

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ЗНАЧНІЙ РЕАКТИВНІЙ СКЛАДОВІЙ НАВАНТАЖЕННЯ ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ТОЧКИ ШУНТА

ACCURACY ENHANCEMENT OF ACTIVE POWER MEASUREMENT WITH SIGNIFICANT REACTIVE LOAD BY CREATION OF THE SHUNT MIDDLE POINT

Вдовиченко А. В.¹, аспірант, Туз Ю.М.², д.т.н. проф.,

*1 – ТОВ «Росток-Прилад»; НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського», кафедра автоматизації експериментальних досліджень;*

*2 – НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра
автоматизації експериментальних досліджень*

Анотація

В статті розглядається широкополосний ватметр прохідної потужності з корекцією похибки від власного споживання для вимірювання активної потужності на фоні великих реактивних складових в радіочастотному діапазоні. Об'єктами досліджень є електромагнітні елементи (дроселі / трансформатори), що працюють на високих частотах до одиниць мегагерців і мають сильно спотворенні форми сигналів. Описані особливості побудови вхідної ланки ватметра прохідної потужності з середньою точкою шунта. Представлені формули розрахунку активної потужності з врахуванням впливу реактивної складової шунта. Проведено моделювання вхідної ланки ватметра прохідної потужності, що містить середньою точку шунта створену додатковим резистивним подільником.

Abstract

Broadband transfer power wattmeter with the correction of the own consumption error for measuring the active power against the background of large reactive components in the radio frequency range is considered in article. Objects of research are electromagnetic elements (chokes / transformers), operating at high frequencies till units of megahertz and are inherent in the strongly distorted forms of signals. Features of the construction of the input link of the wattmeter of transfer power with the middle point of the shunt are described. Active power with taking into account the impact of the shunt reactive component calculation formulas is presented. Transfer power wattmeter input link, which contains the middle point of the shunt created by the additional resistive divider simulation, is performed.

To obtain the power value, the RMS values of voltages are calculated by the proposed formulas. The voltage, load current and cosine of the phase shift between them are also computed as well as the error caused by the reactive component of the shunt line and the active power value.

The advantages of such a wattmeter design are the next:

- the possibility of expanding the frequency range by compensating for the influence of the reactive component of the shunt resistance on the result of measurement; that can be achieved not only by hardware (reducing the shunt inductance), but also by introducing a calculated correction after measuring the values of the active and reactive shunt components;
- the dimensions of the input device elements can be optimized according to the criterion of maximum broadband, since the error from own consumption is taken into account;
- in the diagram of figure 3 one low-level shunt is used, which reduces the cost of a wattmeter;
- the additive errors of the voltage transformation channel are minimized, which increases the sensitivity.

Ключові слова

Вимірювання потужності, активна потужність, радіочастотний діапазон, фазовий зсув, корекція похибок власного споживання, втрати, шунт.

Keywords

Power Measurement, Active Power, Radio Frequency Range, Phase Noise, Correction of Own Consumption Errors, Losses, Shunt.

1. Вступ

Проведене дослідження покликане створити недорогий та надійний метрологічний інструмент для вимірювання активної потужності на фоні великих реактивних складових в радіочастотному діапазоні.

Даний інструмент відноситься до засобів вимірювання потужності електричного струму, і може бути використаний, наприклад, при виробництві ватметрів для вимірювання потужності з підвищеними параметрами точності. Також, прилад дозволить вимірювати потужність втрат (активну потужність) [1] в різноманітних реактивних елементах, наприклад, індуктивностях, які використовуються в імпульсних перетворювачах енергії. Проблема збільшення ККД інверторів зводиться до завдання - знизити втрати, в дросельних елементах, тому що на сьогодні основні втрати змістилися від напівпровідникових ключів в бік реактивних елементів. Використання даного ватметра буде актуальним для зменшення таких втрат при розробці та контролі на виробництві індуктивностей та інверторів.

