

енергоефективність»), 2005. -ч. 4,с. 7–9.

9. V.Yaskiv, A.Abramovitz, K.Smedley, “MagAmp Power Converters with Low Level EMI,” XII International Conference “The Experience of designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013)”, Lviv Polytechnic National University, 19-23 February, 2013, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), UKRAINE, p.388-395.

10. V.Yaskiv, A.Abramovitz, K.Smedley, A.Yaskiv, “MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor,” special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015, p. 28-34.

References

1. V. P. Milovzorov, A. K. Musolin, Diskretnye stabilizatori i formirovateli napryazheniya, M.:Energoatomizdat, 1986.
2. Funkcionalnie ustrojstva system elektropitaniya nazemnoj REA. Podredakciej V. G. Kostikova, M.:Radio i svyaz, 1990.
3. K. Harada, T. Nabeshima, “Applications of magnetic amplifiers to high-frequency dc-to-deconverters,” Proc. of the IEEE, 1988, vol. 76, N. 4, p. 355-361.
4. V. I. Yaskiv, “Matematychna model impulsnogo stabilizatora napruhy n amagnitnyh kluchah,” Tehnichna elektrodynamika, №6, 2002.
5. V. I. Yaskiv, “Novi metody rozrobky impulsnyh dzherel vtorynnogo elektrozhylennia zasobiv kompyuternoi tehniky,” Teoretychna elektrotehnika, Natsionalnyi universytet “Lvivska politehnika,” №56, 2002, 135-141s.
6. V.Yaskiv, “Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies,” Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC’04), Aachen, 2004, — p. 1658–1662.
7. Patent Ukrainy#74199. Kerovane dzhерelo elektrozhylennia z vyhodom na zminnomu strumi.// V. I. Yaskiv, O. P. Gurnik. - Opubl.vBiul. #11, 2005.
8. V. I. Yaskiv, M. M. Yurchenko, O. P. Gurnik, “Eksperymentalne doslidzhennia dynamichnyh harakterystyk napivprovodnykovykh peretvoriuvachiv elektroenergii z vysokochastotnymy magnitnymy pidlyuvachamy,” Tehnichna elektrodynamika (Tematychnyi vypusk “Sylova elektronika ta energoefektyvnist”), 2005, ch. 4, s. 7–9.
9. V. Yaskiv, A. Abramovitz, K. Smedley, “MagAmp Power Converters with Low Level EMI,” XII International Conference “The Experience of designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013)”, Lviv Polytechnic National University, 19-23 February, 2013, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, p.388-395.
10. V. Yaskiv, A. Abramovitz, K. Smedley, A. Yaskiv, “MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor,” special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015, p. 28-34.

Рецензія/Peer review : 9.12.2015 р.

Надрукована/Printed : 19.12.2015 р.

Рецензент: д. т. н., професор Євтух П. С.

УДК 621.317.322

А.В. РУДИК

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ФАЗОЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДИ ЗМІННОЇ НАПРУГИ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ

Амплітуда змінної напруги синусоїдальної форми може бути перетворена в часовий інтервал, що визначається моментами переходу гармонічного сигналу через фіксовані рівні. Запропоновано вдосконалений фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми. Показано використання даного методу для реалізації багатоканальних вимірювачів (при використанні декількох опорних напруг) та для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми. Похибка розроблених вимірювачів визначається переважно точністю вимірювання або перетворення часових інтервалів.

Ключові слова: амплітуда змінної напруги синусоїдальної форми, фазочастотний метод вимірювання, опорна напруга, відношення амплітуд, похибка вимірювання.

A.V. RUDYK

National University of Water and Environment Management, Rivne, Ukraine

PHASE – FREQUENCY METHOD MEASURE THE AMPLITUDE SINUSOIDAL ALTERNATING VOLTAGE

Abstract – The aim of this work is to improve the phase-frequency method of measuring the amplitude sinusoidal alternating voltage (with the possibility of using it to measure the ratio of amplitudes).

