



УДК 630.279.142.6  
doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-2



Open  
Access

RESEARCH  
ARTICLE

## Электронный высокочастотный амперметр

**Антон Сергеевич Ишков**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
ishkovanton@mail.ru

**Антон Алексеевич Антонов**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
tonchic2001@mail.ru

**Александр Александрович Сарайкин**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
fortyna579@gmail.com

**Дмитрий Викторович Земляков**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
zemliakov.mitya2016@yandex.ru

**Аннотация.** Представлено исследование способов измерения токов высокой частоты. На основе проведенного обзора датчиков, методов и средств измерения частоты была разработана структурная схема высокочастотного амперметра. Был выполнен выбор структурных элементов амперметра с описанием их принципов работы. Приведены основные технические характеристики, также было рассмотрено схемотехническое моделирование схемы интегратора для его функционирования. Разработанная в работе метрологическая модель позволила оценить погрешности электронного высокочастотного амперметра.

**Ключевые слова:** высокочастотный амперметр, датчик тока, способы измерения тока, интегратор, интерфейс, трансформатор тока, резистивный шунт, микропроцессор, усилитель частоты, моделирование

**Для цитирования:** Ишков А. С., Антонов А. А., Сарайкин А. А., Земляков Д. В. Электронный высокочастотный амперметр // Инжиниринг и технологии. 2022. Т. 7(1). С. 1–6. doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-2

## Electronic high-frequency ammeter

**Anton S. Ishkov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
ishkovanton@mail.ru

**Anton A. Antonov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
tonchic2001@mail.ru

**Aleksandr A. Saraykin**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
fortyna579@gmail.com

**Dmitriy V. Zemlyakov**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
zemliakov.mitya2016@yandex.ru

**Abstract.** The research on high-frequency current measurements is presented. A block diagram for a high-frequency ammeter is developed based on the review of sensors, methods and means of measuring frequency. In the article, the structural elements of the ammeter are selected, the operating principles thereof are described, and the main technical characteristics are given. Circuit modeling for the integrator functioning is considered. The developed metrological model allows estimating errors of the electronic high-frequency ammeter operation.



**Keywords:** high-frequency ammeter, current sensor, current measurement methods, integrator, interface, current transformer, resistive shunt, microprocessor, frequency amplifier, simulation

**For citation:** Ishkov A.S., Antonov A.A., Saraykin A.A., Zemlyakov D.V. Electronic high-frequency ammeter. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2022;7(1):1–6. (In Russ.). doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-2

## Введение

Достоверное измерение токов в энергетическом и управляющем оборудовании является важным аспектом обеспечения высокой надежности и безопасности промышленных систем и электронных приборов. В настоящее время в России существует ряд предприятий электронной промышленности, которые специализируются на разработке и производстве высокочастотных вакуумных коммутирующих устройств. Одной из основных характеристик этих устройств является пропускаемый ток, значение которого достигает величины до 10 А при частоте до 100 МГц [1].

Существующие стандартные высокочастотные амперметры не удовлетворяют требованиям по диапазону частот, предъявляемым при разработке и производстве коммутирующих устройств. Поэтому для решения этой проблемы важно изучить бесконтактные методы измерения высокочастотных токов и затем разработать электронный высокочастотный амперметр. При разработке следует автоматизировать процесс измерения с последующим сохранением и обработкой полученной информации.

## Основная часть

**К основным датчикам тока относятся** трансформатор тока, датчики на основе эффекта Холла, катушка Роговского, магниторезистивные датчики, магнитооптические датчики, каждый из которых имеет достоинства и недостатки, при этом выбор датчика зависит от конкретной ситуации, для которой выполняется измерение, а также напрямую зависит от экономических требований к стоимости датчика и его комплектующих. Одним из самых известных датчиков тока является датчик, работа которого реализована на эффекте Холла. Эффект Холла – появление разности потенциалов на концах проводника или полупроводника, заключенного в поперечное магнитное поле, при протекании тока, перпендикулярному полю.

Работа магниторезистивных датчиков основана на эффекте, связанном с изменением сопротивления проводника или полупроводника, внесенного в магнитное поле. Для регистрации токов больших значений применяют измерительный трансформатор тока. Данный датчик представляет собой понижающий трансформатор, который уменьшает амплитуду тока до значений, удобных для измерения.