2. Недоліки відомих рішень

Для проведення вимірювань такого типу існують різні види пристроїв, які мають, як свої переваги так і певні недоліки. Так, ватметр подібного призначення [2], що включає пристрої підсумовування та віднімання, перший та другий термоелектричні перетворювачі, два частотних (широтно-імпульсних) пристрої та диференціальний формувач. Недоліком цього пристрою є неквадратичність та нестабільність функції перетворення термоелектричних перетворювачів, що знижує точність перетворення електричної потужності в частоту імпульсів, отже зменшує точність вимірювання потужності.

Ватметр [3], де вхідний пристрій виконано з розподіленим шунтом та послідовно сполученим зі спільною точкою частин розподіленого шунта подільником напруги, причому шунт виконаний з можливістю забезпечення інваріантності напруги та струму щодо власного споживання за допомогою вагових коефіцієнтів. Недоліком цього пристрою є складність виготовлення з високою точністю низькоомних опорів частини шунта та вплив реактивної складової опору ланки шунта на кінцевий результат вимірювання при розширенні частотного діапазону, що зменшує точність вимірювання потужності.

3. Мета роботи

Метою роботи є створення ватметра прохідної потужності, що буде позбавлений вищезазначених недоліків, та матиме наступні переваги: можливість розширити частотний діапазон шляхом компенсування впливу на кінцевий результат вимірювання реактивної складової опору ланки шунта; значення елементів вхідного пристрою може бути оптимізовано за критерієм максимальної широкосмуговості; врахована похибка від власного споживання; застосовується один низькоомний шунт; мінімізуються адитивні похибки каналу перетворення напруг.

4. Матеріали та методи

4.1 Опис ватметра прохідної потужності.

Канали ватметра прохідної потужності стають дуже чутливими до фазових зсувів при високих частотах. Тому важливим є правильна побудова вхідних ланок і таке перетворення, яке забезпечить операції з модулями сигналів без врахування фазових зсувів. Для прикладу розглянемо ватметр [4], [5] змінного струму, який зображеного на рис. 1.

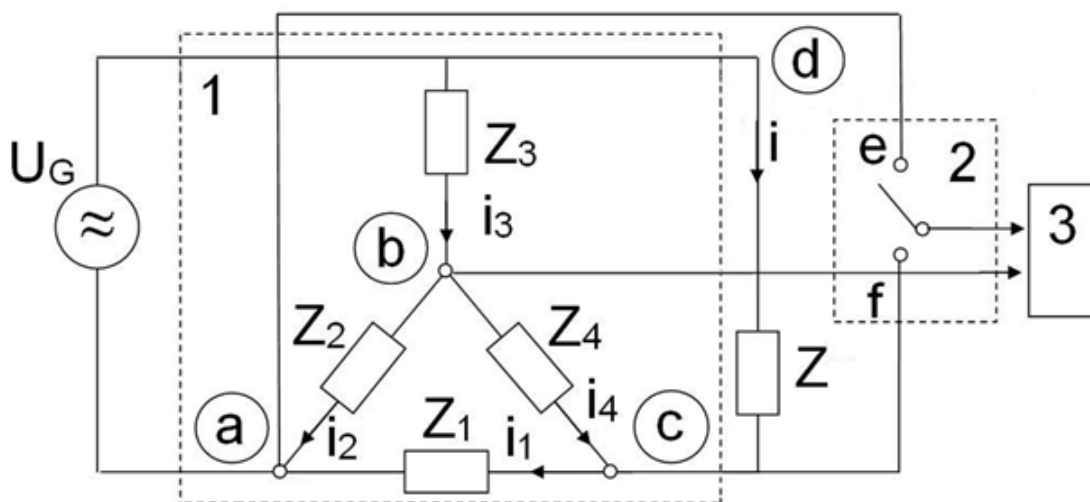


Рис. 1. Ватметр прохідної потужності, де: 1 - вхідний пристрій на основі елементів активного електричного опору, 2 - комутатор, 3 - квадратичний детектор та блок обчислення
 Figure 1 - Transfer power wattmeter, where: 1 - an input device based on elements of active electric resistance, 2 - a switch, 3 - quadratic detector and a block of calculations

