

УДК 621.317

ПРЕЦИЗИОННЫЙ КОМПАРАТОР ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

М.Н.Сурду¹, докт.техн.наук, А.Л.Ламеко², Д.В.Мелешук³, канд.техн.наук, В.Н.Кикало⁴, В.В.Копшин⁵

^{1,2} – Научно-исследовательский институт прецизионных измерений, ул. Фрунзе, 104, Киев, Украина

³ – Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

^{4,5} – Украинский государственный научно-производственный центр стандартизации, метрологии и сертификации, ул. Метрологическая, 4, Киев, Украина

Рассмотрен вопрос поверки измерительных трансформаторов тока промышленной частоты. Представлено описание принципа работы и конструкции прецизионного компаратора токов. Компаратор обеспечивает измерение относительной разности токов с высокой точностью. Измерительная цепь прибора уравнивается с помощью индуктивного делителя. Вычисление результата измерения осуществляется с учетом остаточного сигнала неравновесия, что позволяет получить высокую точность измерений при уменьшении разрядности индуктивного делителя. Созданный прибор предназначен для определения погрешностей трансформаторов тока методом сравнения с эталонным трансформатором. Также в устройстве предусмотрен режим измерения относительной разности напряжений. Это позволяет определять погрешности обмоток трансформаторов методом сравнения с опорной обмоткой, расположенной на исследуемом трансформаторе. Библ.14, табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: компаратор, трансформатор тока, поверка, погрешность, метод сравнения, индуктивный делитель

Трансформаторы тока получили широкое применение в электроэнергетике. Они используются для передачи информации о протекающем токе измерительным приборам, устройствам защиты и управления. По вопросам разработки и применения трансформаторов тока велись и ведутся большие исследовательские работы, результаты которых освещены во многих печатных работах [1–3]. Для эксплуатации трансформаторы должны аттестоваться и проходить метрологическую поверку согласно установленным нормативам (ГОСТ 8.217-87). Эти процедуры осуществляются с помощью специальных средств измерения методами сравнения с мерой [9]. Соотношение между коэффициентом передачи испытуемого трансформатора и коэффициентом передачи, воспроизводимым мерой, устанавливается посредством прибора сравнения, на который подаются выходные сигналы обоих трансформаторов. Наиболее точными для таких измерений являются мостовые методы сравнения [4,6]. Использование прецизионной меры и мостовых методов сравнения обеспечивает высокую точность измерения.

Для измерения погрешностей трансформаторов тока используются приборы сравнения, основанные на компараторах тока [11–13]. На сегодняшний день существует ряд подобных устройств, применяемых при поверке трансформаторов тока на территории СНГ (см. таблицу).

Тип	Диапазон измерений погрешности		Предел допускаемой погрешности	
	токовой, %	угловой, мин	токовой, %	угловой, мин
АИТ	От $\pm 0,3$ до ± 10	От -10 до +650	От $\pm 0,003$ до $\pm 0,10$	От $\pm 0,3$ до ± 10
K507	От $\pm 0,1$ до ± 10	От -3,5 до +650	От $\pm 0,001$ до $\pm 0,10$	От $\pm 0,1$ до ± 10
K535	От $\pm 0,2$ до ± 20	От ± 20 до ± 200	$\pm 0,005$	$\pm 0,3$
КТ01	От $\pm 0,2$ до ± 20	От ± 20 до ± 2000	От $\pm 0,001$ до $\pm 0,10$	От $\pm 0,1$ до ± 10

Для определения погрешностей коэффициентов преобразования трансформаторов могут применяться прецизионные приборы ведущих зарубежных производителей метрологического оборудования. Автоматизированный высоковольтный мост MI 7010 (Measurements International) позволяет определять отношение токов в диапазоне от 0 до 10 % (при номинальном токе до 10 А) с погрешностью < 10 ppm по фазе и величине тока. Трансформаторный логометр 4167 F (Tinsley) используется для проверки и измерения: отношения напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора в диапазоне 0,75–10000 с погрешностью $\pm 0,1\%$; разности фаз напряжений в диапазоне $\pm 9,9^\circ$ с погрешностью $\pm 0,1^\circ$.