The amplitude of the sinusoidal alternating voltage can be converted into a time interval that is determined moments of transition harmonic signal at fixed levels. An improved method for measuring the phase-frequency amplitude sinusoidal alternating voltage. Shown using this method to implement multi-meters (using several reference voltages) and to measure the ratio of variable amplitude sinusoidal voltage. Accuracy meters designed mainly determined by the accuracy of measurement or conversion time intervals.

Thus, the article made autocompensation phase-frequency method for measuring amplitude sinusoidal alternating voltage, modifications which can be used in multi-channel devices and in measuring the ratio of amplitudes.

Keywords: amplitude sinusoidal alternating voltage, phase-frequency measurement method reference voltage, the ratio of amplitudes, measurement error.

Вступ

Пристрій для вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми називається вольтметром змінного струму. Типова структурна схема вольтметра змінного струму складається з

перетворювача змінної напруги в постійну, підсилювача і вимірювального приладу (цифрового або магнітоелектричного вимірювального механізму). Можливі два варіанти побудови вольтметрів змінного струму, що відрізняються своїми характеристиками. За першим варіантом побудови вхідна вимірювана напруга спочатку перетворюється у постійну напругу, яка потім подається на підсилювач постійного струму (ППС) і вимірювальний механізм (ВМ), який фактично є вольтметром постійного струму. Перетворювачем є малоінерційне коло, тому вольтметри з такою структурою можуть працювати в широкому діапазоні частот (від одиниць Гц до одиниць ГГц в залежності від конструкції вимірювального перетворювача). Однак підвищення чутливості таких вольтметрів шляхом збільшення коефіцієнта підсилення ППС $k_{ППС}$ призводить до технічних труднощів, що пов'язані з нестабільністю роботи ППС, яка характеризується дрейфом нуля підсилювача та зміною $k_{ППС}$. Тому у таких вольтметрах, як правило, приймають $k_{ППС} \approx 1$, а основне призначення ППС – забезпечити максимальний вхідний опір вольтметра. Тому верхня межа вимірювань при максимальній чутливості складає десятки – одиниці мілівольт.

У вольтметрах, побудованих за другим варіантом, завдяки попередньому підсиленню, яке реалізується підсилювачем змінного струму (ПЗС), можна збільшити чутливість. Однак реалізація ПЗС з великим коефіцієнтом підсилення, що працюють в широкому діапазоні частот, є доволі складним технічним рішенням. Тому такі вольтметри мають відносно вузький діапазон робочих частот з верхньою робочою частотою порядку (1...10) МГц, а верхня межа вимірювань при максимальній чутливості складає сотні – десятки мікрівольт [1].

Тому очевидно, що недоліком першого варіанту побудови вольтметра змінного струму є низька чутливість, а другого – вузький частотний діапазон. Тому для того, щоб підвищити точність вимірювань амплітуди змінної напруги на високих частотах (більше 10 МГц) необхідно вийти за межі обох цих варіантів побудови [1].

Постановка задачі

Цікавий фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми запропоновано Гульчаком Ю.П. в роботі [2]. При реалізації даного методу часовий інтервал τ (рис.1) визначається часовими моментами переходу гармонічного сигналу через рівні $+U_0$ та $-U_0$. Також в роботі [2] одержано співвідношення для амплітуди напруги з перетворенням в часовий інтервал:

$$U_m = U_0 \operatorname{cosec} \left(\frac{2\pi\tau}{4T} \right) = \frac{U_0}{\sin \left(\frac{2\pi\tau}{4T} \right)}, \quad (1)$$

де T – період вимірюваної напруги;
 U_0 – опорна напруга.

