

УДК 621.317.382.023

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804172017121717>

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

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РАЗІ ЗНАЧНОЇ РЕАКТИВНОЇ СКЛАДОВОЇ

En The broadband wattmeter of transient power with its own consumption error correction for measuring the active power against the background of large reactive components in the frequency range up to units MHz is described in the article. This instrument can measure the power loss (active power) in a variety of reactive elements, for example, the inductances used in pulsed energy converters. Such wattmeter can be used to optimize the development of wireless power transmission systems based on open resonance circuits. The structure of such systems, as was found during the study, has a spherical directional pattern and does not depend on the emitter and receiver location, described in the article. The article specifies the features of active power measurements at searching for the most efficient design of wireless power transmission systems on the basis of open resonant circuits, where the measurement is complicated by the fact that relatively small active power needs to be measured against the background of large reactive components, when the operating frequencies are shifted from the resonance, and phase shift between current and voltage accrue.

At high frequencies measuring, the channels of the wattmeter become very sensitive to phase errors. It is necessary to minimize links that cause phase shifts. In

¹ ТОВ «Росток-Прилад»

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

this connection, it is important to construct correctly the wattmeter input units and to make such a transformation, which will provide operations with signal modules. The proposed scheme allows this to be achieved, and required gain is carried out without taking into account the signals phase shift.

In the basic scheme of the wattmeter, the input device is executed from the main shunt and parallel to the auxiliary distributed shunt connected to it, which is connected to the main resistance of the voltage divider, in which the value of all resistances of the input device is determined by conditions of invariance to the squares of the voltage and load current, and the partially distributed auxiliary shunt is calculated with additional weighting factors to provide the conditions for invariance of the square of voltage and current and eliminate the error from its own re- vives.

The value of the calculated power measurement error on the model for this wattmeter is 0,1%. The basic error of the wattmeter is the error of the low-ohm shunt. It is expedient to use coaxial or triaxial shunts to extend the frequency range. The designs of such shunts and examples of shunts with the best technical characteristics for today are given in the article.

The advantages of such wattmeter are:

- gives the exact value of the measured power on the load, regardless of the actual consumption of the input device;
- the values of the input device elements can be optimized by the criterion of maximum broadband, since the error from its own consumption is taken into account;
- one low-level shunt, which reduces the cost of the wattmeter; is used in the scheme
- additive errors of the voltage conversion channel are minimized.

Ru

В статье рассматривается широкополосный ваттметр проходной мощности с коррекцией погрешности от собственного потребления для измерения активной мощности на фоне больших реактивных составляющих в диапазоне частот от 0,01 до 10 МГц. Объектами исследований являются электромагнитные элементы (дрессели / трансформаторы), работающие на высоких частотах до единиц мегагерц и имеют сильно искажении формы сигналов. Описаны особенности измерений активной мощности при поиске максимально эффективной конструкции систем беспроводной передачи электроэнергии на основе разомкнутых резонансных контуров. Рассмотрены образцы современных шунтов, которые создают основную погрешность ваттметра такого вида.

Вступ

Проведене дослідження покликане створити недорогий та надійний метрологічний інструмент для вимірювання активної потужності на фоні великих реактивних складових у діапазоні частот від 0,01 до 10 МГц. Прилад дозволить вимірювати потужність втрат (активну потужність) [1] у різноманітних реактивних елементах, наприклад, індуктивностях, які використовуються у імпульсних перетворювачах енергії. Проблема збільшення ККД інверторів зводиться до завдання – знизити втрати, у дросельних елементах, тому що на сьогодні основні втрати змістилися від напів-

провідникових ключів у бік реактивних елементів [2]. Використання даного ватметра буде актуальним для зменшення таких втрат під час розробки і контролі на виробництві індуктивностей та інверторів. Зменшення глобальних втрат енергії в усіх пристроях, які використовують перетворювачі, у майбутньому, має на меті посприяти збереженню навколишнього середовища. Це завдання актуальне для розвинутого виробництва, що вимагає постійної оптимізації, яке на даний момент в Україні знаходиться на етапі формування.