Улучшение технических характеристик трансформаторов тока, развитие их конструкций и технологий изготовления приводит к тому, что современные средства сравнения и поверки уже не удовлетворяют технико-экономическим требованиям к подобной аппаратуре. Существующая западная аппаратура обладает приемлемыми метрологическими характеристиками, однако отличается и большими габаритами, и высокой ценой. На территории СНГ до сих пор используется морально устаревшее оборудование, разработанное более четверти века назад. Эта аппаратура по своим техническим характеристикам устарела и не соответствует современным требованиям. Поэтому возникает задача создания отечественной аппаратуры, удовлетворяющей сегодняшнему состоянию электроэнергетической отрасли.

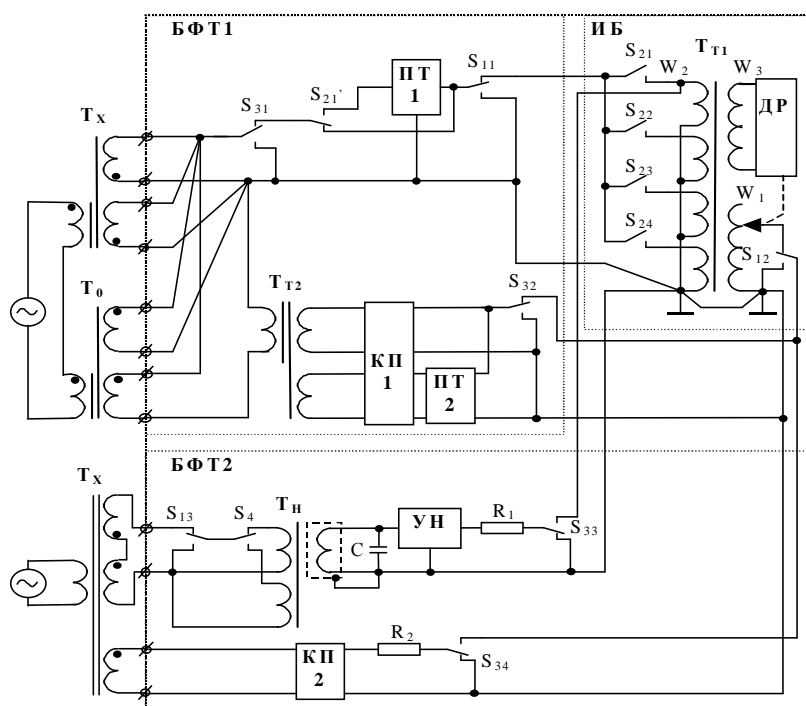
В основу решения поставленной задачи легли результаты работ по разработке прецизионного компаратора токов промышленной частоты для эталона коэффициента передачи высоких напряжений [10,14]. В результате создан компаратор для измерения погрешностей трансформаторов тока.

Прибор имеет два режима работы: режим измерения погрешностей трансформаторов тока при сравнении с эталонным трансформатором тока и режим измерения погрешностей обмоток испытуемого трансформатора при сравнении с его опорной обмоткой.

В первом режиме определяется комплексное значение отношения двух токов: разностного тока вторичных обмоток эталонного и испытуемого трансформаторов и вторичного тока эталонного трансформатора. Результатом измерения являются значения токовой и угловой погрешности испытуемого трансформатора тока. Во втором режиме определяется комплексное значение относительной разности двух напряжений. Результатом измерения является погрешность коэффициента связи обмоток испытуемого трансформатора.

На рисунке показана структурная схема компаратора в состоянии, когда производится сравнение испытуемого T_x и эталонного T_0 трансформаторов (режим первый). Также на рисунке показано подключение испытуемого трансформатора T_x во втором режиме.

На схеме обозначены: БФТ1 – блок формирования токов для первого режима; БФТ2 – блок формирования токов для второго режима; ИБ – измерительный блок; T_{T1} , T_{T2} – трансформаторы тока; T_H – трансформатор напряжения; КП1, КП2 – коммутаторы полярности; ПТ1, ПТ2 – повторители тока; УН – усилитель напряжения; ДР – детектор равновесия. Переключение режимов работы осуществляется с помощью ключей S_{31} , S_{32} , S_{33} , S_{34} .



