

УДК 621.317.4

ПРИБОР ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ УТЕЧКИ В ГОРОДСКОМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ

Д. П. МИХАЛЕВИЧ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Средствами бесконтактного измерения электрического тока являются преобразователи и приборы, позволяющие измерять ток, не разрывая при этом электрическую цепь. Такие средства измерения не имеют гальванической связи с электрической цепью, в которой протекает измеряемый ток, и в большинстве случаев не оказывают на его величину заметного влияния.

В современных условиях необходимость бесконтактного измерения тока возникает в самых различных отраслях науки и техники и вызвана различными причинами:

- требованиями техники безопасности;
- нежелательностью или невозможностью разрыва электрической цепи;
- необходимостью сократить время измерения.

Целью данной работы является разработка цифрового прибора для бесконтактного измерения токов утечки в городском электротранспорте, анализ его метрологических характеристик.

Основная часть

Одной из возможных проблем, решаемых методами бесконтактного измерения постоянного тока, является повышение электробезопасности электротранспорта путем бесконтактного измерения тока утечки с кузова электротранспорта на землю. Троллейбус – наиболее экономичный и дешевый, не загрязняющий окружающую среду, вид транспорта. Но проблема электробезопасности троллейбусов действительно существует, особенно во время сильных дождей и обильных снегов. В связи с тем, что питание цепей троллейбуса осуществляется от контактной сети напряжением около 600 В, всякое ухудшение или нарушение изоляции токоведущих частей может вызвать появление на корпусе троллейбуса некоторого потенциала по отношению к земле. От этого потенциала зависит величина тока утечки.

Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь реализовало комплекс мер по повышению электробезопасности при перевозке пассажиров городским электрическим транспортом. С целью определения стойкости изоляции элементов кузова троллейбуса к соляному туману проводятся испытания троллейбуса в испытательной камере с соляным раствором. Величина тока утечки с кузова троллейбуса на землю должна составлять не более 3 мА при заземленной системе питания, или не более 1,5 мА – при изолированной системе питания. Запрещается эксплуатировать троллейбус, не оборудованный бортовым прибором тока утечки [1].

Троллейбусы снабжаются приборами контроля токов утечки ПКТУ-1, который отслеживает ток утечки на кузов троллейбуса в каждый момент времени. Рабочие места линейных диспетчеров и деповские посты оснащены измерителем-

сигнализатором тока утечки ИСТУ-1Л, который также отслеживает величину тока утечки на кузов троллейбуса. Применяемые приборы относятся к контактным средствам контроля качества изоляции.

На основании патента на полезную модель «Устройство для бесконтактного измерения постоянных токов» разработан цифровой прибор для бесконтактного измерения постоянных токов утечки [2]. Цифровой прибор может быть использован в системах автоматизации и контроля на железнодорожном и городском электро-транспорте, а также в нефтяной и газовой промышленности для контроля эффективности электрохимической защиты от коррозии подземного трубопровода.

В качестве чувствительного элемента используется феррозонд, выполненный на двух кольцевых сердечниках из феррита (рис. 1). Феррозонд – активный индукционный преобразователь, чувствительный к внешним магнитным полям, главным образом постоянным и медленно изменяющимся, содержащий ферромагнитные сердечники и обмотки, распределенные по их длине. Происходящие в феррозонде процессы всегда связаны с существованием двух полей – внешнего измеряемого поля и некоторого вспомогательного поля, образуемого за счет тока, протекающего в одной из обмоток. Взаимодействие этих полей в объеме сердечников, изготавливаемых из легко насыщающихся магнитных материалов, приводит к появлению в измерительной обмотке электродвижущей силы, по величине которой и судят о напряженности внешнего поля [3], [4].

Питающее напряжение частотой $f = 1000$ Гц подключено к первичным (питающим) обмоткам (w_1 и w_2) и создает магнитные потоки. Компенсационная обмотка (w_4) предназначена для компенсации магнитного поля измеряемого тока.

