

## Оптимизация способа измерения активной мощности по методу задержек

*Д.А. Елинов, М.В. Чернецов, О.В. Бирюкова*

*Московский государственный университет технологий и управления  
им. К.Г. Разумовского - Пензенский филиал*

**Аннотация:** Рассматривается применение метода задержек для измерения мощности в электрических сетях и возможность дальнейшего его усовершенствования с целью уменьшения количества вычислений и упрощения аппаратной реализации путем оптимального выбора времени задержки. Разработана модель предлагаемого измерителя в пакете Simulink программы MatLab и проведено исследование погрешности измерения при девиации частоты сетевого напряжения.

**Ключевые слова:** измерения, мощность, электрические сети, метод задержек, время задержки, оптимизация, моделирование,

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Развитие технологий генерации электрической энергии и их применение [1] обуславливает повышенные требования к контролю параметров электрической сети. Одним из основных факторов устойчивости работы энергосистемы является соблюдение баланса потребляемой и генерируемой мощности.

При измерении мощности в электрических сетях применяются следующие подходы:

- определение мощности по мгновенным значениям напряжения и тока [2,3];
- определение мощности, реализованное на основе интегрирования напряжения и тока и последующего деления результата интегрирования на величину интервала интегрирования [4-8].

Основным недостатком указанных способов является наличие погрешности при девиациях частоты сетевого напряжения в пределах допустимых значений и априорно-неизвестной величины интервала интегрирования, при которой будет отсутствовать погрешность, обусловленная периодическим характером измеряемых сигналов.

---

Для решения этих недостатков было предложено использовать метод задержек [9]. При этом предлагалось осуществлять интегрирование произведения текущих значений напряжения и тока в реальном времени

$$P_1(T_u) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T_u} U_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t + \varphi) dt \quad (1)$$

и задержанных на время  $t_3$ .

$$P_2(T_u, t_3) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T_u} U_m \sin(\omega(t-t_3)) I_m \sin(\omega(t-t_3) + \varphi) dt. \quad (2)$$

Моменты равенства функций (1) и (2) описываются уравнением:

$$\sin(\omega T_u) \cos(2\omega T_u - \omega t_3 - \omega t_0 + \varphi) = 0, \quad (3)$$

которое имеет два вида решений:

– корни О-типа (однофакторные корни)

$$T_{uO} = n \frac{T_c}{2}; (n = \pm 1, \pm 2, \mp 3, \dots), \quad (4)$$

положение которых зависит только от реального значения периода  $T_c$  сетевого напряжения;

– корни М-типа (многофакторные корни)

$$T_{uM} = n \frac{T_c}{2} + t_3 - 2t_0 - \frac{\varphi}{2\pi} T_c, \quad (5)$$

которые зависят дополнительно от момента начала интегрирования  $t_0$ , времени задержки  $t_3$ , фазы  $\varphi$ .

При  $T_u = T_{uO}$  накопленные интегралы равны истинному значению измеряемой активной мощности нагрузки. Результат измерения необходимо определять в четные от начала интегрирования моменты равенства значений результатов интегрирования, поскольку корни М-типа (не зависимо от

значений  $t_0$ ,  $t_3$  и  $\varphi$ ) всегда находятся на нечетных позициях, а корни О-типа всегда находятся на четных позициях (см. рис. 1).