Основой устройства является автоматический уравниваемый компаратор переменного тока [14], собранный на базе трансформатора тока T_{T1} . Трансформатор T_{T1} содержит обмотки W_1 и W_2 , через которые протекают сравниваемые токи I_1 и I_2 , и индукторную обмотку W_3 , служащую для выделения сигнала неравновесия. В зависимости от выбранного

диапазона измерения ток I_2 поступает на один из выводов обмотки W_2 (нормированное число витков обмотки коммутируется с помощью ключей $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}$: 0,001 – на первом пределе; 0,01 – на втором пределе; 0,1 – на третьем пределе и 1 – на четвертом пределе). Нормированное число витков обмотки W_1 может меняться от 0,001 до 1,0 с шагом в 0,001. Сигнал неравновесия измеряется в детекторе равновесия. Коммутаторы S_{11}, S_{12} служат для отключения входов трансформатора T_{T1} при автоматическом измерении нулей компаратора. Их значения учитываются при измерениях путем вычитания из сигнала неравновесия.

Компаратор уравнивается посредством регулирования числа витков обмотки W_1 . Условием равновесия является нулевое значение тока в индикаторной обмотке W_3 компаратора (при этом $I_2/I_1 = n_{W1}/n_{W2}$, где n_{W1}, n_{W2} – числа витков обмоток W_1 и W_2).

Компаратор уравнивается с погрешностью от дискретности, относительное значение которой лежит в пределах 0,01–0,001. Такая погрешность измерения компаратора недопустима. Поэтому в компараторе производится измерение расстояния ΔK между его текущим состоянием и точкой истинного равновесия, выраженного в единицах отношения чисел витков обмоток.

Основой этого процесса является вариационный метод измерения [5], который предусматривает изменение (вариацию) сигнала неравновесия на известное с необходимой точностью значение. Расстояние ΔK определяется следующим образом. При определенном числе витков обмотки W_1 трансформатора T_{T1} измеряются ортогональные составляющие тока неравновесия компаратора I_{H1} , выделяемого на детекторе равновесия ($I_{H1} = A_1 + jB_1$, где A_1 и B_1 – его синфазная и квадратурная составляющие). Далее производится вариация (изменение числа витков обмотки W_1 на величину n_B) и измеряются ортогональные составляющие нового сигнала неравновесия $I_{H2} = A_2 + jB_2$. Искомое значение ΔK определяется по формуле

$$\Delta K = \frac{n_B}{n_{W2}} \times \frac{I_{H1}}{I_{H2} - I_{H1}}. \quad (1)$$

Подставляя в формулу (1) выражения для сигналов неравновесия, получим выражение

$$\Delta K = \frac{n_B}{n_{W2}} \left(\frac{A_1(A_1 - A_2) + B_1(B_1 - B_2)}{(A_1 - A_2)^2 + (B_1 - B_2)^2} + j \frac{B_1(A_1 - A_2) - A_1(B_1 - B_2)}{(A_1 - A_2)^2 + (B_1 - B_2)^2} \right). \quad (2)$$

С учетом ΔK значение комплексного отношения токов I_2 и I_1 определяется следующим образом:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_{W1}}{n_{W2}} + \text{Re}(\Delta K) + j \text{Im}(\Delta K). \quad (3)$$

В режиме аттестации трансформаторов (при определении погрешности коэффициента трансформации испытуемого трансформатора тока T_X путем сравнения с эталонным трансформатором T_0) сравниваемые токи I_2 и I_1 формируются в блоке формирования токов БФТ1. Прибор рассчитан для работы с двухступенчатыми трансформаторами тока (в случае одноступенчатых трансформаторов используются входы для грубых каналов). Для формирования измерительной цепи вторичные обмотки трансформаторов подключаются к входам блока (рисунок), где соединяются встречно-параллельно, и в обмотке W_2 компаратора будет течь их разностный ток ($I_2 = I_{T0} - I_{TX}$).

На первом диапазоне сопротивление индикатора разностного тока, в роли которого выступает обмотка W_2 с максимальным числом витков, при больших (порядка 0,1%) погрешностях может оказаться чрезмерно большим, что приведет к дополнительной составляющей в мультипликативной погрешности измерения. Для снижения входного сопротивления компаратора на этом диапазоне в цепь прохождения тока I_2 введен (с помощью ключа S_{21}) повторитель тока ПТ1, входное сопротивление которого менее 0,1 Ом, а погрешность коэффициента передачи не превышает 0,01%.