При протекании измеряемого тока утечки, за счет формирования постоянной намагничивающей силы, потоки феррозонда ввиду нелинейности магнитных систем, кроме первой, содержат высшие гармоники. Четные гармоники наведенной в измерительной обмотке ЭДС суммируются, формируя сигнал $E(t)$, пропорциональный измеряемому току утечки. По принципу действия феррозонд является дифференциальным датчиком: питающее напряжение первой гармоники воспринимается как синфазный сигнал, а создаваемая измеряемым током постоянная намагничивающая сила является дифференциальным сигналом.

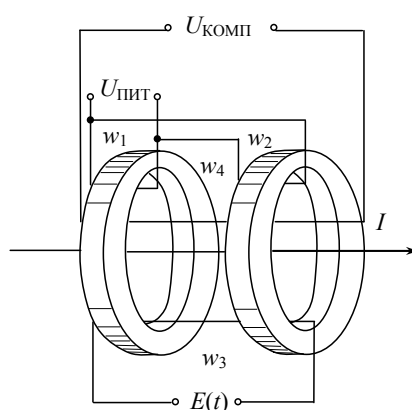


Рис. 1. Разработанный кольцевой феррозонд

Структурная схема цифрового прибора представлена на рис. 2.

Несимметричность магнитных параметров феррозонда из-за отклонения геометрических размеров, магнитной проницаемости и остаточной намагниченности приводит к смещению нуля в виде составляющей первой гармоники в сигнале $E(t)$.

Микроконтроллер (МК) формирует синусоидальное напряжение питания $U_{\text{пит}}$ и опорное напряжение второй гармоники $U_{\text{оп}}$, управляющее ключами разработанного фазового детектора (ФД) на основе фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ), предназначенного для подавления первой гармоники и выделения информационных составляющих четных гармоник сигнала $E(t)$. Выбор метода выделения полезного сигнала обусловлен желанием избежать применения критичных к питающей частоте полосовых фильтров, которые требуют согласования по первой и второй гармоникам. Фильтр низких частот (ФНЧ) формирует постоянное напряжение, пропорциональное измеряемому току.

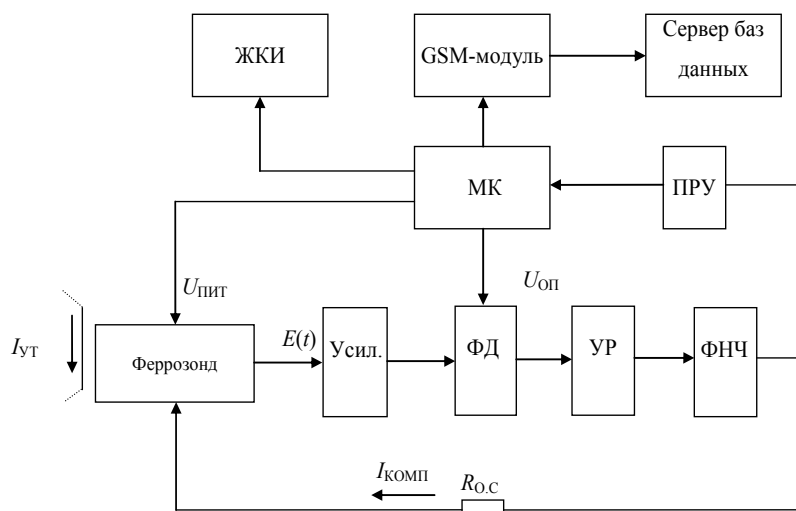


Рис. 2. Структурная схема цифрового прибора для бесконтактного измерения постоянных токов утечки

Преобразователь уровня (ПРУ) предназначен для согласования информационного сигнала с микроконтроллером. Для отображения величины тока утечки прибор оснащен жидкокристаллическим индикатором (ЖКИ).

Для передачи полученной информации по GSM-каналам с целью дальнейшей обработки диспетчерами используется GSM-модуль.