Вышеприведенные датчики нецелесообразно использовать для измерения токов высокой частоты вследствие плохой работоспособности на высоких частотах. Наиболее оптимальным вариантом для этой цели является катушка Роговского, которая является отличным датчиком при измерении высокочастотных токов [3]. Датчик тока – катушка Роговского (КР) – осуществляет преобразование высокочастотного тока в напряжение, пропорциональное первой производной по току.

Катушка Роговского в основном наматывается на гибкий стержень, который огибает проводник с текущим по нему током. Благодаря отсутствию магнитного сердечника в этом датчике достигается высокая точность измерений и надежность в работе. Так как напряжение на выходе катушки Роговского пропорционально производной тока, необходим интегратор, чтобы преобразовать сигнал, пропорциональный  $di/dt$ , в сигнал, пропорциональный  $i(t)$ , для дальнейшей обработки.

На основе проведенного обзора датчиков, методов и средств измерения токов высокой частоты была разработана структурная схема электронного высокочастотного амперметра, которая приведена на рис. 1.

При протекании высокочастотного тока по проводнику вокруг проводника возникает магнитное поле, которое индуцирует в катушке Роговского напряжение. Это напряжение поступает на нормированный усилитель, который повышает это напряжение в 10 раз. Далее сигнал подается на вход интегратора (И), выходное напряжение которого есть линейная зависимость измеряемого тока. Далее сигнал напряжения с выхода интегратора преобразуется в цифровой код АЦП. Вся информация обрабатывается микропроцессором (МП), где и осуществляются все необходимые математические преобразования. Результат измерения выдается на отчетное устройство (ОУ).

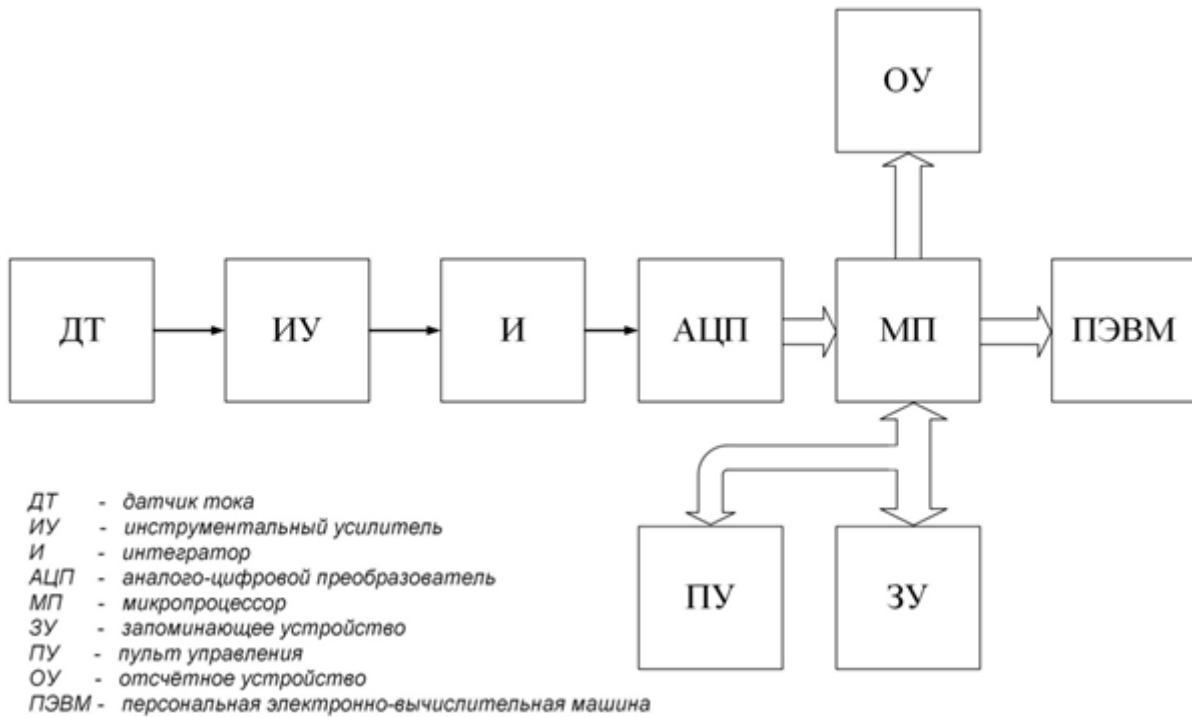


Рис. 1. Электрическая структурная схема электронного высокочастотного амперметра

Основные технические характеристики выбранной катушки Роговского типа ТТС-KR, выбранной для использования в разрабатываемом электронном блоке высокочастотного амперметра, приведены в табл. 1 [2].