Опорный ток I_1 регулируемой обмотки W_1 компаратора формируется из тока грубого канала эталонного трансформатора T_0 при помощи двухступенчатого индуктивного делителя тока (трансформатор T_{T2}) с коэффициентом передачи $K_{TT2} = 10^{-3}$. Выходное сопротивление такого индуктивного делителя недостаточно велико для точного формирования опорного тока I_1 . Поэтому между выходом делителя тока и обмоткой точного канала делителя включен повторитель тока ПТ2, погрешность передачи тока у которого менее 10^{-3} , а выходное сопротивление превышает 10–20 МОм. Если погрешность передачи сильноточного канала делителя не превышает 10^{-3} и погрешность передачи слаботоч-

ного канала составляет такую же величину, тогда погрешность формирования опорного тока делителем тока будет меньше 10^{-6} . Эта погрешность будет выступать в виде мультипликативной составляющей погрешности измерения погрешности коэффициента передачи испытуемого трансформатора и является пренебрежимо малой величиной.

В связи с тем, что погрешность испытуемого трансформатора является биполярной величиной, в устройство введен коммутатор полярности опорного тока КП₁. Вносимое им дополнительное нагрузочное сопротивление для индуктивного делителя не существенно повлияет на погрешность измерения.

Таким образом, погрешность коэффициента передачи тока испытуемого трансформатора при помощи компаратора в первом режиме, согласно (3), будет определяться выражением

$$\frac{I_{ТХ} - I_{Т0}}{I_{Т0}} = \frac{I_2}{I_1} \times K_{ТТ2} = \left(\frac{n_{W1}}{n_{W2}} + \Delta K \right) \times K_{ТТ2}. \quad (4)$$

Второй режим работы компаратора предусмотрен для автономной аттестации эталонных трансформаторов тока, которые содержат специальные метрологические обмотки [1]. Методика аттестации основана на принципе дуальности и предполагает определение погрешности коэффициента передачи напряжения трансформатора тока в режиме преобразования напряжения [8]. При этом используются результаты измерений погрешностей коэффициентов связи первичных и вторичных обмоток трансформатора [7].

В этом режиме сравниваемые в измерительном блоке компаратора токи I_2 и I_1 формируются в блоке формирования токов БФТ2, состоящем из двух каналов преобразования напряжения в ток. Первый канал содержит дифференциальный трансформатор напряжения T_H на входе, усилитель напряжения УН и резистор R_1 . Коэффициент передачи дифференциального трансформатора по напряжению может принимать два значения: 10 и 100 (выбирается с помощью ключа S_4). Он построен таким образом, что емкость между первичной и вторичной обмотками близка к нулю (менее 0,01 пФ). При помощи внешнего конденсатора (С) трансформатор настроен в резонанс на частоту 50 Гц. Усилитель УН построен по неинвертирующей схеме и имеет коэффициент усиления, равный 100. Этот усилитель нагружен на точный резистор R_1 с сопротивлением, равным 10 кОм. Второй канал преобразователя представляет собой просто точный резистор R_2 с сопротивлением 10 кОм.

На вход первого канала подается разностное напряжение ΔU_X двух сравниваемых равновитковых обмоток трансформатора T_X . Это напряжение усиливается дифференциальным трансформатором T_H и усилителем напряжения УН (общий коэффициент усиления равен K_Y) и подается на точный резистор R_1 . Ток, протекающий по этому резистору, равный $I_2 = K_Y \Delta U_X / R_1$, поступает на обмотку W_2 компаратора. На вход второго канала подается опорное напряжение U_0 с одной из обмоток исследуемого трансформатора. Это напряжение поступает на резистор R_2 , так, что через этот резистор и обмотку W_1 компаратора протекает образцовый ток $I_1 = U_0 / R_2$.

Таким образом, погрешность коэффициента связи сравниваемых обмоток испытуемого трансформатора, согласно (3), в режиме автономной аттестации определяется выражением

$$\frac{\Delta U_X}{U_0} = \frac{I_2}{I_1} \times \frac{R_1}{K_Y R_2} = \left(\frac{n_{W1}}{n_{W2}} + \Delta K \right) \times \frac{R_1}{K_Y R_2}. \quad (5)$$

Если $R_1 = R_2$, а U_0 равно напряжению на сравниваемых обмотках, то K_Y^{-1} – коэффициент пропорциональности между погрешностью коэффициента связи обмоток испытуемого трансформатора и отношением чисел витков обмоток W_1 и W_2 компаратора токов.