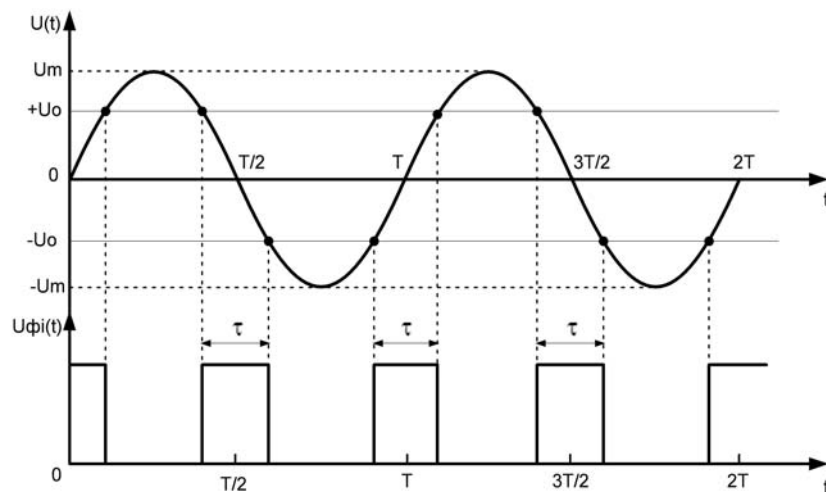


Рис. 1. Часові діаграми роботи пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми

Однак співвідношення (1) є некоректним, тому що аргумент тригонометричних функцій вдвічі зменшений. Тому вірним співвідношенням для визначення амплітуди напруги при перетворенні в часовий інтервал є таке:

$$U_m = U_0 \operatorname{cosec} \left(\frac{\pi\tau}{T} \right) = \frac{U_0}{\sin \left(\frac{\pi\tau}{T} \right)}, \quad (2)$$

Похибка вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми U_m визначається похибкою задавання опорної напруги U_0 , похибкою вимірювання часового інтервалу τ та нелінійною

залежністю між U_m та U_0 .

В роботі [3] авторами запропоновано автокомпенсаційний фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми, сутність якого зводиться до наступного. Часовий інтервал τ визначається точками переходу випрямленого гармонічного сигналу через рівень U_0 . При цьому шпаруватість отриманої імпульсної послідовності буде дорівнювати $q = 2$ тільки у випадку, коли

$U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$. У такому разі постійна складова імпульсної послідовності буде визначатися як

$U_{0,imn} = \frac{U_{m,imn}}{q} = \frac{U_{m,imn}}{2}$ і не буде дорівнювати нулю, як вказано в роботі [3]. Тому і послідовність

наступних перетворень сигналів не призведе до отримання результату вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми.

Метою даної роботи є вдосконалення фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми (з можливістю використання його до вимірювання відношення амплітуд).

Розв'язання поставленої задачі

Для компенсації вказаних недоліків в даній роботі автором запропоновано вдосконалений автокомпенсаційний фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми. Згідно із запропонованим методом потрібно сформувати дві імпульсні послідовності (на рис. 2 їм відповідають напруги $U_{\Phi I,1}(t)$ та $U_{\Phi I,2}(t)$), тривалості імпульсів яких визначаються інтервалом часу між моментами збігу вимірюваної змінної напруги синусоїдальної форми $U(t)$ з позитивною постійною опорною напругою $+U_0$. При формуванні напруг $U_{\Phi I,1}(t)$ та $U_{\Phi I,2}(t)$ потрібно врахувати, що напруга $U_{\Phi I,2}(t)$ є проінвертованою напругою $U_{\Phi I,1}(t)$. Тому що метод вимірювання є автокомпенсаційним, то рівень опорної напруги $+U_0$ в процесі вимірювання буде змінюватися доти, доки не буде дорівнювати діючому значенню змінної напруги синусоїдальної форми $+U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$. У цьому разі тривалості імпульсних

послідовностей $\tau_1 = \frac{3T}{4}$ та $\tau_2 = \frac{T}{4}$, однак при будь-якому значенні $+U_0$ виконується умова $\tau_1 + \tau_2 = T$.

Структурна схема пристрою, в якому реалізовано запропонований вдосконалений фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми, наведена на рис. 3. Запропонований пристрій складається з вхідного підсилювача, формувача імпульсів, в якості якого можна використовувати компаратор на операційному підсилювачі, керованого джерела опорної напруги U_0 , двох інтеграторів, інвертора, підсилювача з фіксованим коефіцієнтом підсилення $K = 3$, елементу порівняння та вимірювача постійної напруги.