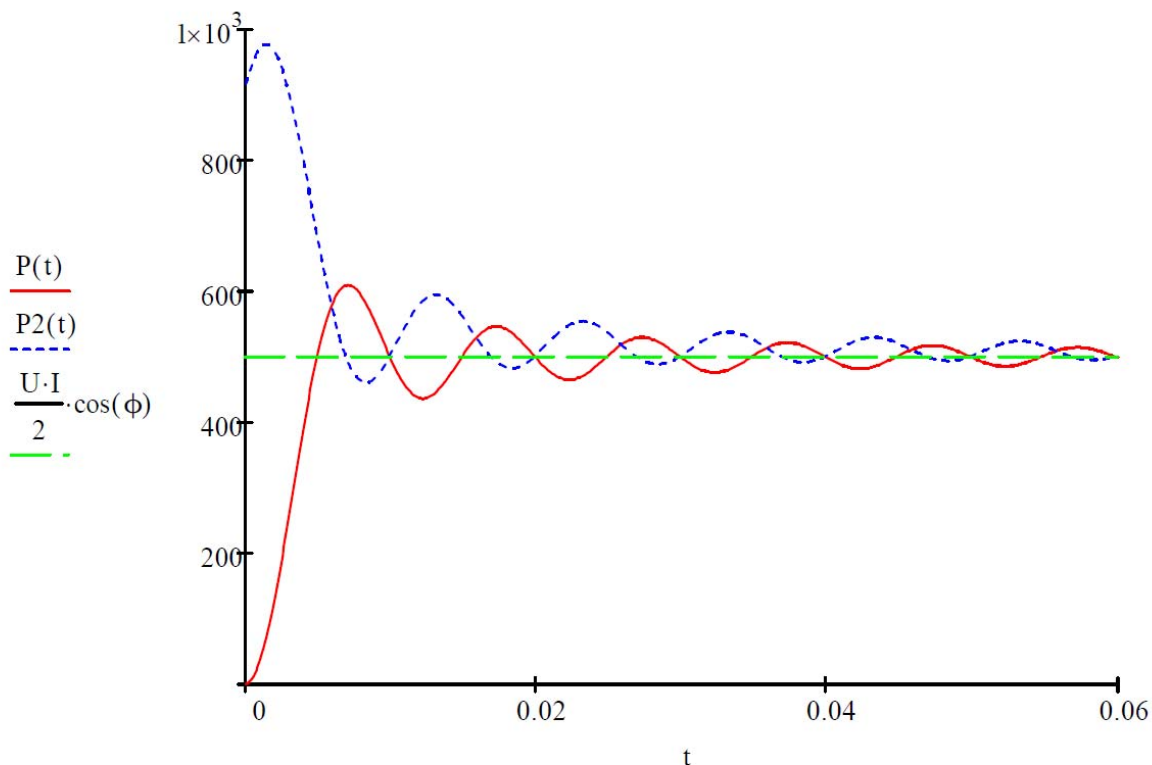


Рис. 1 – Графики изменения функций  $P_1(T_u)$  и  $P_2(T_w, t_3)$ , для  $f_c=50$  Гц,  $\varphi=\pi/8$ ,  $t_0=0$  и  $t_3=4$  мс.

Таким образом, значение мощности может быть получено через время равное  $0,5 T$  сигнала напряжения от начала измерения, т.к. частота колебаний значений мощности в 2 раза выше частот сигналов тока и напряжения. С целью повышения быстродействия способа и упрощения реализации метода предлагаются следующие меры.

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ПО МЕТОДУ ЗАДЕРЖЕК

Добиться уменьшения времени измерения мощности можно путем оптимального выбора времени задержки измеряемого сигнала. В исходном способе возможна также ситуация, когда при малом времени задержки сигналов результаты интегрирования фактически будут равны на определенном участке, и для их различения необходимо будет повышать

квантование по уровню сигнала, что накладывает дополнительные требования к применяемому оборудованию. Случай равенства двух накапливаемых интегралов приведен на рисунке 2. При этом время задержки было равно  $0,05 T$  исходного сигнала

