

ОБРАЗЦОВЫЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Казаков Михаил Константинович

*Д.т.н., профессор, Гжельский государственный университет, г. Москва
vokazak.m@gmail.com*

EXEMPLARY ANALOG-TO-DIGITAL MEASURING DEVICE DC CONVERTER

M. Kazakov

Summary. The article describes an exemplary high-DC measuring Converter intended for use as a metrological device for checking stationary high-DC measuring converters without dismantling them on-site. The Converter is made on the basis of the Rogovsky belt (air transformer). During the measurement process, the Rogovsky belt from the initial closed state (when located outside the current line) is brought to the busbar package with the measured current until it is completely closed when the package is inside. The signal from the output of the belt is integrated, and it is shown that a voltage is formed at the output of the Converter, which is proportional to the measured current of the bus package.

Keywords: large direct current, measurement, measuring Converter, Rogovsky belt, integrator, comparator.

Аннотация. Описан образцовый измерительный преобразователь большого постоянного тока, предназначенный для использования в качестве метрологического устройства для проверок стационарных измерительных преобразователей больших постоянных токов без их демонтажа на месте эксплуатации. Преобразователь изготовлен на основе пояса Роговского (воздушного трансформатора). В процессе измерения пояс Роговского из начального замкнутого состояния (при расположении вне токопровода) подносится к пакету шин с измеряемым током до полного замыкания, когда пакет находится внутри. Сигнал с вывода пояса интегрируется, при этом показано, что на выходе преобразователя формируется напряжение, которое пропорционально измеряемому току пакета шин.

Ключевые слова: большой постоянный ток, измерение, измерительный преобразователь, пояс Роговского, интегратор, компаратор.

Большие постоянные токи (БПТ) свыше 100 кА используются в химической и металлургической промышленности, в частности, в системах электроснабжения электролизеров на алюминиевых заводах, и их измерение является актуальной задачей. При этом погрешности измерения не должны превышать 0,2...0,5%, что связано с требованиями ведения технологических процессов.

Для преобразования БПТ в измерительный сигнал используются измерительные преобразователи (ИП) тока, которые выпускаются рядом зарубежных фирм, в частности, Siemens (Германия), Halmar Electronics Corp. (США), а также несколькими малыми предприятиями в нашей стране. Такие ИП имеют ряд особенностей, что

связано с уникальностью исполнения цепей большого постоянного тока свыше 100 кА.

Во-первых, как правило, ИП реализуют бесконтактный способ измерения, который предполагает оценку значения тока по параметрам создаваемого им магнитного поля [1,2,4].

Во-вторых, большинство используемых ИП тока являются громоздкими и тяжелыми устройствами (они весят несколько сотен килограмм и более) и для них очень трудно использовать традиционные формы поверочных работ, которые основаны на временном изъятии приборов из эксплуатации и доставке их в соответствующие лаборатории. Тем более что сеть таких лабораторий от-