Такий ватметр в порівнянні з аналогами характеризується тим, що вхідний пристрій забезпечує позбавлення впливу похибки від власного споживання, підвищення точності вимірювання потужності та збереження високого коефіцієнту перетворення, але зберігається такий недолік, як сильний вплив реактивної складової опору ланки шунта на кінцевий результат вимірювання при розширенні частотного діапазону. Таким чином, необхідно оптимізувати вхідний пристрій для підвищення точності в широкому діапазоні частот.

Значення активної потужності при умові, що U_{ba} , U_{bc} є діючими значенням відповідних напруг, а у Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 відсутні реактивні складові, розраховується по формулі:

$$P = \frac{Z_3}{Z_1 Z_2} \cdot (U_{ba}^2 - \left(1 + \frac{Z_1}{Z_4}\right)^2 U_{bc}^2) \quad (1)$$

Аналіз вхідної ланки вказує, що наявність реактивних складових у Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 призведе до невиконання умови і вимагатиме оптимізації вхідного пристрою.

Вдосконалення такого ватметра змінного струму можливе шляхом виконання вхідного пристрою ватметра із створенням середньої точки шунта, що досягається або формуванням шунта двома однаковими шунтами з опорами рівними половині номінального опору шунта, представлену на рис. 2, або створенням середньої точки за допомогою додаткового резистивного подільника, представлену на рис. 3. Це дозволяє отримати технічний результат, позбавлення впливу похибки від власного споживання, підвищення точності вимірювання потужності збереження високого коефіцієнту перетворення та розширення частотного діапазону, що може бути досягнуто не тільки апаратними засобами (зменшення індуктивності шунта), а й введенням розрахункової програмної корекції похибки спричиненої впливом реактивної компоненти шунта після вимірювання значень активної і реактивної складової шунта, при можливості проводити всі вимірювання відносно однієї точки

