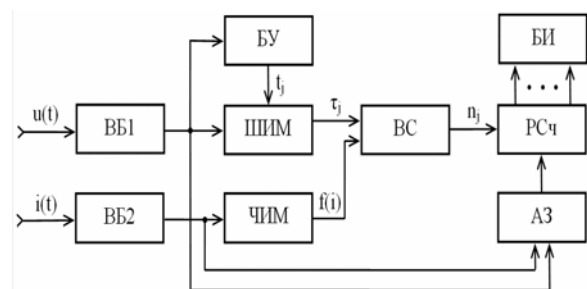


Рис. 1. Структурна схема цифрового модуляційного вимірювача потужності типу ШІМ-ЧІМ

Напруга $u(t)$ і струм $i(t)$ подаються з ділянки електричного кола, в якій вимірюється потужність, на вхідні блоки ВБ1 і ВБ2, де здійснюється їх масштабування.

Напруга $u(t)$ через ВБ1 надходить на ШІМ, що знаходиться в загальмованому стані, і в БО. У режимі вимірювання на ШІМ подаються імпульси запуску з БО в моменти дискретизації t_j , число яких N формується рівномірно на період вхідного сигналу $u(t)$. Струм $i(t)$ через ВБ2 надходить на ЧІМ, де він безперервно перетворюється на пропорційну частоту проходження імпульсів f_j , які надходять на один з входів НД У момент часу t_j ШІМ запускається і на його виході утворюється прямокутний імпульс тривалістю t_j , пропорційної миттєвому значенню напруги $u(t_j)$.

Цим імпульсом відкривається ЗС на час τ_j і через нього на реверсивний лічильник РСч надійде з ЧІМ пакет імпульсів n_j , який записується з урахуванням знака миттєвої потужності $u(t_j)i(t_j)$, що визначається АЗ. Аналогічно процес вимірювань повторюється у всіх N точках дискретизації t_j , тобто $j=1, N$. Знайдемо результат вимірювання по-

тужності та проведемо оцінку тих же помилок, як і для цифрового методу безпосереднього перемноження напруги та струму, враховуючи, що оцінка статичних інструментальних похибок труднощів не викликає, тому що виконується за добре відпрацьованим методикам [3, 4].

Отже, проведемо оцінку похибки дискретизації, похибки квантування і динамічної похибки датування, причому зробимо це тільки для активної потужності, а для реактивної потужності вона виконується аналогічно.

Для оцінки методичної похибки дискретизації справедливий та ж методика, що і в [1], а, отже, і остаточний вираз для відносного значення похибки дискретизації:

$$\delta P_a = \frac{\Delta P_a}{P} = \frac{2(k_{N-1}^u + k_{N-1}^i)}{\cos \varphi}, \quad (1)$$

де P – активна потужність; ΔP_a абсолютна похибка вимірювання активної потужності, обумовлена дискретизацією вхідних сигналів; $k_{N-1}^u = U_{N-1}/U_1$, $k_{N-1}^i = I_{N-1}/I_1$, коефіцієнти спотворення для $(N-1)$ гармоніки напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ відповідно; U_{N-1} , I_1 середньоквадратичні значення $(N-1)$ і першої гармоніки напруги $u(t)$; I_{N-1} , I_1 середньоквадратичні значення $(N-1)$ і першої гармоніки струму $i(t)$; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності. У чисто активній ланцюга $\cos \varphi = 1$
 $\delta P_d = 2(k_{N-1}^u + k_{N-1}^i)$.

З виразу (1) випливає висновок: якщо амплітуди (або середньоквадратичні значення) напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ у ланцюзі із збільшенням їх номери убувають, то похибка дискретизації при вимірюванні активної потужності може бути зроблена досить малою вибором числа точок дискретизації N на період T сигналів, так як убувають коефіцієнти спотворення k_{N-1}^u та k_{N-1}^i .

Оцінка похибки квантування. Запишемо вирази для тимчасового інтервалу τ_j і частоти $f[i(t_j)] = f_j$ в точці дискретизації t_j :

$$\tau_j = K_\tau U(t_j); \quad (2)$$

$$f_j = k_f i(t_j), \quad (3)$$

де k_τ – коефіцієнт перетворення (передачі) ШІМ; k_f – коефіцієнт перетворення (передачі) ЧІМ.