Созданный прибор имеет следующие характеристики:

- ток вторичной обмотки эталонного трансформатора: 10 мА – 6 А;
- разностный ток вторичных обмоток трансформаторов: 0 – 6 А;
- диапазон измерения погрешности трансформаторов: от 0 до ± 100 %;
- абсолютная основная погрешность при измерении в первом режиме:
 - относительной разности (δ_1) действующих значений токов: $\pm (5 \times 10^{-5} \times \delta_1 + 10^{-8+n}) / K_T$;
 - угла между векторами токов: $\pm 0,01 \times 10^{n-1,5} / K_T$ (мин),

где n – номер диапазона от 1 до 4; $K_T=0,01-1,2$.

- диапазон измерения относительной разности напряжений: от 0 до $\pm 0,1$ %;
- абсолютная основная погрешность при измерении во втором режиме:
 - относительной разности (δ_U) модулей напряжений: $\pm (10^{-7}+10^{-3}\times\delta_U)$;
 - угла между векторами напряжений: $\pm 0,1$ мин.

Выводы. Разработанный прецизионный компаратор трансформаторов тока позволяет измерять погрешность испытуемых трансформаторов тока методом сравнения с эталонным трансформатором с погрешностью менее 10^{-7} , а также погрешность коэффициента связи обмоток эталонных трансформаторов тока с погрешностью менее 10^{-6} .

Использование вариационного метода уравнивания и учет значения сигнала неравновесия при вычислении результата измерения позволили достичь высокой точности измерений при упрощении аппаратной части устройства.

Созданный образец компаратора используется в ГП «Укрметрестандарт». Полученные результаты подтвердили его высокие метрологические характеристики.

1. Анохін Ю.Л., Ісаєв В.В., Мелещук Д.В., Кікало В.М., Копшин В.В., Носко С.М., Сурду М.М. Вторинний еталон одиниці коефіцієнта масштабного перетворення сили змінного струму // Труды VI Международной научно-технической конференции "Метрологія та вимірювальна техніка" – Харьков: ГНПО «Метрологія». – 2008. – Т.1 – С. 232–235.

Anokhin Yu.L., Isaev V.V., Meleshchuk D.V., Kikalo V.M., Kopshyn V.V., Nosko S.M., Surdu M.M. Secondary standard of the unit of coefficient for global conversion of changeable current power // Trudy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Metrologiia ta vymiriuvalna tekhnika" – Kharkov; GNPO "Metrologiia". – 2008. – Vol.1. – P. 232–235. (Ukr.)

2. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Жалалис Л.В. и др. Трансформаторы тока. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.
Afanasev V.V., Adonev N.M., Zhalalis L.V. and others. Current transformers. – Leningrad: Energiia, 1980. – 344 p. (Rus.)

3. Вавин В.Н. Трансформаторы тока. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 105 с.

Vavin V.N. Current transformers. – Moskva-Leningrad: Energiia, 1966. – 105 p. (Rus.)

4. Гриневич Ф.Б., Грохольский А.Л., Цапенко М.П., Соболевский К.М. Трансформаторные измерительные мосты. – М.-Л.: Энергия, 1970. – 280 с.

Grinevich F.B., Grokholskii A.L., Tsapenko M.P., Sobolevskii K.M. Transformer measurement bridges. – Moskva-Leningrad: Energiia, 1970. – 280 p. (Rus.)

5. Гриневич Ф.Б., Сурду М.Н. Высокоточные вариационные измерительные системы переменного тока. – Киев: Наукова думка, 1989. – 190 с.

Grinevich F.B., Surdu M.N. Highprecise variational measurement systems of changeable current. – Kyiv: Naukova dumka, 1989. – 190 p. (Rus.)

6. Карандеев К.В. Мостовые методы измерений. – Киев: Гостехиздат УССР, 1953. – 245 с.

Karandeev K.V. Bridge methods of measurements. – Kyiv: Gostekhizdat USSR, 1953. – 245 p. (Rus.)

7. Ламеко А.Л., Сурду М.Н. и др. Цифровая калибровка трансформатора в вариационных мостах переменного тока // Технічна електродинаміка. – 2000. – № 5. – С. 68–71.

Lameko A.L., Surdu M.N. and others. Digital calibration of transformer in variation bridges of changeable current // Tekhnichna elektrodynamika. – 2000. – №5. – P. 68–71. (Rus.)

8. Мелещук Д.В., Сурду М.Н., Кікало В.Н. Применение принципа дуальности при определении метрологических характеристик трансформаторов тока // Технічна електродинаміка. – 2008. – №6. – С. 73–77.