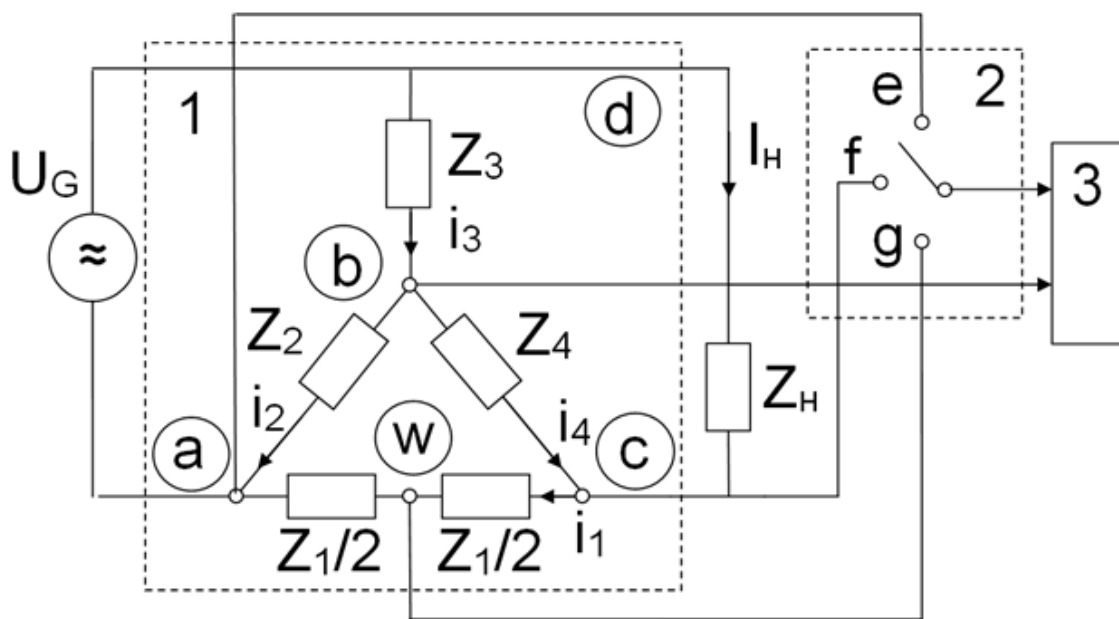


Рис. 2. Вхідна ланка ватметра прохідної потужності, що містить середню точку шунта створену діленням шунта на дві рівні частини
 Figure 2 – Transfer power wattmeter input-link model which contains the midpoint of the shunt created by dividing the shunt into two equal parts

В обох схемах на рис. 2 та 3 ватметр змінного струму містить вхідний пристрій 1 на основі елементів активного електричного опору Z_1 , Z_2 , Z_3 та Z_4 з'єднаний через комутатор 2 з блоком вимірювання 3. У ватметрі змінного струму на рис. 2 елемент активного електричного опору Z_1 побудований з двох частин рівних $Z_1/2$. У ватметрі змінного струму на рис. 3 паралельно елементів активного електричного опору Z_1 підключений

допоміжний подільник з двох однакових опорів Z_5 для створення середньої точки, при його побудові, має виконуватись умова $Z_5 \gg Z_1$, тоді кінцевий результат вимірювання в обох схемах є однаковими

Ватметр змінного струму працює таким чином. При знаходженні комутатора 2 у положенні «e» на блок вимірювання 3 подається напруга U_{ba} , пропорційна геометричній сумі сигналів струму і напруги навантаження.

При знаходженні комутатора 2 у положенні «f» на блок вимірювання 3 подається напруга U_{bc} , пропорційна геометричній різниці сигналів струму і напруги навантаження.

При знаходженні комутатора 2 у положенні «g» на блок вимірювання 3 подається напруга U_{bw} , пропорційна напрузі навантаження.

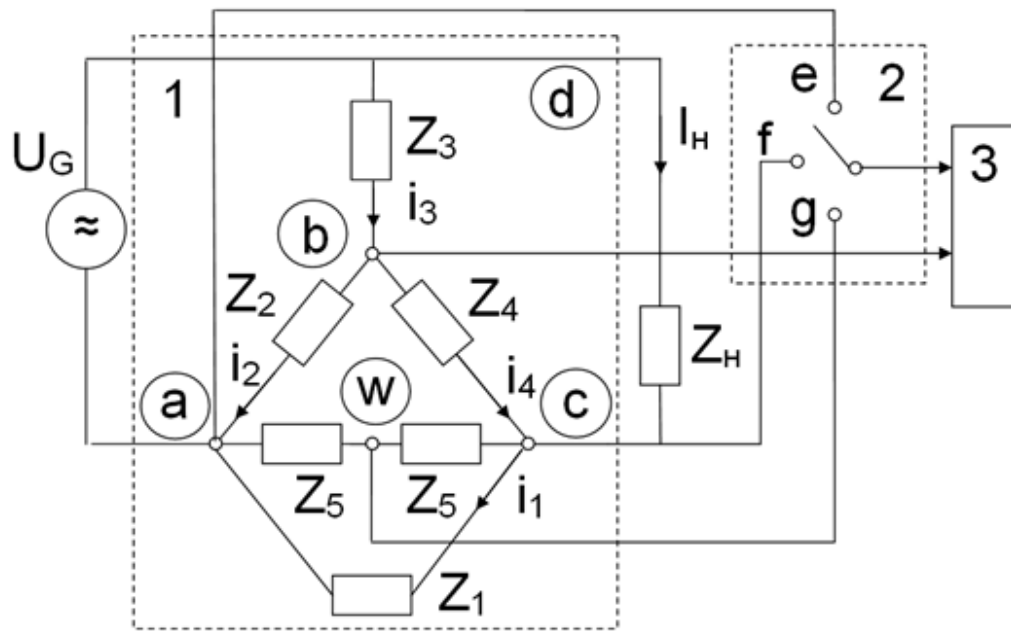


Рис. 3. Вхідна ланки ватметра прохідної потужності, що містить середню точку шунта створену додатковим резистивним подільником