Описанный выше принцип выделения и выпрямления напряжения второй гармоники измерительного сигнала $E(t)$ представлен на рис. 3.

Так как опорное напряжение ФЧВ формируется непосредственно из питающего, устройство инвариантно к частоте первой гармоники, обеспечивает хорошее ее подавление и высокую избирательность по отношению к полезной составляющей сигнала.

Для повышения чувствительности и уменьшения влияния коммутационных помех, вносимых ключами ФЧВ, сигнал феррозонда предварительно усиливается в 100 раз. При этом ввиду усиления полезного сигнала частотой $2f = 2000$ Гц и последующего применения ФЧВ напряжение смещения усилителя и его температурный дрейф не вносят искажений в измерительный сигнал.

Усилитель рассогласования (УР) предназначен для формирования сигнала обратной связи, являющегося одновременно информационным. Этот сигнал с помощью резистора обратной связи $R_{\text{о.с}}$ (рис. 2) преобразуется в компенсационный ток, предназначенный для компенсации магнитного поля измеряемого тока утечки.

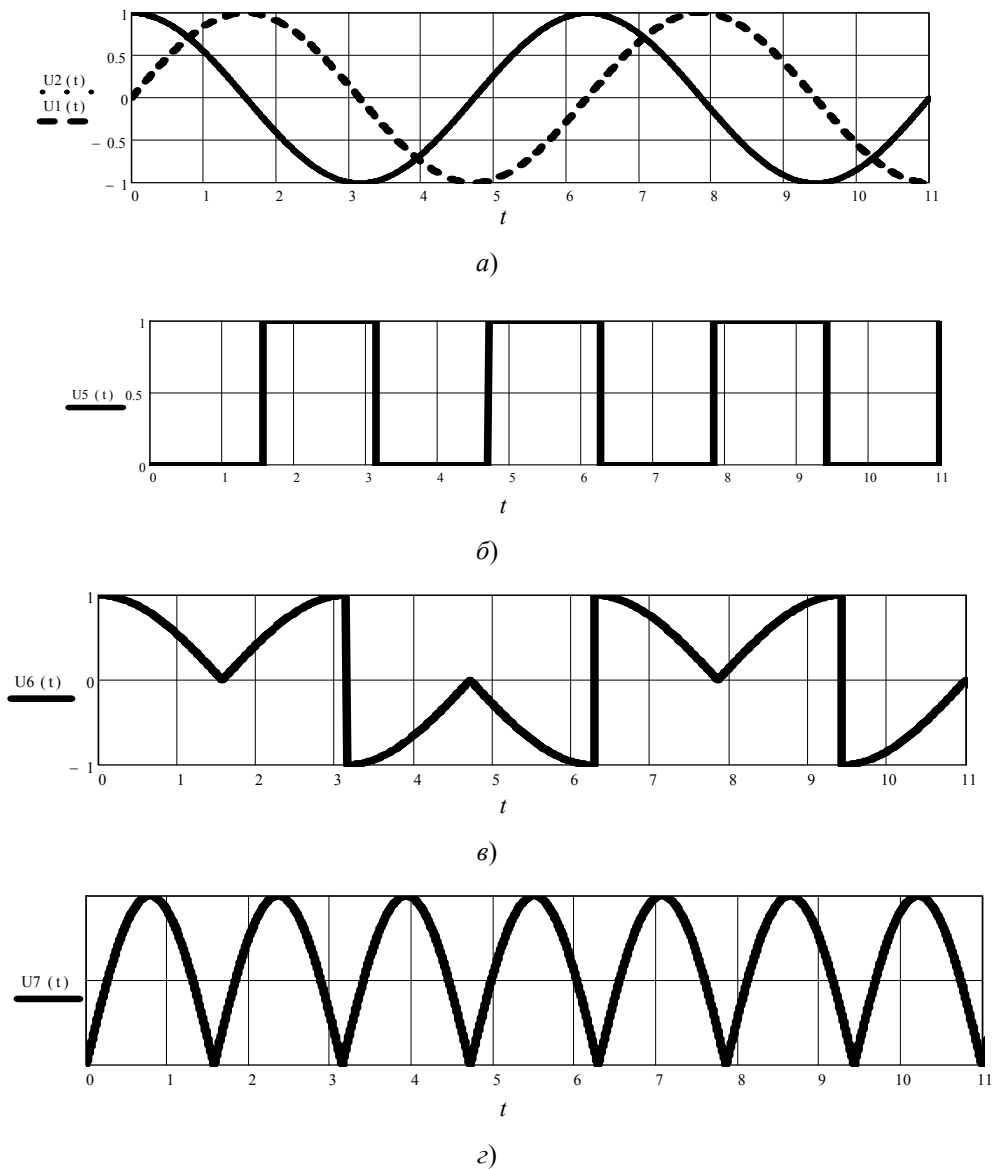


Рис. 3. Принцип работы прибора:

- a – напряжение питания кольцевого феррозонда $U_1(t)$ и смещенное по фазе на угол $\varphi = 90^\circ$ напряжение питания $U_2(t)$; δ – опорное напряжение фазового детектора;
 ϵ – выпрямленное напряжение первой гармоники измерительного сигнала $E(t)$;
 z – выпрямленное напряжение второй гармоники измерительного сигнала $E(t)$

Из следующей системы уравнений можно определить необходимый компенсационный ток и значение резистора обратной связи R_{OC} :