Таблица 1

Характеристики катушки Роговского типа ТТС-KR

Характеристика	Значение
Измеряемый ток	от 100 А до 100 кА
Выходное напряжение	от 0 до 100 мВ
	от 0 до 5 В
Длина катушки	от 20 до 2000 мм
Значение напряжения изоляции	3500 В
Диапазон рабочих температур	от -20 до 70 °С
Относительная погрешность измерения тока	±1 %

Для оценки погрешности электронного высокочастотного амперметра разработана его метрологическая модель, которая приведена на рис. 2.

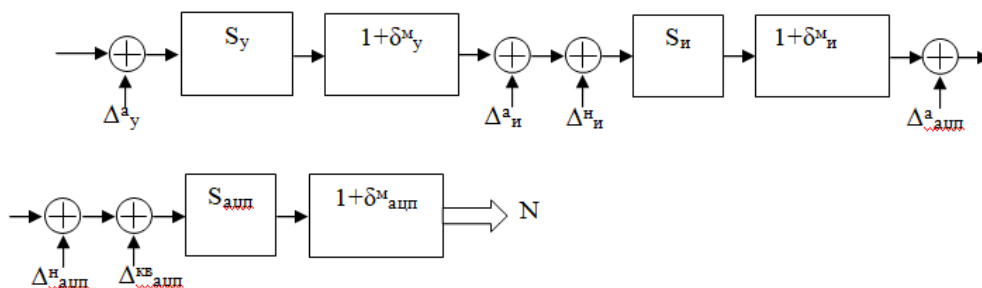


Рис. 2. Метрологическая модель амперметра

Предел изменения в измерительной обмотке датчика составляет  $\pm 200$  мВ, предел допускаемой основной относительной погрешности измерений напряжения  $\pm 3$  %. Тогда предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения напряжения  $\Delta_0 = 6$  мВ.



Распределим погрешность  $\Delta_0$  между аддитивной, мультипликативной, нелинейной составляющими погрешности и погрешностью квантования с помощью метода равных влияний.

$$\Delta_K^a = \sqrt{\left(\Delta_y^a\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{и}^a}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{АЦП}^a}{S_y \cdot S_{и}}\right)^2} \leq 1,5 \text{ мВ}, \quad \delta_K^M = \delta_y^M + \delta_{и}^M + \delta_{АЦП}^M \leq \frac{1,5 \text{ мВ}}{200 \text{ мВ}},$$

$$\Delta_K^{KB} = \frac{\Delta_{АЦП}^{KB}}{S_{и} S_y} \leq 1,5 \text{ мВ}, \quad \Delta_K^H = \frac{\Delta_{и}^H}{S_y} + \frac{\Delta_{АЦП}^H}{S_{и} S_y} \leq 1,5 \text{ мВ}.$$

Методом равных влияний произведем расчет аддитивной составляющей погрешности отдельных компонентов измерительного канала.

Аддитивная составляющая погрешности усилителя определяется по формуле  $\Delta_y^a = 0,33 \cdot 1,5 \text{ мВ} \leq 0,495 \text{ мВ}$ . Чувствительность усилителя  $S_y$  равна  $S_y = \frac{5 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 25$ . Расчет аддитивной составляющей погрешности интегратора:

$$\Delta_y^a = 0,33 \cdot 1,5 \text{ мВ} \cdot 25 \leq 12,3 \text{ мВ}.$$

Аддитивная составляющая погрешности АЦП определяется по формуле

$$\Delta_{АЦП}^a = 0,33 \cdot 1,5 \text{ мВ} \cdot 25 \cdot 1 \leq 12,3 \text{ мВ}.$$

Пусть мультипликативные составляющие погрешности компонентов измерительного канала равны между собой:

$$\delta_y^M = \delta_{и}^M = \delta_{АЦП}^M = \frac{1}{3} \cdot \frac{1,5 \text{ мВ}}{200 \text{ мВ}} = 0,0075 \text{ мВ}.$$

Методом равных влияний произведем расчет нелинейной составляющей погрешности отдельных компонентов измерительного канала.