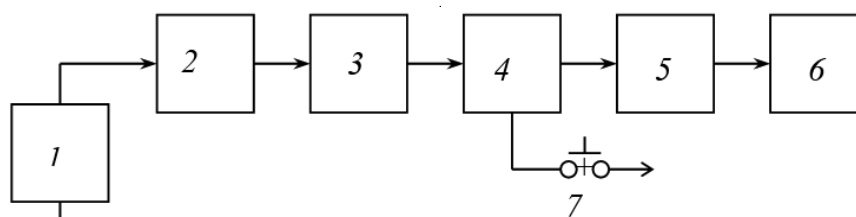


Рис.1. Структурная схема ИП тока

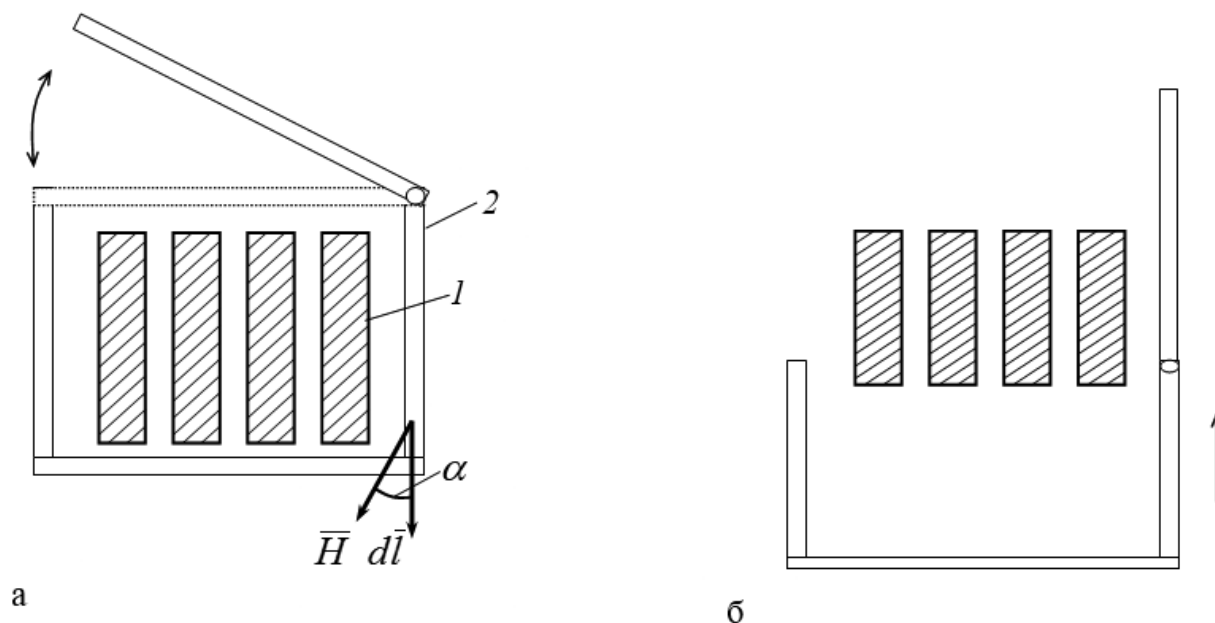


Рис.2. Пакет шин и пояс Роговского: при полном охвате пакета поясом (а); в процессе измерения тока (б)

существует. В России поверку таких ИП можно провести в Уральском научно-исследовательском институте метрологии и метрологической лаборатории при Братском алюминиевом заводе.

В-третьих, демонтаж стационарных ИП на длительное время часто недопустим вследствие непрерывности технологического процесса.

Поэтому очень актуальной является разработка и исследование переносных образцовых ИП тока, с помощью которых возможно было бы проведение поверок стационарных измерительных систем в рабочих условиях на месте эксплуатации последних.

Автором разработан переносной ИП для измерения БПТ на основе пояса Роговского [3] в виде обмотки, расположенной на разъемном неферромагнитном сердечнике, и интегратора напряжения, выполненного на операционном усилителе. На основе этой разработки был

создан образцовый ИП, погрешность которого, как показали испытания, не превысила 0,07%.

Недостатком такого ИП тока является трудность обеспечения стабильности характеристик аналоговых узлов, входящих в структуру устройства. С целью улучшения метрологических характеристик авторы разработали переносной аналого-цифровой ИП тока. Принцип действия ИП описан ниже.

Как показано на упрощенной структурной схеме (рис. 1), ИП содержит в качестве основных блоков: пояс Роговского 1, повторитель напряжения 2, масштабный усилитель 3, интегратор с время импульсным преобразованием (ВИП) 4, дешифратор 5, цифровой индикатор 6.