$$H_i = w_i I_{yT}, \text{ A} \cdot \text{виток}; \quad (1)$$

$$H_{\text{КОМП}} = w_{\text{КОМП}} I_{\text{КОМП}}, \text{ A} \cdot \text{виток}, \quad (2)$$

где H_i – напряженность магнитного поля, создаваемая измеряемым током, $\text{A} \cdot \text{виток}$; w_i – число витков в обмотке, по которой протекает измеряемый ток ($w_i = 1$ виток); I_{yT} – сила измеряемого тока утечки, A ; $H_{\text{КОМП}}$ – напряженность магнитного поля в компенсационной обмотке, $\text{A} \cdot \text{виток}$; $w_{\text{КОМП}}$ – число витков в компенсационной обмотке ($w_{\text{КОМП}} = 50$ витков); $I_{\text{КОМП}}$ – сила компенсационного тока, A .

При идеальной компенсации магнитного поля измеряемого тока разность напряженностей близка к нулю, т. е. $\Delta H = H_i - H_{\text{КОМП}} \rightarrow 0$.

Следовательно, компенсационный ток будет равен:

$$I_{\text{КОМП}} = \frac{w_i I_{\text{УТ}}}{w_{\text{КОМП}}} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{50} = 20 \cdot 10^{-6}, \text{ А.}$$

Было проведено экспериментальное исследование разработанного прибора с целью оценки его качеств, точности и чувствительности. Ниже (рис. 4) приведены исследованные параметры прибора при разомкнутой цепи обратной связи (в случае, если в структурной схеме сопротивление $R_{\text{О.С}}$ отсутствует).

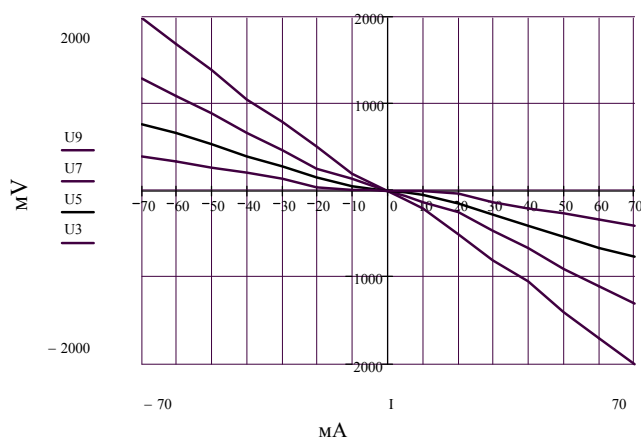


Рис. 4. Передаточные характеристики прибора при напряжениях питания датчика $E = 3; 5; 7; 9 \text{ В}$