Figure 3 - Transfer power wattmeter input-link which contains the midpoint of the shunt created by the additional resistive divider

При наявності реактивної складової в опорі шунта Z_1 , необхідно проводити корекцію, спричинену наявністю кута φ_{z1} . Якщо шунт являє собою послідовне з'єднання опору R_1 та індуктивності L_1 , причому індуктивність є незмінна та заздалегідь виміряна, тоді вимірюючи частоту F змінного струму шунта можна визначити косинус кута φ_{z1} , що розраховується за формулою:

$$\cos \varphi_{z1} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + (2\pi \cdot F \cdot L_1)^2}} \quad (2)$$

Діюче значення напруги навантаження U_H , розраховується по формулі:

$$U_H = \frac{Z_3}{Z_2} \sqrt{(2U_{bw})^2 - 4 \left(\frac{Z_2(Z_3+Z_4)}{Z_3Z_4} - 1 \right) \cdot \left(\left(\frac{1}{2} U_{ba} \right)^2 - (U_{bw})^2 - \left(\frac{1}{2} U_{bc} \right)^2 \right) + \left(\left(\frac{Z_2(Z_3+Z_4)}{Z_3Z_4} - 1 \right) U_{bc} \right)^2} \quad (3)$$

Варто зауважити, що в більшості випадків, при реактивному характері навантаження, та при умові, $Z_1 \ll Z_4$, сигнал діючого значення напруги навантаження буде рівним $U_H \approx 2 \frac{Z_3}{Z_2} U_{bw}$

Струм навантаження, знаходиться використовуючи формулу:

$$i_H = \frac{1}{Z_1} \sqrt{(U_{ba})^2 \left(1 + \frac{Z_3(Z_1+Z_4)}{Z_2(Z_4+Z_3)}\right) + \left(\frac{Z_1+Z_4}{Z_4}\right)^2 (U_{bc})^2 \left(1 + \frac{Z_2(Z_4+Z_3)}{Z_3(Z_1+Z_4)}\right) - \left(\frac{Z_2}{Z_3} U_H\right)^2 \left(\frac{Z_3(Z_1+Z_4)}{Z_2(Z_4+Z_3)}\right)} \quad (4)$$

Значення $\cos(\varphi - \varphi_{Z1})$ з врахуванням кута φ між U_H та i_H , що визначається реактивною складовою опору Z_H , та кута φ_{Z1} , що визначається дією реактивної складової опору шунта Z_1 на струм i_H .

Корекція впливу спричиненого зсувом фази φ_{Z1} буде розраховуватись по формулі:

$$\cos\varphi = \cos(\varphi - \varphi_{Z1}) \cdot \cos\varphi_{Z1} - \sqrt{1 - \cos^2(\varphi - \varphi_{Z1})} \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi_{Z1}} \quad (5)$$

Активна потужність, при наявності реактивної складової в опорі шунта, буде розраховуватись по формулі:

$$P = i_H U_H \cos\varphi \quad (6)$$

6.2 Моделювання вхідної ланки ватметра прохідної потужності.

Схема на рис. 2 зберігає такий недолік, як складність виготовлення з високою точністю низькоомних опорів частин шунта, таким чином, для подальшого розгляду варто використовувати схему на рис. 3. В зв'язку із складністю метрологічної перевірки подібної схеми на частотах вище 1 МГц, доцільно провести моделювання в пакеті Multisim з наступним розрахунком отриманих при моделюванні даних по формулам (1)-(6).