При полном охвате пакета шин с током I (рис. 2, а) поясом Роговского 2 (он представляет собой обмотку, намотанную на неферромагнитном сердечнике), на эле-

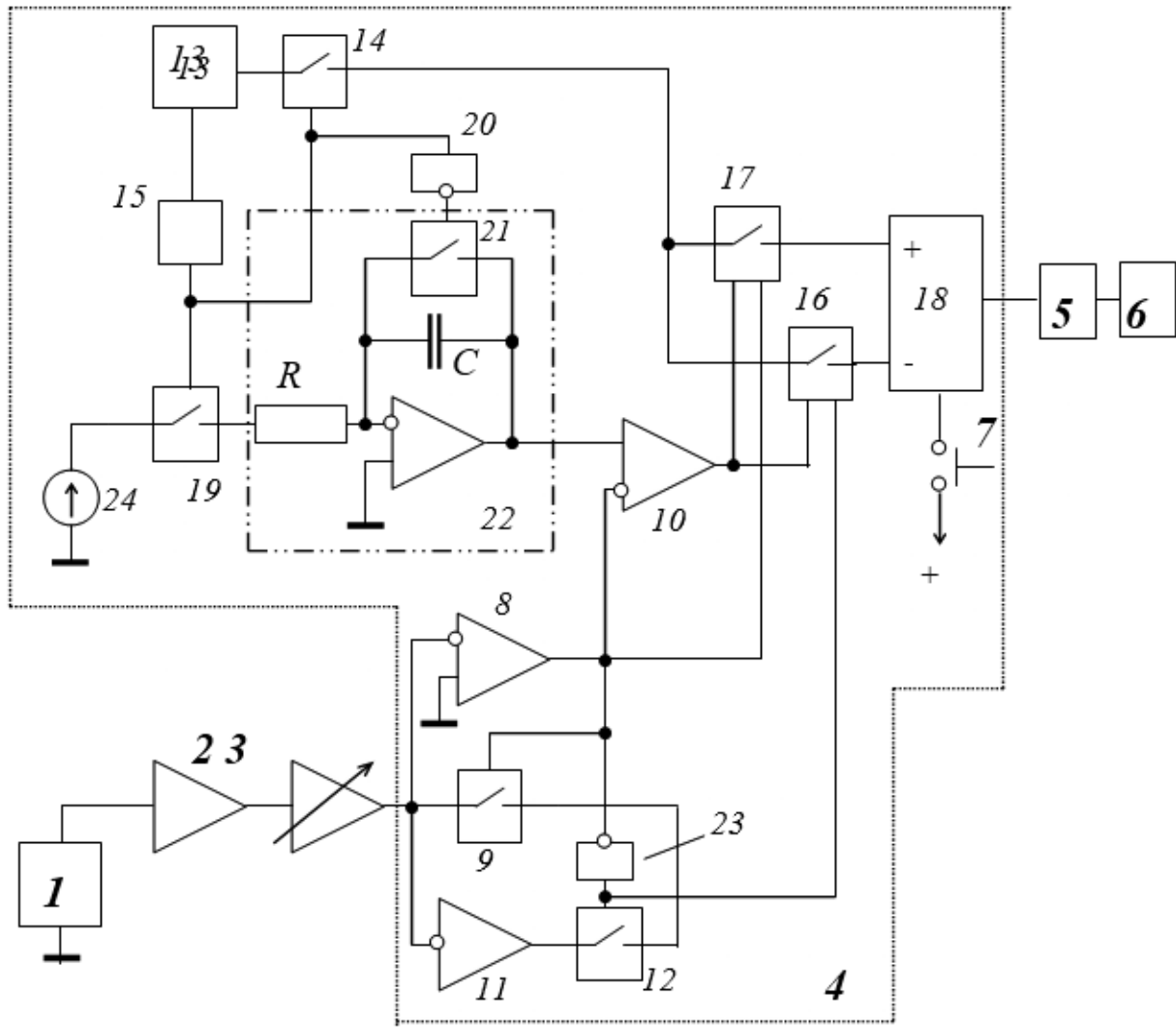


Рис.3. Схема образцового ИП тока с использованием время-импульсной модуляции

ментарном участке пояса dl потокосцепление $d\Psi$ определится уравнением

$$d\Psi = \mu_0 H S W \cos \alpha dl, \tag{1}$$

где W' — линейная плотность намотки витков пояса (число витков на единицу длины); l — осевая линия пояса Роговского, принимаемая за длину контура интегрирования; S — площадь сечения обмотки (площадь витка) пояса; α — угол между направлением векторов напряженности магнитного поля \vec{H} и $d\vec{l}$ (рис. 2, а); μ_0 — магнитная постоянная.