Такий ватметр може знайти застосування у разі оптимізації розробки систем бездротової передачі електроенергії на основі розімкнутих резонансних контурів. Хоча такі системи сягають корінням ще розробок Н. Тесли [3], вони менше підходять для побутового вжитку, ніж представлені на ринку індуктивні зарядні пристрої, через присутність високих рівнів напруг, проте, у процесі їх дослідження виникає великий спектр побічних ефектів і можливих використань, які варто досліджувати та можливо вони допоможуть у дослідженні й розумінні певних фізичних ефектів та процесів, які досі мало вивчені. Вимірювання і правильний аналіз втрат дозволяє пришвидшити розробку елементів подібної системи.

Система бездротової передачі електроенергії на основі розімкнутих резонансних контурів, що використовувалась у дослідженні, схематично зображено на рис. 1.

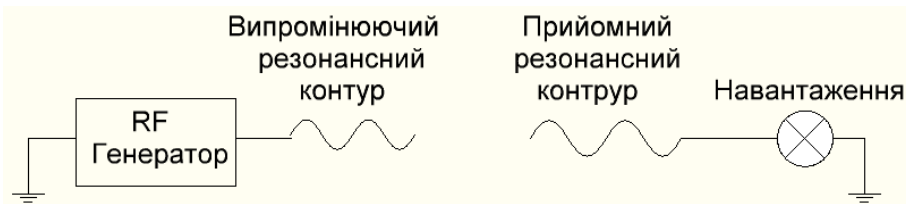


Рис. 1. Безпроводна система передачі енергії

Система складається із генератора, один полюс якого підключається до землі, а другий до однополюсного випромінюючого резонансного контуру (де в якості індуктивності і ємності виступають індуктивність і паразитна ємність антени випромінювача відповідно), та прийомного однополюсного резонансного контуру, до якого у свою чергу приєднане навантаження. Такі системи, як було виявлено під час дослідження, мають сферичну діаграму направленості і не залежать від взаємного розташування випромінювача та приймача.

Для пошуку максимально ефективної конструкції необхідно проводити точні вимірювання корисної активної потужності. Ці вимірювання ускладнюються тим, що відносно малу активну потужність необхідно вимірювати на фоні великих реактивних складових, коли робочі частоти зміщуються із резонансної, і виникає фазовий зсув між струмом і напругою.

Дослідження системи починається із вимірювання активної потужності навантаження приймального резонансного контуру. Проте саме лише вимірювання цієї активної потужності й пошук оптимальної конструкції для її підвищення може призвести до потрапляння у пастку локального максимуму корисної потужності зв'язаних контурів [4], що представлена на рис. 2.

Максимальна вихідна потужність отримується при $\eta = 0,5$ та $k=1/Q$, проте, як видно із графіка на рис. 2, за більшого значення kQ можливе більш ефективне рішення для передачі за меншою вихідною потужністю. Для правильного проектування системи потрібно визначати саме ККД передачі, отже – точно вимірювати активну потужність випромінюючого контуру.

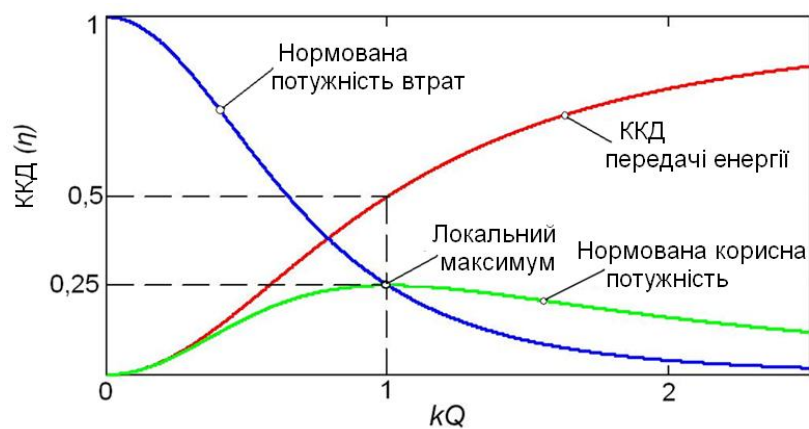


Рис. 2. ККД передачі енергії η у системі зв'язаних резонансних контурів (k – коефіцієнт зв'язку; Q – добротність)

Для вирішення описаних вище задач було запропоновано використання широкосмугового ватметра прохідної потужності із корекцією похибки від власного споживання для мінімізації втрат та оптимізації конструкції системи.