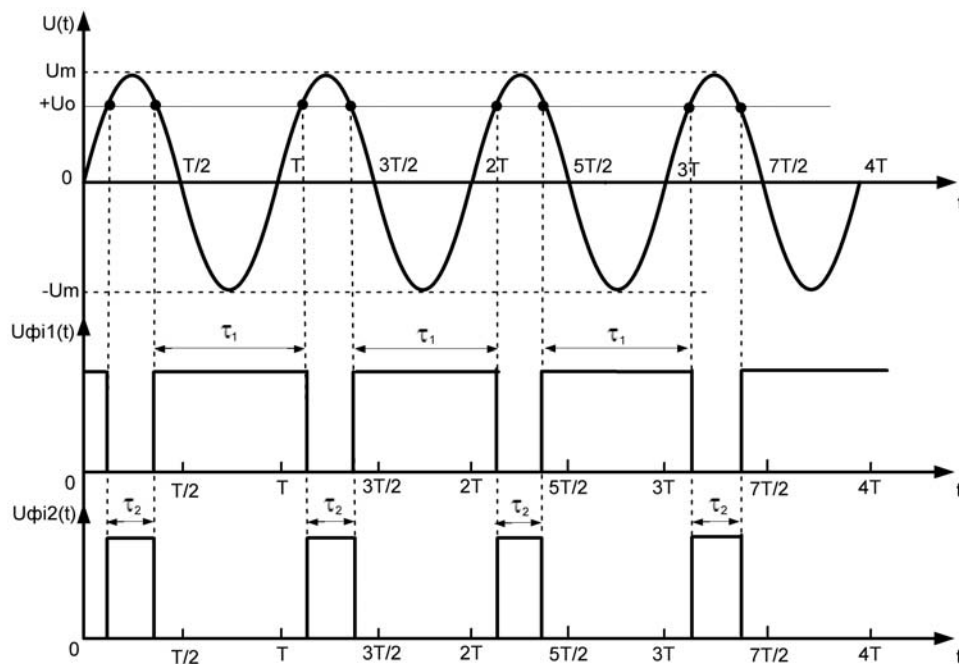


Рис. 2. Часові діаграми роботи пристрою для реалізації вдосконаленого фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми

Пристрій, в якому реалізовано запропонований вдосконалений фазочастотний метод вимірювання

амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми (рис. 3), працює таким чином. На вхід вхідного підсилювача, який призначений для узгодження джерела вхідного сигналу з вимірювачем за напругою, має високий вхідний опір та коефіцієнт передачі напруги $U_{BII} = 10^n$, де $n = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$, подається змінна напруга синусоїдальної форми $U_{BX}(t) = U_{m.BX} \sin(\omega t + \phi)$. Вихідний сигнал вхідного підсилювача має вигляд $U(t) = U_m \sin(\omega t + \phi)$, при цьому враховується значення масштабного коефіцієнта

$$U_{BII} = \frac{U_m}{U_{m.BX}} = 10^n, \text{ яке є меншим одиниці для великих амплітуд вхідного сигналу і більшим одиниці для малих.}$$

Далі формувач імпульсів (компаратор) порівнює амплітуду вихідного сигналу вхідного підсилювача з деяким значенням опорної напруги U_0 керованого джерела і за допомогою інвертора формує дві імпульсні послідовності $U_{\Phi I.1}(t)$ та $U_{\Phi I.2}(t)$, зображені на рис. 2 (при цьому необхідно, щоб амплітуди цих імпульсних послідовностей були однаковими). Після цього вихідні імпульсні послідовності компаратора та інвертора за допомогою інтеграторів 1 та 2 перетворюються в рівні постійної напруги

$$U_{I.1} = \frac{U_{m.\Phi I}}{T} \cdot \tau_1 = \frac{U_{m.\Phi I}}{2\pi} \cdot \omega \tau_1 \text{ та } U_{I.2} = \frac{U_{m.\Phi I}}{T} \cdot \tau_2 = \frac{U_{m.\Phi I}}{2\pi} \cdot \omega \tau_2, \text{ де } U_{m.\Phi I} - \text{амплітуда імпульсів вихідних}$$