Полное потокосцепление на основании (1) и с учетом большого количества витков пояса определится выражением

$$\Psi = \mu_0 S W \int_l H \cos \alpha dl = \mu_0 S W I, \tag{2}$$

где на основании закона полного тока измеряемый ток

$$I = \oint H \cos \alpha dl.$$

При полном охвате поясом токопровода взаимная индуктивность между токопроводом и поясом на основании (2) определится выражением

$$M_{\max} = \frac{\Psi}{I} = \mu_0 S W. \tag{3}$$

Выражение (3) получено при условии, что размеры витка пояса малы по сравнению с размерами пакета шин и контура интегрирования (т.е. магнитный поток распределен равномерно по сечению витка).

В процессе измерения пояс Роговского из начального замкнутого состояния (при расположении вне токо-

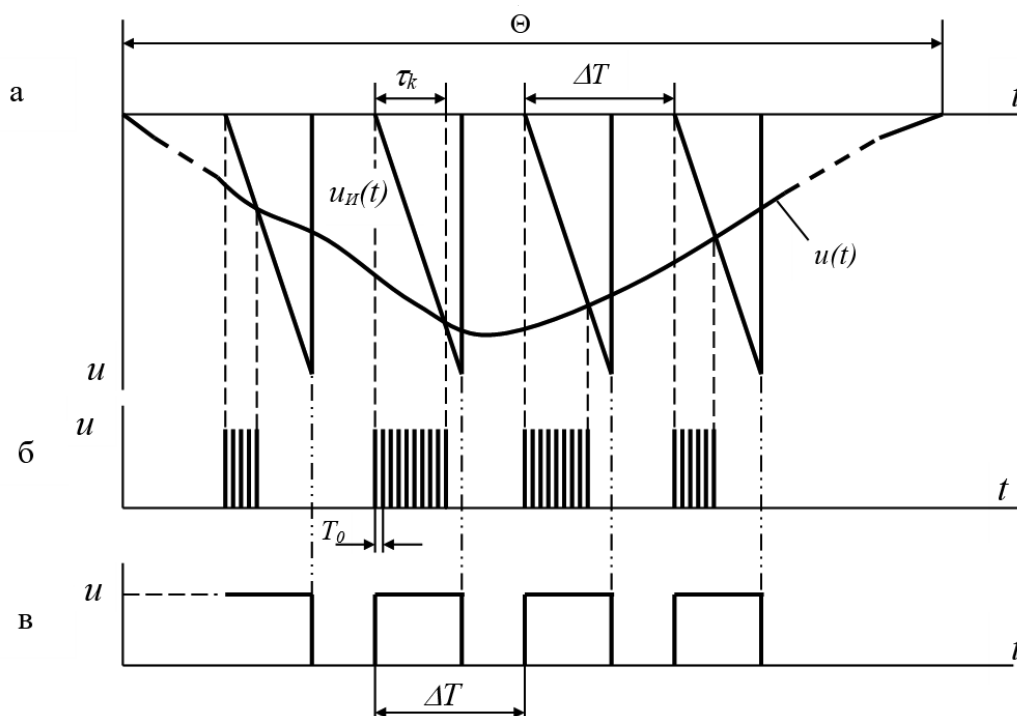


Рис.4. Диаграммы, поясняющие работу образцового ИП: преобразуемое аналоговое и развертывающее напряжения (а); импульсы на входе счетчика (б); импульсы на выходе делителя частоты (в)