Для проведення моделювання вхідної ланки ватметра прохідної потужності, що містить середню точку шунта створену додатковим резистивним подільником в системі Multisim, значення резисторів вхідної ланки розраховується наступним чином:

- розраховується опір шунта, виходячи з номінального значення струму навантаження та номінального падіння напруги на шунті $U_{шн}$.
- обирається опір частини допоміжного подільника $Z_2 = Z_4$, виходячи з оптимальної частотної характеристики;
- вибираються два опори Z_5 другого допоміжного подільника з врахуванням $Z_5 \gg Z_1$ та $Z_5 > Z_4$;
- опір частини подільника напруги Z_3 розраховують, виходячи з номінальної напруги навантаження так, щоб падіння напруги на частини допоміжного шунта Z_4 , дорівнювало номінальному падінню напруги на шунті.

Таким чином при вибраних , та , можна провести розрахунок схеми, моделювання якої представлено на рис.4. В моделі шунт формується послідовним з'єднанням активного опору $R_1 = 100$ мОм та паразитної індуктивності $L_1 = 0,5$ нГн, діюча напруга генератора $U_G = 100$ В, опори вхідної ланки мають значення $R_2 = R_4 = 100$ Ом, $R_3 = 49950$ Ом, до кожного з яких під'єднано послідовно паразитну індуктивність в 4 нГн, додатковий подільник, який формує середню точку шунта створений з двох послідовно з'єднаних резисторів 10кОм з послідовно під'єднаними паразитними індуктивностями в 4 нГн.

Результати моделювання в системі Multisim та розрахунків актиної потужності з використанням формул (1) - (6) представлені в табл.1.

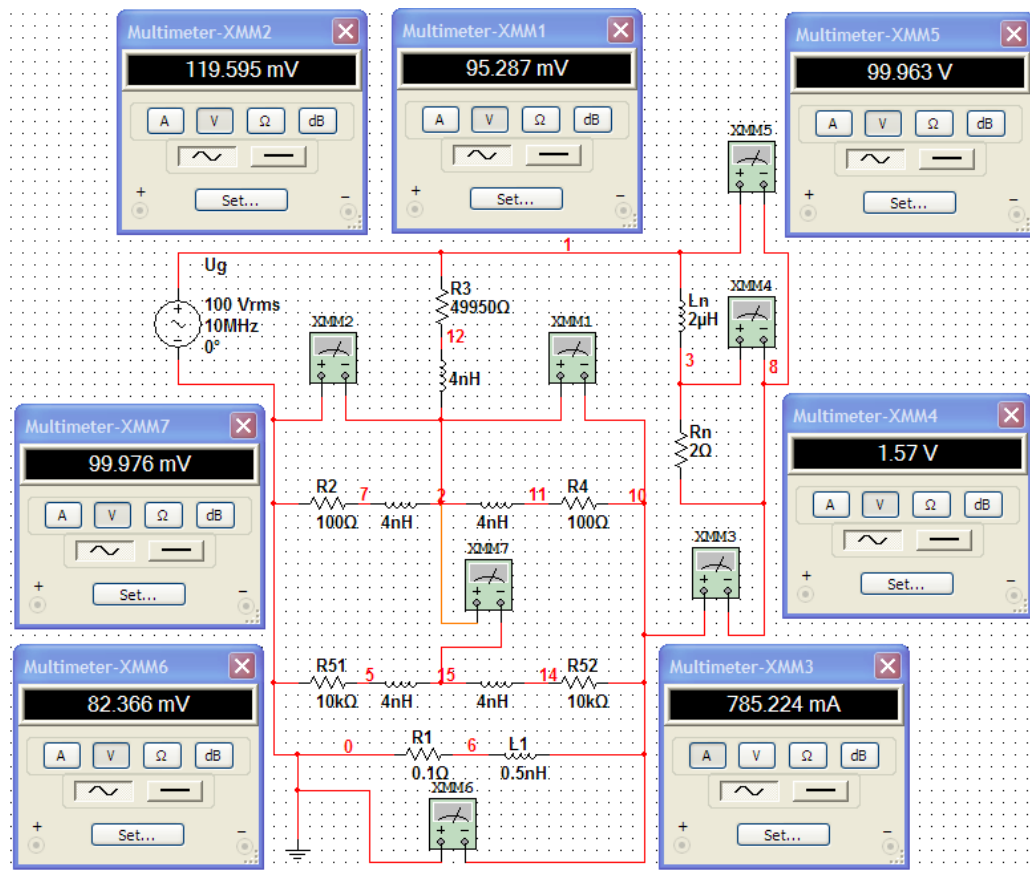


Рис. 4. Модель вхідної ланки ватметра прохідної потужності, що містить середню точку шунта створену додатковим резистивним подільником в системі Multisim