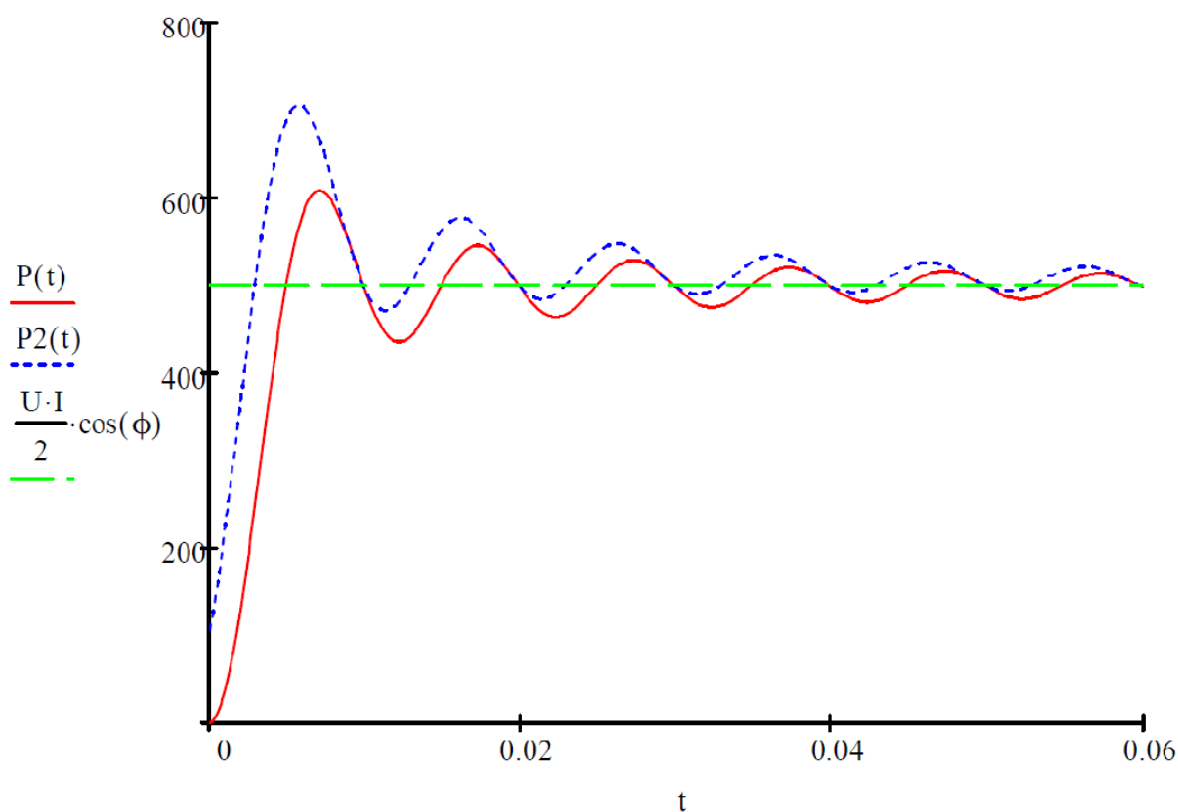


Рис. 2 – Графики изменения функций  $P_1(T_u)$  и  $P_2(T_u, t_3)$ , для  $f_c=50$  Гц,  $\varphi=\pi/8$ ,  $t_0=0$  и  $t_3=1$  мс.

Таким образом, от оптимального выбора времени задержки будет зависеть не только сложность реализации устройства и его характеристики, но и точность измерения. Добиться упрощения устройства и уменьшения времени измерения до  $0,25 T$  сигнала напряжения можно если выбрать время задержки равное  $0,5 T$  сигнала напряжения. При этом результаты измерения можно будет фиксировать в первый момент равенства накапливаемых интегралов. Описываемый случай показан на рисунке 3.