провода) подносится к пакету шин (рис. 2, б) до полного замыкания, когда пакет находится внутри (рис. 2, а), при этом взаимная индуктивность M между пакетом и поясом меняется от нулевого до максимального значения. В итоге в обмотке пояса наводится ЭДС

$$e = -I \frac{dM}{dt}.$$

Эта ЭДС через повторитель напряжения 2 (рис. 1), который служит для исключения отбора мощности от пояса, что увеличивает полезный сигнал и снижает погрешности, поступает на вход масштабного усилителя 3. Его выходное напряжение $u(t)$ подается на вход интегратора с ВИП 4, в котором процесс интегрирования за время Θ измерения

$$I = \frac{1}{M_{\max}} \int_0^{\Theta} u(t) dt$$

заменяется суммированием дискрет u_k напряжения $u(t)$:

$$I = \frac{\Delta T}{M_{\max}} \sum_{k=1}^{n=\frac{\Theta}{\Delta T}} u_k, \quad (4)$$

где I — измеряемый ток; M_{\max} — взаимная индуктивность определяется выражением (3); ΔT — период

дискретизации (такт) напряжения $u(t)$; n — количество дискрет.

В интеграторе 4 (рис. 1) в каждом такте мгновенное значение напряжения преобразуется в количество импульсов с последующим суммированием с помощью счетчика, входящего в состав интегратора. Далее сигнал подается на дешифратор 5 и на цифровой индикатор 6. С помощью кнопки 7 производится сброс информации перед началом измерений.

На рис. 3 приведена более подробная схема ИП тока. На ней жирным шрифтом отмечены (теми же цифрами) блоки, представленные на рис. 1.

В интеграторе с ВИП 4, как следует из названия, используется время-импульсная модуляция, т.е. преобразование мгновенного значения напряжения в число импульсов, которые генерируются тактовым генератором 13. Процесс интегрирования с помощью такого интегратора осуществляется следующим образом.

При $t=0$ (начало измерения) напряжение $u(t)$ с выхода усилителя 3 поступает на неинвертирующий вход компаратора 10 через ключ 9, если напряжение $u(t)$ отрицательное, или через аналоговый инвертор 11 и ключ 12, если напряжение $u(t)$ положительное (бла-

годаря логическому инвертору 23 ключи 9 и 12 работают в противофазе). С этого момента, при замыкании ключа 19 и размыкании ключа 21 с помощью управляющего сигнала с делителя частоты 15 на вход аналогового интегратора 22 подается постоянное напряжение от стабильного источника 24. С выхода интегратора 22 напряжение подводится к неинвертирующему входу компаратора 10, с выхода которого подаются сигналы на включение ключей 16 и 17. Ключ 17 замыкается, если напряжение на выходе усилителя 3 отрицательное, а ключ 16, когда — положительное. При этом импульсы с тактового генератора 13 поступают на счетчик 18 (соответственно на суммирующий или на вычитающий входы). Дело в том, что напряжение $u(t)$ может изменяться по произвольному закону и иметь разные знаки, поэтому для правильной работы устройства необходимо обеспечить как суммирование импульсов, так и их вычитание.

На рис. 4, а показаны напряжение $u(t)$ напряжение на выходе масштабного усилителя 3 и развертывающее напряжение $u_H(t)$ на выходе аналогового интегратора 22, входящего в состав интегратора с ВИП 4. Поступление импульсов на вход счетчика 18 заканчивается, когда $u(t) = u_H(t)$, поскольку в этот момент с выхода компаратора 10 подается сигнал на отключение ключей 16 и 17. В итоге интервал времени τ_k (рис. 4, а), а следовательно, число импульсов, поступивших на вход счетчика 18 от генератора 13 (рис. 4, б), прямо пропорциональны мгновенному значению напряжения $u(t)$. Число вышеописанных тактов определяется периодом дискретизации $\Delta T = 1/f_\delta$, где f_δ — частота импульсов на выходе делителя частоты 15 (рис. 4, в). Во второй полупериод напряжения с выхода делителя частоты 15 ключ 21 замыкается, поэтому конденсатор интегратора 22 в этот интервал времени разряжается до нулевого значения. Отметим, что вход управления ключа 21 питается через логический инвертор 20, поэтому этот ключ работает в противофазе с ключом 19.