Figure 4 - Transfer power wattmeter input-link model which contains the midpoint of the shunt created by the additional resistive divider in the Multisim system.

Таблиця 1. – Результати розрахунків та моделювання в системі Multisim

Table 1. - Results of calculations and simulation in Multisim system

Виставлені значення	Частота генератора, F , кГц	100	100	1.000	1.000	10.000	10.000
	Індуктивність навантаження, L_n , мкГн	200	200	20	20	2	2
	Активний опір навантаження, R_n , Ом	20	2	20	2	20	2
	$\cos\varphi$ навантаження	0,157	0,016	0,157	0,016	0,157	0,016
Данні симуляції в пакеті Multisim	Напруга навантаження, u_n , В	99,999	100,01	99,91	99,921	99,953	99,963
	Струм навантаження, i_n , А	0,7849	0,7948	0,7764	0,7860	0,7757	0,7852
	Напруга активного опору навантаження R_n , u_{Rn} , В	15,697	1,59	15,527	1,572	15,515	1,57
	Напруга, U_{ba} , мВ	113,165	108,356	113,779	109,131	123,623	119,595
	Напруга, U_{bc} , мВ	101,337	106,831	100,185	105,586	89,541	95,287
	Напруга, U_{bw} , мВ	99,993	99,998	99,917	99,922	99,971	99,976
Продовження Табл.1							
Розраховані значення за формулами	Напруга навантаження, u_n за (4), В	99,987	99,997	99,910	99,920	99,953	99,963
	Струм навантаження, i_n за (5), А	0,785	0,795	0,776	0,786	0,776	0,786
	$\cos(\varphi - \varphi_{Z1})$ за (6)	0,16	0,019	0,186	0,047	0,445	0,316
	$\cos\varphi_{Z1}$ ланки шунта за (3)	0,999995	0,999995	0,999507	0,999507	0,954028	0,954028
	$\cos\varphi$ навантаження за (7)	0,157	0,016	0,155	0,015	0,156	0,017
	Повна потужність	78,5	79,5	77,6	78,5	77,6	78,6

навантаження, $S = U_n \cdot i_n$, ВА							
Активна потужність навантаження, $P_{real} = i_n \cdot U_{Rn}$, Вт	12,321	1,263	12,055	1,236	12,035	1,233	
Активна потужність навантаження, P_2 за (2), Вт	12,6	1,5	14,4	3,7	36,2	26,0	
Активна потужність навантаження, P_8 за (8), Вт	12,318	1,260	12,013	1,210	12,126	1,315	
Абсолютна похибка розрахунку активної потужності за (2), $\Delta_{pp2} = P_2 - P_{real}$, Вт	0,25	0,26	2,37	2,46	24,17	24,77	
Абсолютна похибка розрахунку активної потужності за (8), $\Delta_{pp8} = P_8 - P_{real}$, Вт	-0,0028	-0,0030	-0,0422	-0,0256	0,0905	0,0814	
Відносна похибка розрахунку активної потужності за (2), $\sigma_{pp2} = 100 \cdot \Delta_{pp2} / P_{real}$, %	2,03	20,7	19,7	198,7	200,9	2008,4	
Відносна похибка розрахунку активної потужності за (8), $\sigma_{pp8} = 100 \cdot \Delta_{pp8} / P_{real}$, %	-0,023	-0,24	-0,35	-2,07	0,75	6,6	
Ефективність корекції у (8) порівнюючи з її відсутністю у (2), $k = \sigma_{pp2} / \sigma_{pp8}$, раз	89,7	86,7	56,3	96,1	267,0	304,3	

5. Результати і обговорення

Таким чином, для отримання значення потужності вимірюється середньоквадратичне значення напруг U_{ba} , U_{bc} , U_{bw} за формулами розраховується напруга, струм навантаження та косинус зсуву фаз між ними, враховується похибка від реактивної складової ланки шунта та отримується значення активної потужності.