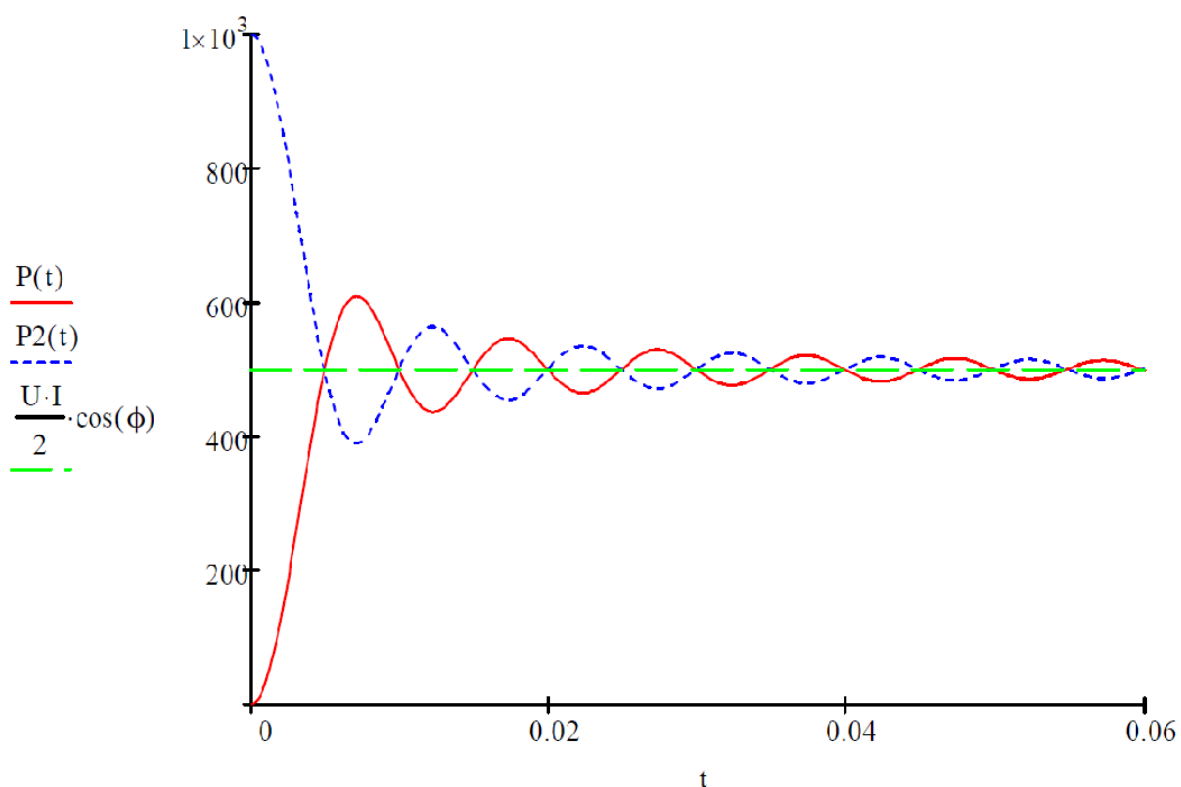


Рис. 3 – Графики изменения функций  $P_1(T_u)$  и  $P_2(T_w, t_3)$ , для  $f_c=50$  Гц,  $\phi=\pi/8$ ,  $t_0=0$  и  $t_3=5$  мс.

Таким образом, применение времени задержки равной 0,5 T сигнала напряжения позволяет значительно улучшить характеристики способа и упростить реализацию. Но при этом, т.к. частота сетевого напряжения является неизвестной, следует исследовать погрешности, возникающие при девиации частоты напряжения в пределах ПДЗ.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Экспериментальное исследование погрешностей было произведено при использовании пакета Simulink программы Matlab[10]. S-модель измерителя, реализующая оптимизированный метод задержек, приведена на рис. 4.