Нелинейная составляющая погрешности интегратора определяется по формуле

$$\Delta_{и}^H = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \text{ мВ} \cdot 25 \leq 18,75.$$

Расчет нелинейной составляющей погрешности АЦП:

$$\Delta_{АЦП}^H = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \text{ мВ} \cdot 1 \cdot 25 \leq 18,75.$$

С целью проверки правильности расчетов и выбора элементной базы было проведено моделирование интегратора в среде NI Multisim.

На рис. 3 приведена электрическая принципиальная схема интегратора для получения входного и выходного напряжения и исследования изменений формы и значения входного напряжения по сравнению с входным напряжением.

На рис. 4 приведены осциллограммы входного и выходного напряжения интегратора. Схема интегратора выполняет интегрирование входного сигнала в частотном диапазоне, определяемом постоянной времени и шириной полосы пропускания ОУ.

Как видно из графиков, на выходе интегратора наблюдается синусоида частотой 1 МГц, смещенная на  $90^\circ$ , а также выходное напряжение интегратора по сравнению с входным инвертировано.

### Заключение

В результате исследования был разработан электронный высокочастотный амперметр. Для оценки параметров были использованы различные методы и подходы, а также технические средства. Высокочастотный амперметр необходим для обеспечения выполнения измерений с гарантированной точностью при измерении параметров высокочастотных вакуумных переключателей, которые рассчитаны на переключение сигналов частотой до 100 МГц. Причем при производстве высокочастот-



ных вакуумных переключателей необходимо измерять значения высокочастотных токов и в цепях, находящихся под потенциалом до 15 кВ относительно земли.

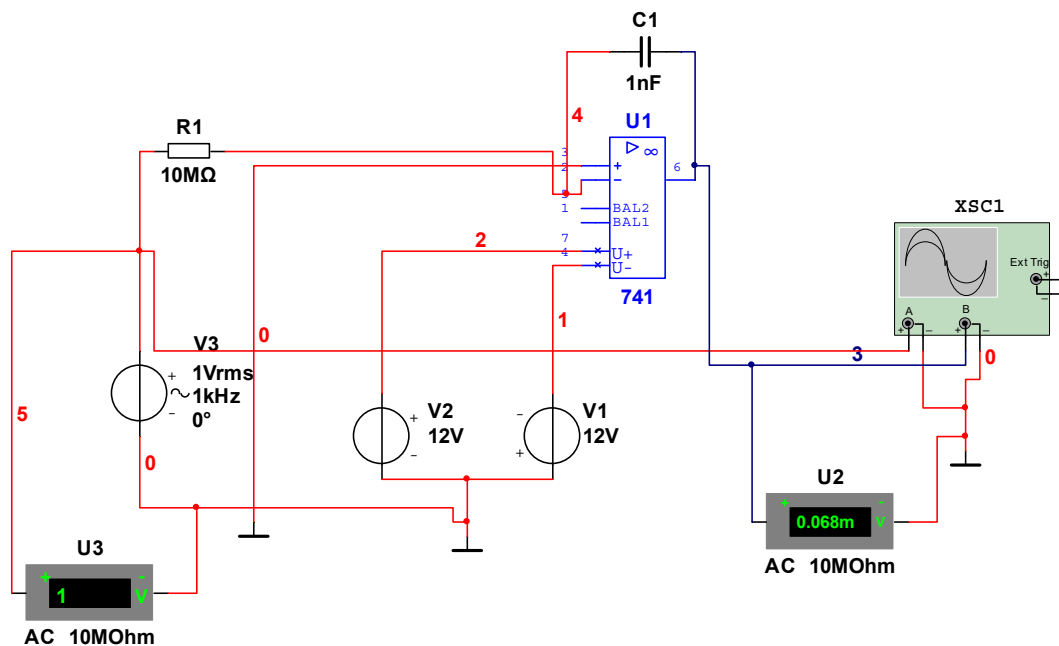


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема интегратора для получения входного и выходного напряжения