сигналів компаратора та інвертора, ω – циклічна частота вхідної напруги. Вихідна напруга інтегратора 2 підсилюється з фіксованим коефіцієнтом підсилення 3, набуває значення $U_{II} = \frac{3U_{m.\Phi I}}{2\pi} \cdot \omega \tau_2$ і разом з напругою $U_{I.1}$ подається на елемент порівняння, вихідна напруга якого дорівнює

$$U_{EP} = U_{II} - U_{I.1} = \frac{U_{m.\Phi I}}{2\pi} \cdot \omega (3\tau_2 - \tau_1). \text{ Ця вихідна напруга елемента порівняння змінює опорну напругу } U_0$$

керованого джерела доти, доки не буде виконуватися умова $3\tau_2 = \tau_1$, що досягається тоді, коли опорна напруга буде дорівнювати діючому значенню змінної напруги синусоїдальної форми $U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$. Таким

чином, отриманий результат вимірювання (постійна напруга, виміряна вимірювачем постійної напруги) буде мати вигляд:

$$U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_{m.BX} \cdot 10^n}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_{m.BX} = \frac{\sqrt{2} U_0}{10^n}. \quad (3)$$

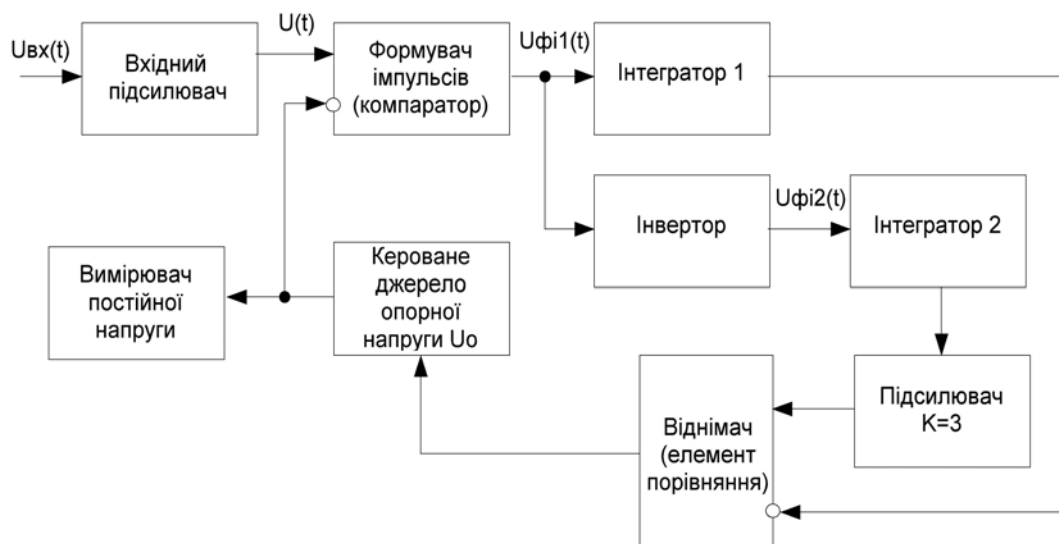


Рис. 3. Структурна схема пристрою для реалізації вдосконаленого фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми

Похибка вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми в даному пристрої буде визначатися переважно точністю вимірювання опорної напруги U_0 (за умови закінчення процесів регулювання у вимірювальному пристрої).