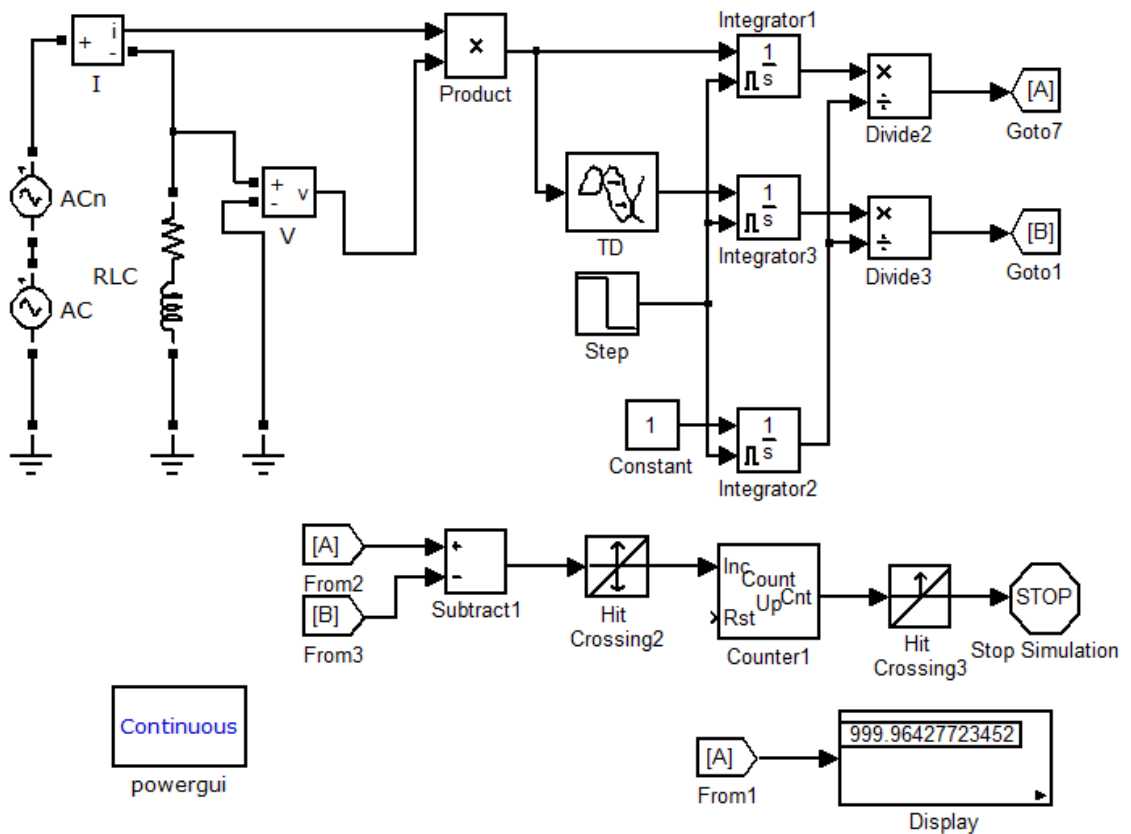


Рис. 4 – S-модель измерителя активной мощности

Частота сетевого напряжения при экспериментальной проверке изменялась в пределах  $\pm 0,4$  Гц, согласно ГОСТ13109-97. Значение программно - установленной активной мощности нагрузки 1000 Вт.

Результаты исследования сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Активная мощность, Вт	Значения измеренной активной мощности при изменении частоты сетевого напряжения, Вт				
	fc= 49,6Гц	fc= 49,8Гц	fc= 50,0Гц	fc= 50,2Гц	fc= 50,4Гц
1000	999,95	999,95	999,95	999,95	999,95

График значений относительной погрешности при девиации частоты сетевого напряжения представлен на рисунке 5

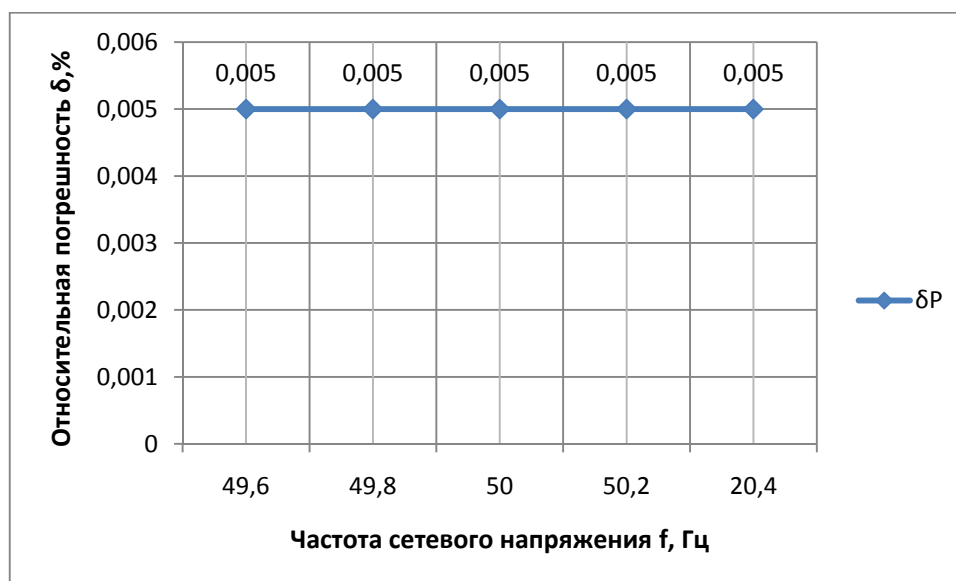


Рис. 5 – Графики значений относительной погрешности при девиации частоты

Таким образом, девиация частоты в нормативных пределах не вносит существенной погрешности в результат измерения.

