

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-384

P13-98-384

Г.Г.Казакова, В.В.Калиниченко, С.Б.Федоренко

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА  
ВИТКОВ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ОБМОТКИ  
В МАГНИТНЫХ КОМПАРАТОРАХ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА

1998

Магнитное сравнение постоянных токов широко применяется в технике измерения больших постоянных токов [1]. Базовым узлом при таком сравнении является магнитный компаратор, содержащий измерительную и компенсационную обмотки, а также преобразователь неравновесия ампервитков этих обмоток.

Обычно измерительная обмотка  $W_{и}$  содержит один виток и выполняется в виде шины соответствующего сечения (проходной виток). Компенсационная обмотка  $W_{к}$  содержит от нескольких сотен витков до нескольких десятков тысяч витков. В силу объективных и субъективных причин в процессе производства происходят ошибки при намотке  $W_{к}$ , поэтому технологическая поверка, обеспечивающая точное знание числа витков  $W_{к}$ , необходима. Как будет ясно из описания работы обсуждаемого устройства, с его помощью обеспечивается точное определение  $W_{к}$ , что в свою очередь позволяет определить коэффициент преобразования компаратора наиболее точным образом.

Стандартная методика поверки любого средства для измерения (измерителя) некоторой электрической величины состоит в том, что с помощью поверяемого средства производится измерение электрической величины, значение которой определяется с помощью эталонного измерителя данной электрической величины. Интересующие параметры поверяемого средства определяются по результатам этих измерений.

В нашем случае известная методика может быть реализована следующим образом. С помощью образцового компаратора измеряется величина постоянного тока  $I_{и}$ , пропускаемого одновременно по измерительным обмоткам образцового и поверяемого компараторов. Не анализируя подробно источники погрешностей при измерении тока  $I_{и}$  укажем, что это измерение производится с относительной погрешностью  $\delta_0$ . Поверяемый компаратор осуществляет преобразование тока  $I_{и}$  в ток  $I_{кп}$ , который измеряется с относительной погрешностью  $\delta_{п}$ . Коэффициент преобразования  $K_{п}$  поверяемого компаратора по этой известной методике определяется как

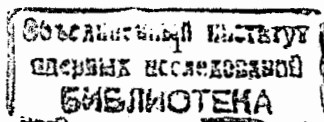
$$K_{п} = I_{и}/I_{кп}.$$

Относительная погрешность определения  $K_{п}$  составляет в этом случае

$$dK_{п}/K_{п} = \delta_0 - \delta_{п} = \delta_{\Sigma}.$$

С другой стороны, с учетом известных допущений коэффициент преобразования компаратора определяется [1] как

$$K = W_{к}/W_{и},$$



где  $W_k$  и  $W_n$  - соответственно числа витков компенсационной и измерительной обмоток ( $W_k$  и  $W_n$  - конструктивные параметры узла магнитного сравнения компаратора). При  $I_k W_k > 100$  ампервитков относительное отклонение действительного значения  $K$  от теоретического, определяемого через конструктивные параметры  $W_k$  и  $W_n$ , составляет менее  $10^{-5}$ . Поэтому важно иметь возможность точного измерения числа витков компенсационной обмотки магнитного компаратора при его изготовлении. Это позволит на практике наиболее точным образом определять значение коэффициента преобразования каждого изготовленного компаратора через его конструктивные параметры, т.е. по формуле

$$K = W_k / W_n.$$

Предложенное устройство [2], упрощенная блок-схема которого представлена на рис.1 содержит: 1 - регулируемый источник постоянного тока; 2 - образцовый компаратор постоянного тока; 3, 4 - измерительную и компенсационную обмотки образцового компаратора; 5 - усилитель постоянного тока; 6 - преобразователь неравновесия ампервитков обмоток 3 и 4; 7 - коммутатор; 8 - нуль-индикатор; 9, 10 и 11, 12 - зажимы для подключения поверяемого компаратора; 13 - поверяемый компаратор; 14 и 15 - измерительную и компенсационную обмотки поверяемого компаратора; 16 - преобразователь неравновесия ампервитков обмоток 14 и 15.

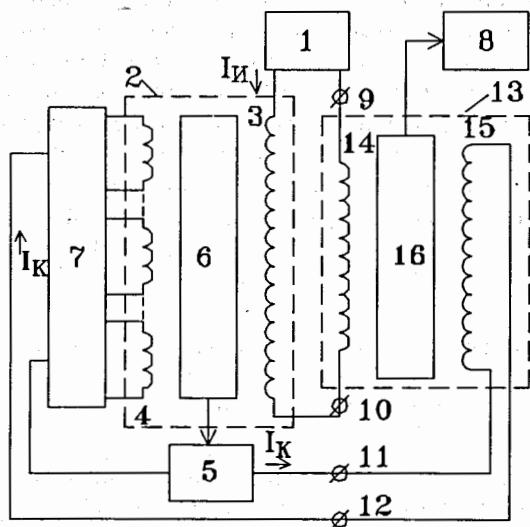


Рис.1. Блок-схема первого варианта выполнения устройства для определения числа витков компенсационной обмотки в магнитных компараторах постоянного тока

Устройство работает следующим образом.