Розглянуту методику вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми можна використовувати в пристрої без автоматичної компенсації, якщо застосувати два фіксованих рівня опорної напруги (рис. 4). В цьому випадку у вимірювальному пристрої (рис. 5) компаратори 1 та 2 формують імпульси тривалістю $\frac{T}{2} + \tau_1$ та $\frac{T}{2} + \tau_2$, при цьому менша тривалість імпульсу відповідає меншому значенню

опорної напруги (на рис. 4 $\Delta t_1 = \frac{T}{2} + \tau_1$, $\Delta t_2 = \frac{T}{2} + \tau_2$). Амплітуда змінної напруги синусоїдальної форми з співвідношення (2) пропорційна тривалості часових інтервалів τ_1 та τ_2 , тобто:

$$U_m = \frac{U_{01}}{\sin\left(\frac{\pi\tau_1}{T}\right)} = \frac{U_{01}}{\sin\left(\frac{\pi(\Delta t_1 - 0.5T)}{T}\right)} = \frac{U_{01}}{\sin\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T} - \frac{\pi}{2}\right)} = -\frac{U_{01}}{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T}\right)} = -\frac{U_{02}}{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_2}{T}\right)}, \quad (4)$$

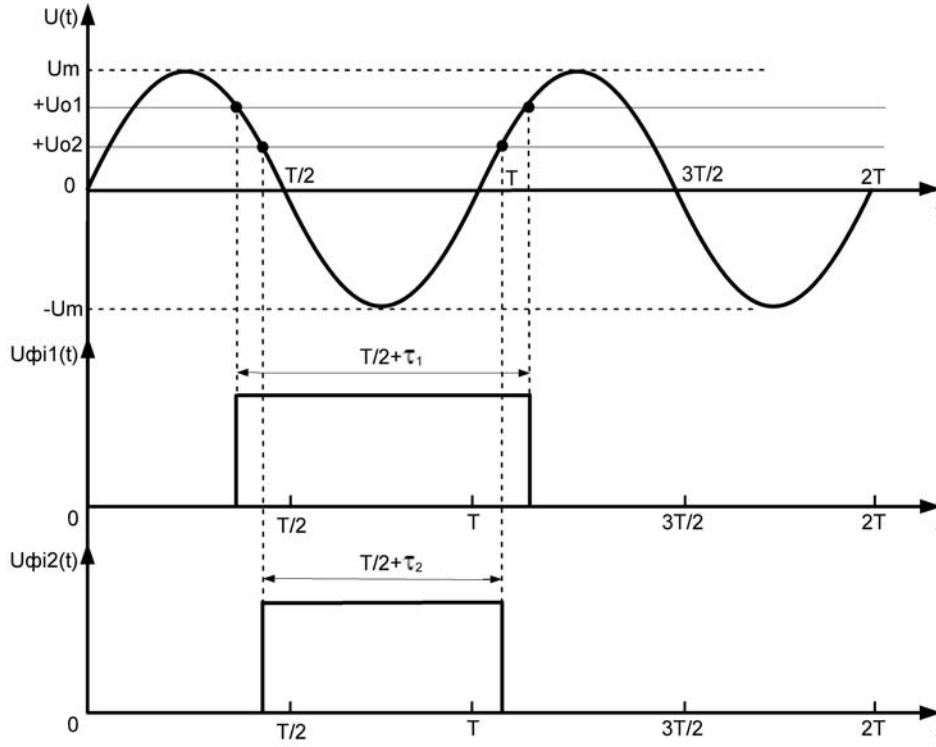


Рис. 4. Часові діаграми роботи пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми з двома опорними напругами

З останнього співвідношення

$$\frac{U_{01}}{U_{02}} = \frac{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T}\right)}{\cos\left(\frac{\pi\Delta t_2}{T}\right)}, \quad (5)$$

тобто рівень вихідної постійної напруги кожного інтегратора пропорційний часовому інтервалу Δt_i .

Таким чином, в схемі вимірювача (рис. 5) реалізований двоканальний пристрій, в якому амплітуду змінної напруги синусоїдальної форми можна визначати за даними кожного з каналів. Збільшивши кількість опорних напруг (та, відповідно, кількість каналів), можна реалізувати багатоканальний пристрій, в якому застосовано статистичні методи зменшення випадкової складової сумарної похибки вимірювання.

Також розглянуту методику вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми можна використовувати для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми (рис. 6). В цьому випадку у вимірювальному пристрої (рис. 7) компаратори 1 та 2 формують імпульси тривалістю $\frac{T}{2} + \tau_1$ та $\frac{T}{2} + \tau_2$, при цьому менша тривалість імпульсу відповідає більшому значенню амплітуди змінної

напруги синусоїдальної форми (на рис. 6 $\Delta t_1 = \frac{T}{2} + \tau_1$, $\Delta t_2 = \frac{T}{2} + \tau_2$).