Выводы:

- 1) Показано, что выбор времени задержки при измерении мощности по рассматриваемому методу может оказывать существенное влияние как на точность измерения, так и на реализацию устройства.
- 2) Определено, что оптимальным значением времени задержки является  $0,5 T$  сигнала напряжения. Что позволяет, определять значение мощности не в четные моменты равенства накапливаемых интегралов, а уже в первый момент.
- 3) Определено, что время равное  $0,5T$  сигнала напряжения может быть не адаптивным, а задаваться фиксированным, т.к. при девиации частоты сетевого напряжения в пределах ПДЗ погрешность измерения составляет  $0,005\%$



## Литература

1. Суяков С.А. Проблемы интеграции ветроустановок в единую энергетическую систему России // Инженерный вестник Дона, №3, 2014 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2534](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2534)
2. Bauch, Hitzdrant Wattmeters. E.T.Z., 1903. 530 p.
3. Мелентьев В.С., Шутов В.С., Баскаков В.С. Способ измерения активной и реактивной составляющих мощности в цепях переменного тока с установившимся синусоидальным режимом // Патент РФ № RU2039358 URL: [findpatent.ru/patent/203/2039358.html](http://findpatent.ru/patent/203/2039358.html)
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1973. 752 с.
5. Безикович А.Я., Шапиро Е.З. Измерение электрической мощности в звуковом диапазоне частот. Л.:Энергия, 1980. 168 с.
6. Brandao-Faria J.A. Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering. Wiley, 2008. 420 p.
7. Symonds A. Electrical power equipment and measurements. 2<sup>nd</sup> edition. Mc Graw-Hill Inc., US, 1980. 291p.
8. Iwanson, Snapius, Hoornaert. Measuring current, voltage and power. Elsevier science, 1999. 215 p.
9. Михотин В.Д., Чернецов В.И. Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока // Патент РФ №2229723 URL: [freepatent.ru/patents/2229723](http://freepatent.ru/patents/2229723)
10. Степанов К.С., Панова Н.Т. Оптимизация лабораторного практикума по электротехнике с применением системы Matlab Simulink. // Инженерный вестник Дона, №4, 2014 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2628](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2628)



### References

1. Sujakov S.A. Inženernyj vestnik Dona(Rus), №3, 2014 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2534](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2534)
2. Bauch, Hitzdrant Wattmeters. E.T.Z., 1903. 530 p.
3. Melent'ev V.S., Shutov V.S., Baskakov V.S. Sposob izmerenija aktivnoj i reaktivnoj sostavljajushhih moshhnosti v cepjah peremennogo toka s ustanovivshimsja sinusoidal'nym rezhimom. Patent RF № RU2039358 URL: [findpatent.ru/patent/203/2039358.html](http://findpatent.ru/patent/203/2039358.html)
4. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki.[Theoretical Foundations of Electrical Engineering] M.: Vysshaja shkola, 1973. 752 p
5. Bezikovich A.Ja., Shapiro E.Z. Izmerenie jelektricheskoi moshhnosti v zvukovom diapazone chastot. [ Measurement of the electrical power in the audio frequency range] L.:Jenergija, 1980. 168 p.
6. Brandao-Faria J.A. Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering. Wiley, 2008. 420 p.
7. Symonds A. Electrical power equipment and measurements. 2<sup>nd</sup> edition. Mc Graw-Hill Inc., US, 1980. 291p.
8. Iwanson, Snapius, Hoornaert. Measuring current, voltage and power. Elsevier science, 1999. 215 p.
9. Mihotin V.D., Chernecov V.I. Sposob izmerenija aktivnoj moshhnosti nagruzki v jelektricheskikh cepjah peremennogo toka. Patent RF №2229723 URL: [freepatent.ru/patents/2229723](http://freepatent.ru/patents/2229723)
10. Stepanov K.S., Panova N.T. Inženernyj vestnik Dona(Rus), №4, 2014 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2628](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2628)