Опис ватметра прохідної потужності

У разі високих частот канали ватметра стають дуже чутливими до фазових похибок. Потрібно мінімізувати ланки, які викликають фазові зсуви. У зв'язку із цим важливим є правильна побудова вхідних ланок ватметра і таке перетворення, яке забезпечить операції із модулями сигналів без врахування фазових зсувів [5, 6].

Цього можна досягти приводячи до квадрату суму сигналів, пропорційних струму $i(t)$ та напрузі $u(t)$ у навантаженні Z .

$$[u(t) + Zi(t)]^2 = u^2(t) + 2Zu(t)i(t) + Z^2i^2(t), \quad (1)$$

Запропонована схема на рис. 3, дозволяє позбутися квадратів $u^2(t)$, та $Z^2 i^2(t)$ у (1), а необхідне підсилення здійснюється без урахування фазових зсувів сигналів.

У принциповій схемі запропонованого ватметра змінного струму вхідний пристрій виконано із основним шунтом Z_1 та паралельно під'єднаним до нього допоміжним розподіленим шунтом Z_2 та Z_4 , з'єднаним із основним опором подільника напруги Z_3 , тому значення всіх опорів резисторів вхідного пристрою визначаються за допомогою умов інваріантності до квадратів напруги та струму навантаження, а частково розподілений допоміжний шунт розраховується із додатковими ваговими коефіцієнтами для забезпечення умов інваріантності квадратів напруги та струму та усунення похибки від власного споживання.

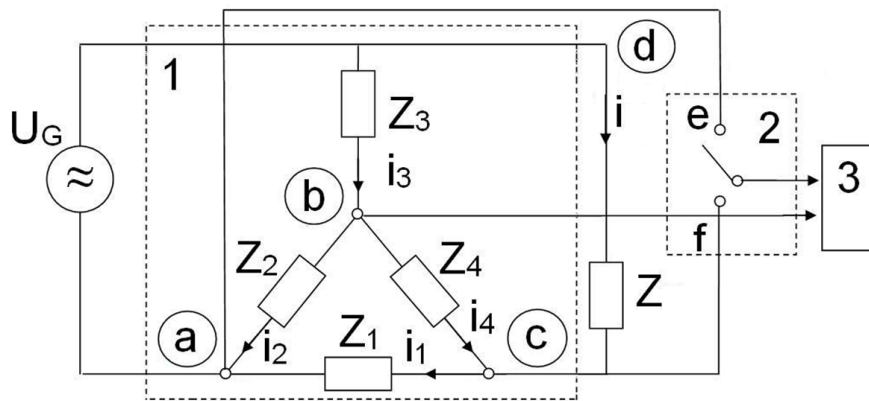


Рис. 3. Ватметр прохідної потужності

1 – вхідний пристрій на основі елементів активного електричного опору, 2 – комутатор, 3 – квадратичний детектор та блок обчислення

Термоперетворювачі доцільно використовувати у якості пристроїв для вимірювання, вони дозволяють точно визначати діючу складову у широкому частотному діапазоні.

$$p = iu = \frac{u_{ba}^2 - \left(1 + \frac{Z_1}{Z_4}\right)^2 u_{bc}^2}{4Z_1} \cdot \frac{(Z_3 Z_4 + Z_3 Z_1 + Z_4 Z_2 + Z_3 Z_2)^2}{Z_2 Z_3 (Z_1 + Z_4)^2}, \quad (2)$$

У разі вимірювання малої активної потужності за умови дії великої реактивної складової виникає додаткова похибка від власного споживання у вхідних ланках. Рівняння (2) виключає похибки від потужності власного споживання. Це дозволяє розширити частотний діапазон та суттєво підвищити чутливість.