Зв'язок між амплітудами змінних напруг синусоїдальної форми та значенням опорної напруги також буде пропорційним тривалості часових інтервалів τ_1 та τ_2 , тобто:

$$U_0 = -U_{m1} \cos\left(\frac{\pi\Delta t_1}{T}\right) = -U_{m2} \cos\left(\frac{\pi\Delta t_2}{T}\right). \quad (6)$$

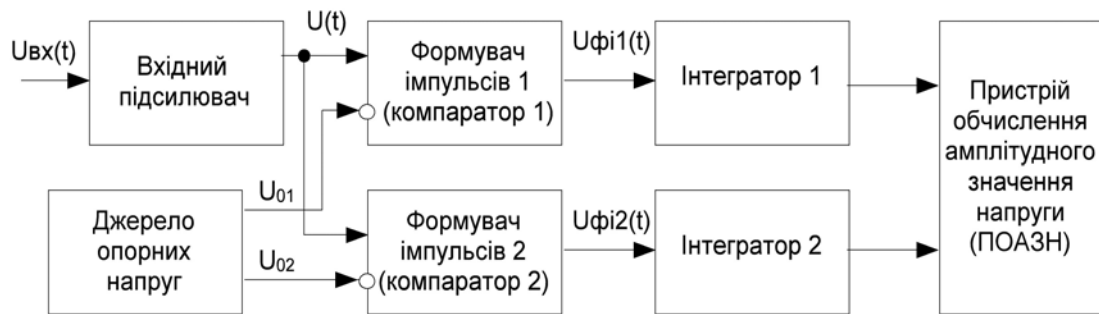


Рис. 5. Структурна схема пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми з двома опорними напругами

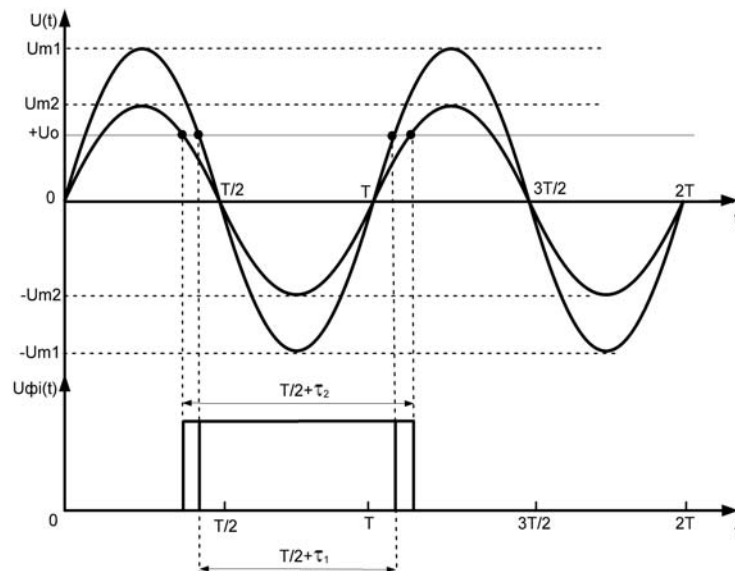


Рис. 6. Часові діаграми роботи пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми

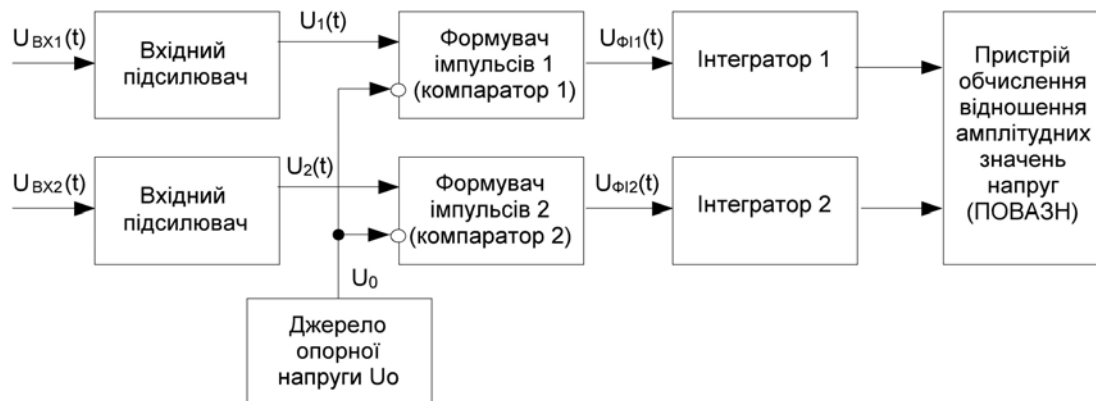


Рис. 7. Структурна схема пристрою для реалізації фазочастотного методу вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми

З останнього співвідношення відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми

$$\frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \frac{\cos\left(\frac{\pi \Delta t_2}{T}\right)}{\cos\left(\frac{\pi \Delta t_1}{T}\right)}. \quad (7)$$

Таким чином, відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми перетворюється у відношення постійних напруг (вихідних напруг інтеграторів), пропорційних тривалості часових інтервалів Δt_1 та Δt_2 .

Похибка вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми (або відношення амплітуд змінних напруги синусоїдальної форми) в пристроях рис. 5 та рис. 7 буде визначатися в основному точністю вимірювання (або перетворення) часових інтервалів Δt_1 та Δt_2 .

Висновки

1. Амплітуда змінної напруги синусоїдальної форми може бути перетворена в часовий інтервал, що визначається моментами переходу гармонічного сигналу через фіксовані рівні.
2. Запропоновано вдосконалений фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми.
3. Показано, що дану методику можна використовувати як для реалізації багатоканальних вимірювачів (при використанні декількох опорних напруг), так і для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми.
4. Похибка розроблених вимірювачів буде визначатися в основному точністю вимірювання (або перетворення) часових інтервалів (імпульсних послідовностей).

Література

1. Основы метрологии и электрические измерения / [Авдеев Б. Я., Антонюк Е. М., Душин Е. М. и др.]; под ред. Е. М. Душина. – [6-е изд., перераб. и доп.]. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. – 480 с.
2. Гульчак Ю. П. Розробка і дослідження програмно-апаратних методів вимірювання часових параметрів сигналів в пристроях фазометричних систем: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.08 “Радіовимірювальні прилади” / Ю. П. Гульчак. – Вінниця, 1996. – 17 с.
3. Троянов Г. Ю. Огляд методів вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми / Г. Ю. Троянов, І. В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: міжнар. наук. – техн. конф., 27-29 травня 1999 р.: тези доповіді. – Хмельницький, 1999. – С. 91-94.

References

1. Osnovi metrologii i elektricheskie izmereniya / [Avdeev B. Ya., Antonyuk E. M., Dushin E. M. i drugiye]; Ed. by E. M. Dushin. – [6-e izd., pererab. i dop.]. – Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1987, 480 p. [in Russian].
2. Gulchak Yu. P. Rozrobka i doslidzennya programno-aparatnih metodiv vimiryuvannya chasovih parametriv signaliv v pristroyah fazometrichnih system: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk: spets. 05.11.08 “Radiovimiryuvalni prilady” / Yu. P. Gulchak. – Vinnitsa, 1996, 17 p. [in Ukrainian].
3. Troyanov G. Yu. Oglyad metodiv vimiryuvannya amplitudy zminnoyi naprugi sinusoidalnoyi formi / G. Yu. Troyanov, I. V. Trotsishin // Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih protzesah: mizhnar. nauk. – tehn. konf., 27-29 travnya 1999 r.: tezi dopovidi. – Khmel'nitskiy, 1999, pp. 91-94. [in Ukrainian].

Рецензія/Peer review : 20.10.2015 р.

Надрукована/Printed : 15.12.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Древецький В.В.