Определим абсолютную погрешность (рис. 5) при различных напряжениях питания по формуле

$$\Delta U_k = |U_k - U_{k_{\text{ИЗМ}}}|, \text{ мВ}, \quad (3)$$

где U_k – истинное значение выходного напряжения при напряжениях питания датчика $E_k = 3; 5; 7; 9 \text{ В}$, соответственно, В; $U_{k_{\text{ИЗМ}}}$ – измеренное значение выходного напряжения при напряжениях питания датчика $E_k = 3; 5; 7; 9 \text{ В}$, соответственно, В.

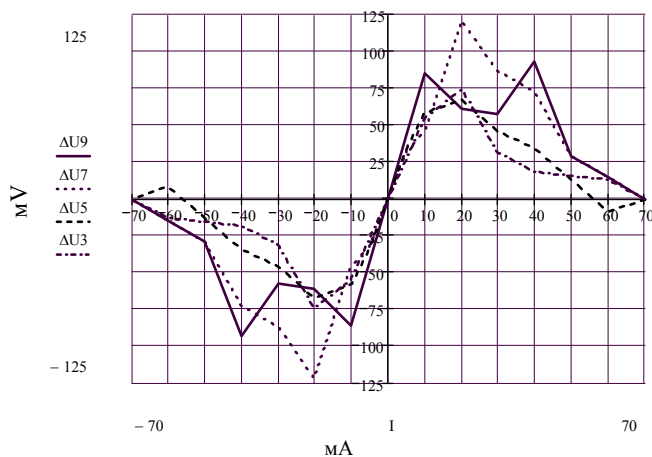


Рис. 5. Абсолютная погрешность прибора при напряжениях питания датчика $E = 3; 5; 7; 9 \text{ В}$

Определим приведенную погрешность (рис. 6) при различных напряжениях питания по формуле

$$\delta_{prUk} = 100 \left| \frac{\Delta U_k}{U_{k_n}} \right|, \% \quad (4)$$

где ΔU_k – значение абсолютной погрешности при напряжениях питания датчика $E_k = 3; 5; 7; 9$ В, соответственно, В; U_{k_n} – нормирующее значение выходного напряжения при напряжениях питания датчика $E_k = 3; 5; 7; 9$ В, соответственно, В.

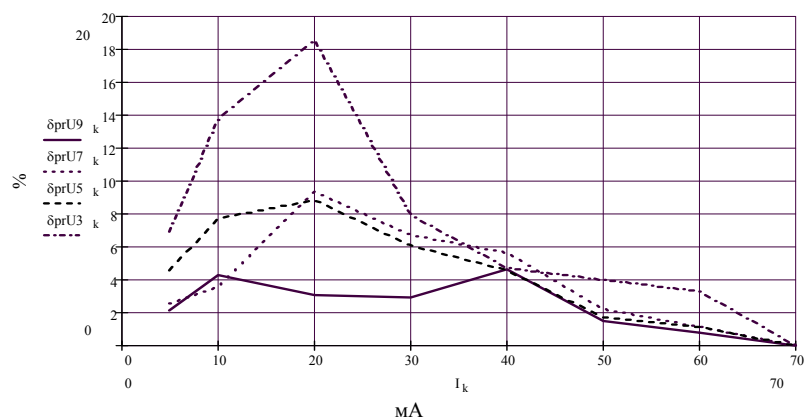


Рис. 6. Приведенная погрешность прибора при напряжениях питания датчика $E = 3; 5; 7; 9$ В

Зависимость коэффициента преобразования прибора от величины измеряемого тока утечки при различных напряжениях питания датчика представлена на рис. 7. Значение коэффициента преобразования определяется по следующей формуле:

$$Kk = \frac{U_{k_{изм}}}{I_{ут_i}}, \text{ мВ/мА}, \quad (5)$$

где $U_{k_{изм}}$ – измеренные значения выходного напряжения при напряжениях питания датчика $E_k = 3; 5; 7; 9$ В, соответственно, В; $I_{ут_i}$ – значения измеряемого тока утечки при напряжениях питания датчика $E_k = 3; 5; 7; 9$ В, соответственно, А.