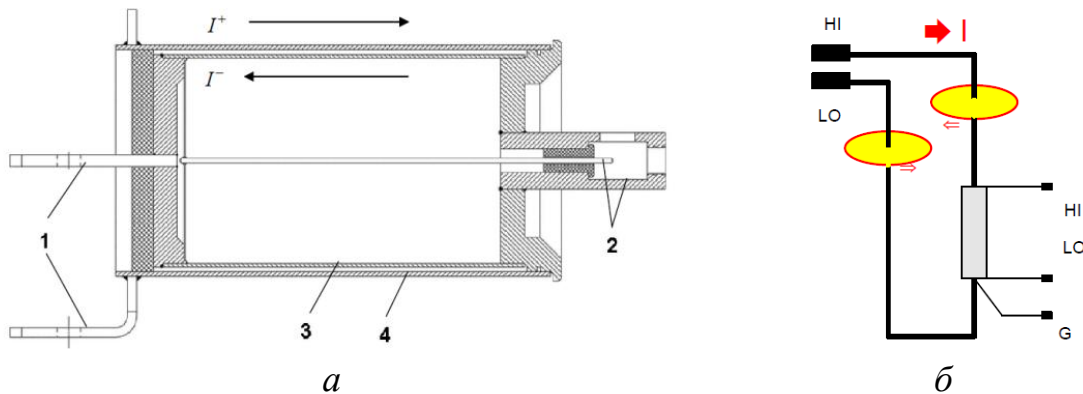
Значення обчисленої похибки вимірювання потужності за моделлю для даного ватметра складає 0,1%. Основною похибкою ватметра є похибка низькоомного шунта Z_1 . Для розширення частотного діапазону доцільно використовувати коаксіальні або триаксіальні шунти, які мають найкращі технічні показники на сьогоднішній день, приклади наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Характеристики шунтів

Назва	Мін. частота	Макс. частота	Точність	Діапазон струмів
<i>L95-SHx</i>	<i>DC</i>	100 кГц	0,15 %	1 А
<i>A40B</i>	<i>DC</i>	100 кГц	0,035 %	100 А
<i>GUILDLINE INSTRUMENTS 7350 Series</i>	<i>DC</i>	100 кГц	0,01 %	25 А
<i>OHM-Labs CS50</i>	<i>DC</i>	20 кГц	0,01 %	50 А

Конструкція коаксіального шунта приведена на рис. 4, *а*. Триаксіальний шунт, схематично показано на рис. 4, *б*, реалізується на базі *GUARD* технології, що дозволяє досягти високого значення придушення синфазної складової *CMR*, у ньому клеми для струму та потенціалів рознесені (принцип Кельвіна), а *HI*, *LO* та *G* під'єднанні безпосередньо через триаксіальний роз'єм до каналу вимірювання струму аналізатора потужності.

Рис. 4. *а* – конструкція коаксіального шунта:

1 – струмові виводи; 2 – потенціальні виводи;
3 – циліндр із манганіну; 4 – мідний циліндр;

б – триаксіальний шунт

Резистивний елемент шунта має форму труби, що забезпечує більшу поверхню, що разом зі спеціальним матеріалом забезпечує коефіцієнт навантаження менше ніж $1,5 \cdot 10^{-6}$ [%/A²]. Шунти приєднанні напряму до вимірювального каналу мають діапазон значень від 3 мА до 100 А, зовнішні шунти розміщуються біля тестового об'єкта і мають діапазон значень від 100 А до 1400 А.

Висновки

Перевагами ватметра такої конструкції є:

- дає точне значення вимірної потужності на навантаженні, не зважаючи на власне споживання вхідним пристроєм;
- значення елементів вхідного пристрою може бути оптимізовано за критерієм максимальної широкосмуговості, оскільки похибка від власного споживання врахована;

- в схемі застосовується один низькоомний шунт, що зменшує вартість ватметра;
- мінімізуються адитивні похибки каналу перетворення напруг.

Список використаної літератури

1. *Вдовиченко А. В.* Аналіз втрат в дроселях накопичувачах / А. В. Вдовиченко // Енергетика: економіка, технології, екологія. - Випуск №2, – 2010. – с. 15 -21.
2. *Туз Ю. М.* Система вимірювання і дослідження електричних параметрів в елементах енергозаощаджувальних перетворювачів енергії / Ю. М. Туз, А. В. Вдовиченко // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. - Харків: ВКФ «Фавор», – № 6 (26), –2010.– с. 18-21.
3. *Sakko B.* Investigation of electromagnetic processes in Tesla experiments / B. Sakko and A. K. Tomilin; – <http://viXra.org/abs/1210.0158>, – 2013.
4. *Мегрецкая И. И.* Основы теории цепей. Колебательные цепи: Текст лекций, / И. И. Мегрецкая, Д. А. Дравских. – , СПб.:СЗПИ, – 1998 – 60 с.
5. 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.
6. *Tuz Y. M.* Wideband wattmeter of transfer power without self consumption error / Y. M. Tuz, A. A. Oulianova, A. O. Arkhipova // Electrotechnic and computer systems, No. 06 (82), –2012.– p. 150-153.