Число (пакет) імпульсів $n_j = \tau_j f_j$ на виході ВС в точці дискретизації t_j є випадковою величиною. Позначимо через $\lfloor \tau_j f_j \rfloor$ – цілу частину, а через $\{\tau_j f_j\}$ – дробову частину числа (n_j) , причому

$0 \leq \{\tau_j f_j\} \leq 1$ Число імпульсів n_j приймає два значення: $\lfloor \tau_j f_j \rfloor$ – з імовірністю $[1 - \{\tau_j f_j\}]$ і $\lfloor \tau_j f_j \rfloor + 1$ – з імовірністю $\{\tau_j f_j\}$ Повне число імпульсів N_p надійшло до РСЧ у всіх N точках дискретизації t_j , $j = 1, N$, рівно алгебраїчній сумі

$$N_p = \sum_{j=1}^N n_j.$$

Це число імпульсів також є випадковою величиною, знайдемо його середнє значення, що є оцінкою математичного сподівання.

Беручи до уваги (2), (3), запишемо

$$\langle N_p \rangle = \sum_{j=1}^N \langle n_j \rangle = \sum_{j=1}^N \tau_j f_j = k_\tau k_f \sum_{j=1}^N u(t_j) i(t_j).$$

Або

$$\langle N_p \rangle = k_\tau k_f N \tilde{P} \quad (4)$$

$\tilde{P} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u(t_j) i(t_j)$ – результат вимірювання активної потужності з урахуванням похибки дискретизації, але без урахування інших складових методичної та інструментальної похибок.

Для активної потужності в ланцюгах синусоїдального струму маємо

$$\langle N_p \rangle = k_\tau k_f N U I \cos \varphi.$$

Обчислимо дисперсію числа імпульсів $\langle N_p \rangle$ за формулою

$$\langle (N_p)^2 \rangle = \sum_{j=1}^N \langle (\Delta n_j)^2 \rangle = \sum_{j=1}^N \{\tau_j f_j\} (1 - \{\tau_j f_j\}).$$

Так як кожен член суми не перевершує $1/4$, то

$$\langle (\Delta N_p)^2 \rangle \leq \frac{1}{2} N. \quad (5)$$

Тому для відносної похибки квантування при вимірюванні активної потужності з урахуванням (4), (5) маємо

$$\delta P_{ea} = \frac{\sqrt{\langle (\Delta N_p)^2 \rangle}}{\langle N_p \rangle} = \frac{1}{2 k_\tau k_f \sqrt{N \tilde{P}}}. \quad (6)$$

Введемо позначення: $k_\tau U_m = \tau_m$, $k_f I_m = f_m$, де U_m, I_m – максимальні значення напруги u_t і струму $i(t)$; – відповідні їм максимальні значення часового інтервалу τ_j і частоти f_j Тоді вираз (6) приймає вигляд

$$\delta P_{ea} = \frac{1}{\tau_m f_m \sqrt{N \cos \varphi}}. \quad (7)$$

Оскільки $\tau_m \langle T/N \rangle$, тоді $\delta P_{ea} \geq \frac{\sqrt{N}}{f_m T \cos \varphi}$.

Оцінка динамічної похибки датування. У модуляційних вимірювальних перетворювачах потужності типу ШІМ-ЧІМ динамічна похибка датування (або апертурна похибка) викликається двома причинами. Одна з них полягає в тому, що час імпульсного аналого-цифрового перетворення (або ШІМ) миттєвих значень напруги $u(t)$ виробляється не ідеально-безпосередньо в моменти часу t_j , тобто без проміжної операції запам'ятовування та зберігання, а в зміщені моменти часу

$$t'_j = t_j + \tau_j = t_j + k_\tau + k_\tau u(t'_j), \quad (8)$$

які визначаються часом перетворення миттєвих значень напруги $u(t_j)$, $j=1, N$, в пропорційні тимчасові інтервали

$$\tau_j = k_\tau u(t'_j) = k_\tau u[t_j + k_\tau u(t'_j)]. \quad (9)$$

де k_τ – коефіцієнт перетворення миттєвого значення напруги $u(t'_j)$ в часовий інтервал τ_j .

Друга причина динамічної похибки датування полягає в усередненні частоти $f(t)$ на виході ЧІМ за час t_j , причому

$$f(t) = k_f i(t), \quad (10)$$

де k_f – коефіцієнт перетворення миттєвого значення струму $i(t)$ в пропорційну частоту проходження імпульсів $f(t)$.