Основною похибкою ватметра є похибка низько-омного шунта Z_1 . Для розширення частотного діапазону доцільно використовувати коаксіальні або тріаксіальні шунти, які мають найкращі технічні показники на сьогоднішній день. Також, розширення частотного діапазону може бути досягнуто не тільки апаратними засобами (зменшення індуктивності шунта), а й введенням розрахункової корекції після вимірювання значень активної і реактивної складової шунта.

Як видно з даних таблиці, при збільшенні частоти та зменшенні $\cos\varphi$ навантаження ефективність корекції реактивної складової шунта k зростає, причому, в результаті корекції, похибка розрахунку активної потужності σ_{pp8} залишається прийнятною для проведення вимірювань активної потужності на частотах до 10 МГц та $\cos\varphi$ навантаження до 0,1.

6. Висновки

Перевагами ватметра такої конструкції є:

- можливість розширити частотний діапазон шляхом компенсування впливу реактивної складової опору ланки шунта на кінцевий результат вимірювання, що може бути досягнуто не тільки апаратними засобами (зменшення індуктивності шунта), а й введенням розрахункової корекції після вимірювання значень активної і реактивної складової шунта;
- значення елементів вхідного пристрою може бути оптимізовано за критерієм максимальної широкосмуговості, оскільки похибка від власного споживання врахована;
- в схемі на рисунку 3 застосовується один низькоомний шунт, що здешевлює ватметр;
- мінімізуються адитивні похибки каналу перетворення напруг, що підвищує чутливість.

Список літератури

1. Вдовиченко А. В. Підвищення точності вимірювання активної потужності при значній реактивній складовій / А. В. Вдовиченко, Ю. М. Туз // Інформаційні системи, механіка та керування. Науково-технічний збірник. – Київ: НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», - № 17, - с. 12-18, - 2017.
2. Туз Ю.М Структурные методы повышения точности измерительных устройств.- Издательское объединение «Вища школа», 1976, 256 с.
3. Патент на корисну модель UA №94816, Ватметр змінного струму /Туз Ю.М., Архіпова А.О.; МПК (2014.01), G01R 21/00.
4. Патент на корисну модель UA №94817, Ватметр змінного струму /Туз Ю.М., Архіпова А.О., Артюхова Ю.В., Вдовиченко А.В.; IPC (2014.01), G01R 21/00.
5. Y.M. Tuz, A.A. Oulianova, A.O. Arkhipova, “Wideband wattmeter of transfer power without self consumption error”, *Electrotechnic and computer systems*, No. 06 (82), pp. 150 – 153, 2012.

References

- [1] A. Vdovichenko, Y. Tuz, “Active power measurement accuracy increasing with significant reactive component”, *Bull. Information Systems, Mechanics and Control*, Kyiv, Ukraine: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", no.17, p.12-18, 2017.
- [2] Y. Tuz, *Structural methods for increasing the accuracy of measuring devices*. Publ. Ass. "Higher school", 1976.
- [3] Y. Tuz, A. Arkhipova, “Wattmeter of alternating current”. Patent for utility model UA no.94816, *G01R 21/00*. IPC 2014.
- [4] Y. Tuz, A. Arkhipova, Yu. Artyukhova, A. Vdovichenko, “AC Wattmeter”. Patent for Utility Model UA no.94817, *G01R 21/00*. 2014.
- [5] Y. Tuz, A. Oulianova, A. Arkhipova, "Wideband wattmeter of transfer power without self-consumption error", *Electrotechnic and computer systems*, no.06(82), p.150-153, 2012.