Суммированием сигналов за все время измерения в устройстве реализуется уравнение (4).

Для оценки влияния погрешностей, которые вносят основные элементы интегратора с ВИП 4, можно получить упрощенное уравнение преобразования аналогового напряжения $u(t)$ в число импульсов.

Выходное напряжение интегратора 22 равно

$$u_H(t) = -\frac{U_0}{RC} t,$$

где U_0 — напряжение источника 24, R и C — параметры аналогового интегратора 22.

В k -м такте работы напряжение на выходе интегратора 22 $u_H(t) = u_k$ (напряжение, снимаемое с выхода масштабного усилителя 3, а время $t = \tau_k$), поэтому интервал времени

$$\tau_k = \frac{u_k}{U_0} RC,$$

а число импульсов в k -м такте

$$m_k = \frac{\tau_k}{T_0} = \frac{u_k}{U_0} \cdot \frac{RC}{T_0}, \tag{5}$$

где T_0 — период тактовых импульсов генератора 13. Выражая из (5) u_k и подставляя полученную формулу в (4), можно записать, что

$$I = \frac{KT_0^2 U_0}{M_{\max} RC} \sum_{k=1}^{n=\frac{\Theta}{KT_0}} m_k, \tag{6}$$

где K — коэффициент деления частоты делителя 15. Формула (6) записана с учетом того, что $\Delta T = KT_0$.

Таким образом, как следует из (6), в рассматриваемом ИП тока на основе развертывающего преобразования одной функции необходимо обеспечить стабильность частоты тактового генератора 13 (параметр T_0), напряжения источника питания 24 (параметр U_0) и использовать прецизионные элементы R и C аналогового интегратора 22. Эти условия выполнить нетрудно.

Преимуществом используемого метода является то, что он позволяет в значительной степени снизить влияние смещения нулевого уровня операционного усилителя, входящего в состав аналогового интегратора 22. Кроме этого, достоинством такого ИП является также возможность использования прецизионных конденсаторов малой емкости в аналоговом интеграторе 22, что обеспечивает требуемую стабильность параметров элементов этого интегратора.

Проведены детальные исследования инструментальных погрешностей образцового ИП тока, которые вносит аналоговый интегратор, ключи, компараторы напряжения, а также погрешности, зависящей от соотношения частоты тактового генератора и частоты дискретизации (это соотношение определяется коэффициентом K деления частоты делителя 15 (см. рис. 3)). Например, погрешности аналогового интегратора обусловлены, в частности, реальными параметрами операционного усилителя: конечными значениями коэффициента усиления и входного сопротивления, не равного нулю выходного сопротивления, конечной скоростью нарастания выходного напряжения. Установлено, что наибольшую погрешность вносит компаратор, фиксирующий момент равенства аналогового

и развертывающего напряжений (компаратор I_0). Что касается коэффициента K , то он должен иметь значение не менее 3000. Отметим, что при увеличении частоты тактового генератора погрешность измерения тока снижается вследствие снижения погрешности квантования.

В целом проведенный анализ и испытания макета показали возможность снижения погрешностей измерения постоянного тока до 0,05%, что говорит о перспективности использования переносных аналого-цифровых ИП тока на основе пояса Роговского для проверок стационарных измерительных преобразователей класса 0,2 и ниже.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Ю.А., Абрамзон Г.В. Преобразователи тока для измерения без разрыва цепи. — Л.: Энергия, 1979.
2. Казаков М. К. Измерение больших постоянных токов без разрыва электрической цепи. — Ульяновск: УлГТУ, 1997.
3. Казаков М. К. Использование воздушного трансформатора в составе измерительных преобразователей тока в электроэнергетике // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — № 6–2, 2019. — С. 74–80.
4. Портной Г.Я. Датчики измерения тока и напряжения для систем автоматизации // Информатизация и Системы Управления в Промышленности. — 2011. — № 5(35). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://isup.ru/articles/16/1195/> свободный. (Дата обращения: 11.05.2020).

© Казаков Михаил Константинович (vokazak.m@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Гжельский государственный университет