Знайдемо середнє значення частоти $f(t)$ з виходу ЧІМ, яка утворюється на виході ВС за час τ_j його відкритого стану в j -м такті дискретизації, $j=1, N$:

$$\bar{f}(t_j) = \frac{1}{\tau_j} \int_{t_j}^{t_j + \tau_j} f(t') dt'$$

або після підстановки (10)

$$f(t_j) = \frac{k_f}{\tau_j} \int_{t_j}^{t_j + \tau_j} i(t') dt'. \quad (11)$$

Кількість імпульсів n_j , надійшло до j -й точки дискретизації t_j з виходу ВС на вхід РСч, з урахуванням (3), (10) і (11) одно

$$n(t_j) = \tau_j \bar{f}(t_j) = k_\tau u(t'_j) \frac{k_f}{\tau_j} \int_{t_j}^{t_j + \tau_j} i(t')$$

Беручи до уваги (9), маємо

$$n(t_j) = k_f \int_{t_j}^{t_j + \tau_j} i(t') dt'. \quad (12)$$

Тоді код результату вимірювання активної потужності

$$M_p = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N n(t_j).$$

У цьому виразі перейдемо від суми до інтегралу (без урахування похибки дискретизації) і потім, підставляючи (12), маємо

$$\tilde{P} = \frac{1}{T} \int_0^T n(t_j) dt = \frac{k_f}{T} \int_0^T dt \int_{t_j}^{t_j + \tau_j} i(t') dt'.$$

Змінюючи порядок інтегрування, уявімо інтеграл як суму інтегралів по трьом областям у площині змінних (t, t') (рис. 2):

$$\tilde{P} = \frac{k_f}{T} \left[\int_0^{\tau_0} dt i(t') \int_0^{t'} dt + \int_{\tau_0}^T i(t') \int_{t'-\tau}^{t'} dt + \int_T^{T+\tau_T} dt' \left(t' \int_{t'-\tau}^T dt \right) \right]$$

або

$$\tilde{P} = \frac{k_f}{T} \left[\int_0^{\tau_0} t i(t') dt' + \int_{\tau_0}^T t i(t') + \int_T^{T+\tau_T} (T-t'+\tau) i(t') dt' \right] \quad (13)$$

де величина τ є функція, визначається відповідно до формули (8), тобто $\tau = t' - t = k_\tau u(t)$.

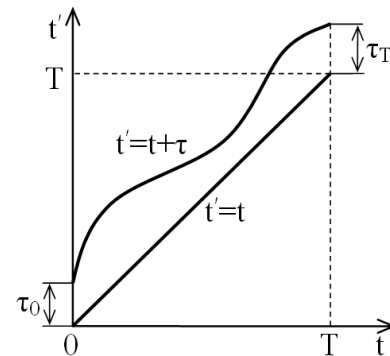


Рис. 2. Области інтегрування у площині (t, t')

Величини τ_0 і τ_T представляють собою час розгортки ШІМ при $t=0$ і $t=T$ відповідно.

Для абсолютної динамічної похибки вимірювання активної потужності маємо

$$\Delta P_t = \tilde{P} - \frac{1}{T} \int_0^T u(t') i(t') dt'.$$

Підставляючи (13), після перетворень отримаємо

$$\Delta P_t = \frac{k_f}{T} \left\{ \int_0^{\tau_0} [t' - k_\tau u(t')] i(t') dt' + \int_T^{T+\tau_T} [T - t' + k_\tau u(t')] i(t') dt \right\}$$

Зсунувши у другому інтегралі початок відліку на час T , знаходимо

$$\Delta P_t = \frac{k_f}{T} \left[\int_0^{\tau_0} [t' - k_\tau u(t')] i(t') dt' - \frac{k_f}{N} \int_0^{\tau_T} [t' - k_\tau u(t'+T)] i(t'+T) dt' \right]$$

З даного співвідношення видно, що для періодичних функцій, для яких справедливі рівності $i(t'+T) = i(t')$, $u(t'+T) = u(t')$ і $\tau_T = \tau_0$, динамічна похибка датування звертається в нуль, тобто $\Delta P_t = 0$. Це означає, що для періодичних сигналів струму $i(t)$ і напруги $u(t)$, перемноження яких здійснюється модуляційними вимірювальними перетворювачами типу ШІМ-ЧІМ, динамічна похибка датування ЧІМ повністю компенсується похибкою усереднення частоти з виходу ЧІМ. Це є важливою перевагою такого методу вимірювання потужності в порівнянні з цифровим методом безпосереднього перемноження струму і напруги [1].

Оцінка сумарної методичної похибки. Відносне значення сумарної методичної похибки вимірювання потужності, заснованого на модуляційному вимірювальному перетворенні типу ШІМ-ЧІМ, визначимо з виразу $\delta P = \delta P_D + \delta P_{KB}$.