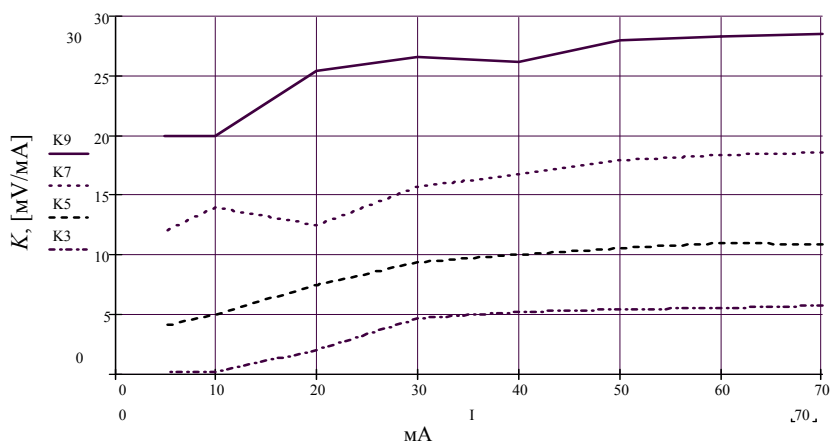


Рис. 7. Зависимость коэффициента преобразования от тока прибора при напряжениях питания датчика $E = 3; 5; 7; 9$ В

При отсутствии обратной связи погрешность прибора достигает 20 %, а чувствительность меняется от 0 до 27 мВ/мА, поэтому применение такого прибора возможно лишь в качестве порогового элемента или индикатора. По компенсационной схеме (рис. 2) погрешность прибора не превышает 0,5 %, и поэтому он может быть использован для бесконтактного измерения постоянных токов утечки.

Заключение

Прибор для бесконтактного измерения токов утечки может применяться как в качестве порогового элемента или индикатора, так и в качестве измерителя. В последнем случае прибор выполняется по компенсационной схеме. Отрицательная обратная связь по постоянной составляющей магнитного потока, формируемая с помощью дополнительной компенсационной обмотки феррозондов, позволяет линеаризовать коэффициент преобразования и повысить чувствительность.

Особенностью разработанного прибора является наличие жидкокристаллического индикатора для отображения тока утечки. Для передачи полученной информации по GSM-каналам с целью дальнейшей обработки диспетчерами используется GSM-модуль.

Примененный в приборе принцип формирования опорного напряжения фазового детектора повышает эффективность подавления нечетных гармоник сигнала феррозонда, повышает чувствительность и увеличивает точность и стабильность коэффициента преобразования, а также позволяет проводить измерения при различных частотах напряжения питания феррозонда.

Литература

1. СТБ 1729–2007. Транспорт дорожный. Троллейбусы. Требования к техническому состоянию по условиям безопасности движения. Методы проверки. – Минск, 2007.
2. Устройство для бесконтактного измерения постоянных токов : пат. 8465 Респ. Беларусь, МПК G01 R15/00 / Ю. А. Козусев, Ю. В. Крышнев, Д. П. Михалевич ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого.
3. Разин, Г. И. Бесконтактное измерение электрических токов / Г. И. Разин. – М. : Атомиздат, 1974. – 156 с.
4. Афанасьев, Ю. В. Феррозонды / Ю. В. Афанасьев. – Л. : Энергия, 1969. – 167 с.

Получено 23.06.2015 г.