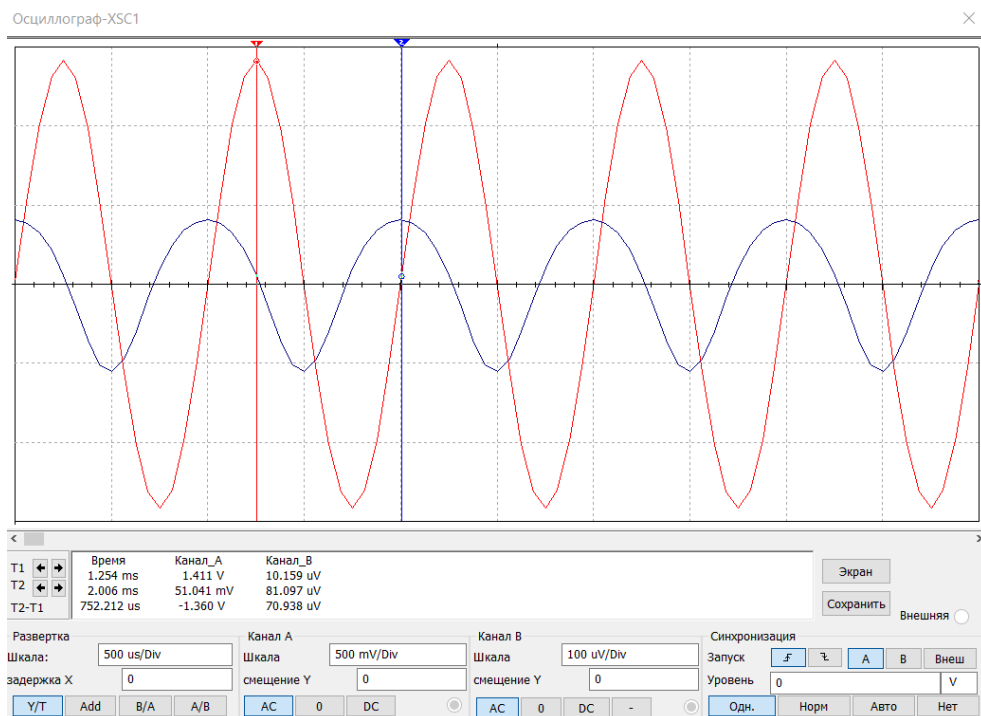


Рис. 4. Осциллограммы входного и выходного напряжения интегратора

### Список литературы

1. Проектирование устройства измерения. URL: [https://revolution.allbest.ru/physics/00378262\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/physics/00378262_0.html)
2. Резонансный частотомер. URL: <https://studall.org/all-214649.html>
3. TTC-KR – Пояс Роговского. URL: <https://www.energometrika.ru>
4. Клименко К. А. Сравнительный анализ современных датчиков тока // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 8 (31). С. 66–68.
5. Технические средства автоматизации и управления. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/5582.pdf/download/5582.pdf>



### References

1. *Proektirovanie ustroystva izmereniya = Measurement device design.* (In Russ.) Available at: [https://revolution.allbest.ru/physics/00378262\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/physics/00378262_0.html)
2. *Rezonansnyy chastotomer = Resonant frequency meter.* (In Russ.). Available at: <https://studall.org/all-214649.html>
3. *TTC-KR – Poyas Rogovskogo = TTC-KR – Rogowski coil.* (In Russ.). Available at: <https://www.energometrika.ru>
4. Klimenko K.A. A comparative analysis of modern current sensors. *Molodoy uchenyy. = Young Scientist.* 2011;1(8):66–68. (In Russ.)
5. *Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii i upravleniya = Technical means of automation and control.* (In Russ.). Available at: <https://elibr.spbstu.ru/dl/2/5582.pdf/download/5582.pdf>

**Поступила в редакцию / Received** 12.03.2022

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised** 18.04.2022

**Принята к публикации / Accepted** 05.05.2022