Після підстановки в нього співвідношень (1) і (7) для складових δP_D і δP_{KB} маємо

$$\delta P = \left[2(k_{N-1}^u + k_{N-1}^i) + \frac{1}{\tau_m f_m \sqrt{N}} \right] \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (14)$$

Аналіз цього виразу показує, що при зміні максимального тимчасового інтервалу τ_m в допустимих межах мінімум сумарної похибки δP досягається при $\tau_m = \alpha T/N$, де коефіцієнт α визначає час, що відводиться на відновлення ШІМ, при цьому співвідношення (14) набуває вигляду

$$\delta P = \left[2(k_{N-1}^u + k_{N-1}^i) + \frac{\sqrt{N}}{\alpha T f_m} \right] \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (15)$$

Для ілюстрації можливостей апаратної реалізації цифрового методу вимірювання потужності з модуляційним перетворенням типу ШІМ-ЧІМ проведемо оцінку основних параметрів при проектуванні відповідних вимірників потужності для деяких конкретних вихідних даних.

З виразу (15) видно, що такими параметрами є кількість точок дискретизації N на період T напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ і максимальна частота f_m на виході ЧІМ. Оскільки кількість точок дискретизації залежить від гармонійного складу кривих напруги u_t і струму $i(t)$, то при синтезі він повинен бути хоча б наближено відомий, що дозволить знайти квазіоптимального числа точок дискретизації N , що забезпечує мінімум похибки δP . Розглянемо приклади для ті ж трьох характерних варіантів завдання гармонійного складу кривих напруги і струму, що і в [1].

Приклад 1. Нехай в кривих напруги і струму відсутні всі гармоніки з номерами, великими $N_0 - 1$. Для визначення максимального значення частоти f_m на виході ЧІМ скористаємося виразом (15). За умови $N \geq N_0$, що, воно приймає вигляд

$$\delta P = \frac{\sqrt{N}}{\alpha T f_m \cos \varphi}. \quad (16)$$

З цього виразу видно, що кількість точок дискретизації N не має оптимуму. Його необхідно вибирати мінімально можливим, виходячи з гармонічного складу кривих напруги $u(t)$ і струму $i(t)$. Тоді максимальне значення частоти f_m на виході ЧІМ визначається з виразу (16):

$$f_m = \frac{\sqrt{N}}{\delta P \alpha \cos \varphi}. \quad (17)$$

Висновок

1 Отримано оцінку похибок дискретизації і квантування, а також динамічної похибки датування цифрових вимірювачів активної потужності, заснованих на модуляційному перемножуванні струму і напруги типу ШІМ-ЧІМ.

2 Показано, що при такій комбінації двох видів модуляції струму і напруги динамічна похибка датування повністю компенсується, тобто дорівнює нулю, що є принципово новим і важливим результатом в області вимірювальних модуляційних перетворювачів потужності.

3 Отримані оцінки методичних похибок дискретизації і квантування дозволяють синтезувати параметри цифрових модуляційних вимірювачів потужності ШІМ-ЧІМ по гармонійного складу кривих напруги та струму і заданої точності вимірювання потужності.

Список літератури

1. Безикович А.Я., Шапиро Е.З. Измерение электрической мощности в звуковом диапазоне частот / А.Я. Безикович, Е.З. Шапиро. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980.
2. Мартяшин А.М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения / А.М. Мартяшин, Э.К. Шахов, В.М. Шляндин. – М.: Энергия, 1976.
3. Боднер В.А. Приборы первичной информации. – М.: Машиностроение, 1981.
4. Таланчук П.М. Основы теории и проектирования измерительных приборов / П.М. Таланчук, В.Т. Руценко. – К.: Вища шк., 1989.

Надійшла до редколегії 19.01.2011

Рецензент: канд. техн. наук, доц. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ С МОДУЛЯЦИОННЫМ ПЕРЕМНОЖЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ТИПА ШИМ-ЧИМ

В.Н. Чинков, Ю.А. Беликова

Исследован метод измерения активной мощности на основе совместного использования широтно-импульсного и частотно-импульсного АЦП, и приведена оценка погрешностей таких измерителей мощности.

Ключевые слова: электрическая мощность, широтно-импульсная модуляция, времяимпульсная модуляция.

ERRORS ASSESSMENT OF THE ELECTRICAL POWER MEASUREMENT WITH VOLTAGE AND CURRENT MODULATION MULTIPLICATION OF PWM-PFM TYPE

V.N. Chinkov, J.A. Belikova

The active power measurement method that is based on the combined pulse-width and pulse-frequency ADC is investigated, and the errors estimation of such power meters is given.

Keywords: electrical power, pulse-width modulation, pulse-frequency modulation.