Meleshchuk D.V., Surdu M.N., Kikalo V.N. Application of duality principle at determination of metrological characteristics of current transformers // Tekhnichna elektrodynamika. – 2008. – №6. – P. 73–77. (Rus.)

9. Попов В.С. Электротехнические измерения и приборы. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 544 с.

Popov V.S. Electrotechnical measurements and appliances. – Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. – 544 p. (Rus.)

10. Сурду М.Н., Бондарчук С.А., Орнатский О.А. и др. Комплекс оборудования для калибровки высоковольтных эталонных трансформаторов // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 2. – С. 74–78.

Surdu M.N., Bondarchuk S.A., Ornatetskii O.A. and others. Equipment complex for calibration of highvoltage standard transformers // Tekhnichna elektrodynamika. – 2002. – №2. – P. 74–78. (Rus.)

11. Kibble B.R., Rainer G.H. Coaxial alternative current bridges. – Bristol: Pdam Hilder, 1984. – 203 p.

12. Miljanic P.N., Kusters N.L., Moore W.J. The development of the current comparator a high accuracy A-C ratio measuring device // Communications and Electronics. – 1962. – № 63. – P. 359–368.

13. More M.J.M., Milianic P.N. The current comparators. – Peter Peregrinus Ltd on behalf of The Institution of The Electrical Engineers, London, 1988. – 120 p.

14. Surdu M.N., Ornatskii O.A., Bondarchuk S.A., Karpov I.A., Kopshyn V.V., Kikalo V.N., Vogel H., Eckardt H. Precise current comparator the calibration of high voltage standard transformers // CPEM 2000. – Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest. – Sydney. Australia, 2000 (14th–19th May). – P. 411–412.

УДК 621.317

М.М.Сурду¹, докт. техн. наук, О.Л.Ламеко², Д.В.Мелешчук³, канд. техн. наук, В.М.Кікало⁴, В.В.Копшин⁵
^{1,2} – Науково-дослідницький інститут прецизійних вимірювань,
вул. Фрунзе, 104, Київ, Україна
³ – Інститут електродинаміки Національної академії наук України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
^{4,5} – Український державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації,
вул. Метрологічна, 4, Київ, Україна

Прецизійний компаратор трансформаторів струму

Розглянуто питання повірки вимірювальних трансформаторів струму промислової частоти. Представлено опис принципу роботи та конструкції прецизійного компаратора струмів. Компаратор забезпечує вимірювання відносної різниці струмів з високою точністю. Вимірювальний ланцюг прилада зрівноважується за допомогою індуктивного подільника. Обчислення результату вимірювання здійснюється з урахуванням залишкового сигналу нерівноваги, що дозволяє отримати високу точність вимірювань при зменшенні розрядності індуктивного подільника. Створений прилад призначений для визначення похибок трансформаторів струму методом порівняння з еталонним трансформатором. Також у пристрої передбачено режим вимірювання відносної різниці напруг. Це дозволяє визначати похибки обмоток трансформаторів методом порівняння з опорною обмоткою, що розташована на досліджуваному трансформаторі. Бібл.14, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: компаратор, трансформатор струму, повірка, похибка, метод порівняння, індуктивний подільник.

М.М.Сурду¹, О.Л.Ламеко², Д.В.Мелешчук³, В.М.Кікало⁴, В.В.Копшин⁵
^{1,2} – Scientific and research Institute of precise measurements,
Frunze str., 104, Kyiv, Ukraine.
³ – Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.
^{4,5} – Ukrainian State Scientific and Research center for Standartization, Metrology and Certification,
Metrologicheskaya str., 4, Kyiv, Ukraine.

Precise comparator of current transformers

Verification of the current measurement transformers on the power frequency is taken up. The description for operation principles and constructions of precision current comparator are represented. Comparator provides measurement of relative currents difference of high precision. Measurement chain of device is equilibrated with help of inductive divider. Calculation of the result of measurement is operated with taking of final non-equilibrium signal that permits us to receive high precision of measurements during lessening of inductive divider. The device is elaborated for determination of current transformers error by method of standard transformer comparison. There is also measurement of relative voltage difference in the device. It helps in determination of windings errors of transformers by comparison with a reference winding located on the test transformer. References 14, table 1, figures 1.

Key words: comparator, current transformer, verification, error, comparison method, inductive divider.

Надійшла 07.06.2010
Received 07.06.2010