Ток  $I_n$ , протекая по измерительным обмоткам 3 и 14 образцового 2 и поверяемого 13 компараторов создает в каждом из преобразователей неравновесия ампервитков 6 и 16 намагничивающую силу (н.с.)  $I_n W_n$  (для простоты положим, что обмотки 3 и 14 одновитковые, т.е.  $W_n = 1$  вит.). Под действием н.с.  $I_n W_n$  на выходах преобразователей неравновесия ампервитков 6 и 16 появляются напряжения рассогласования, которые поступают соответственно на вход усилителя постоянного тока 5 и на нуль-индикатор 8.

Под действием напряжения рассогласования, поступающего на вход усилителя постоянного тока 5, на его выходе появляется ток  $I_k$ , который через компенсационную обмотку 15 и коммутатор 7 подводится к секциям компенсационной обмотки 4. Протекая через включенные коммутатором 7 секции компенсационной обмотки 4, ток  $I_k$  создает в преобразователе неравновесия 6 н.с.  $I_k W_k$ , направленную навстречу н.с.  $I_n W_n$ . Образцовый компаратор 2 включен в замкнутую систему автоматического регулирования следящего типа, действие которой направлено на поддержание баланса ампервитков  $I_n W_n$  и  $I_k W_k$ , здесь и выше  $W_k$  - число включенных витков компенсационной обмотки 4.

В установившемся режиме состояние указанного выше контура авторегулирования описывается соотношением

$$I_n W_n - I_k W_k = \Delta I W_1,$$

где  $\Delta I W_1$  - действующее рассогласование в контуре авторегулирования в статическом режиме. Значение тока  $I_k$  равно

$$I_k = (I_n W_n - \Delta I W_1) / W_k. \quad (1)$$

Как уже отмечалось выше, ток  $I_k$  протекает также по компенсационной обмотке 15, число витков которой равно  $W_{кп}$ . При этом в преобразователе неравновесия 16 создается н.с.  $I_k W_{кп}$ , направленная навстречу н.с.  $I_n W_n$  (напомним, что н.с.  $I_n W_n$  создается в преобразователе 16 неравновесия измерительной обмоткой 14 с током  $I_n$ ). Результирующая н.с. ( $\Sigma I W$ ), действующая на преобразователь 16 неравновесия равна

$$\Sigma I W = I_n W_n - I_k W_{кп},$$

или, с учетом соотношения (1)

$$\Sigma I W = I_n W_n - (I_n W_n - \Delta I W_1) W_{кп} / W_k. \quad (2)$$

С помощью коммутатора 7 оператор может включить  $W_{ко}$  витков компенсационной обмотки 4, причем  $W_{ко} = W_{кп}$ . В этом случае на преобразователь 16 неравносвязно действует результирующая н.с.  $\sum IW_0 = \Delta I W$ . Соответственно, нуль-индикатор дает отклонение  $\Delta A$ , величина которого пропорциональна  $\Delta I W_1$ , а знак определяется знаком  $\Delta I W_1$ .

Решение задачи поверки компаратора состоит в данном случае в точном определении количества витков  $W_{кп}$  его компенсационной обмотки 15. Как видно из описания работы предложенного устройства, это устройство такую возможность предоставляет. Для её реализации необходимо фиксировать состояние  $W_{ко} = W_{кп}$ , после чего численное значение  $W_{ко}$  считывается с органов индикации коммутатора 7 и, таким образом, количество витков  $W_{кп}$  становится точно известным.

Однако, как следует из описания работы устройства, при  $W_{ко} = W_{кп}$ , имеется отклонение  $\Delta A$  нуль-индикатора от его нулевого положения. Наличие этого отклонения затрудняет фиксацию состояния, при котором  $W_{ко} = W_{кп}$ . Для уверенной регистрации достижения состояния  $W_{ко} = W_{кп}$  необходимо, чтобы значение тока  $I_n$  удовлетворяло условию

$$I_n \gg \Delta I W_1 \cdot W_{кпн} / W_n, \quad (3)$$

где  $W_{кпн}$  -неименованное число, равное номинальному количеству витков компенсационной обмотки 14 поверяемого компаратора 15. Условие (3) является критерием выбора величины тока  $I_n$ .

Процесс поверки осуществляется следующим образом (здесь рассматриваются только рабочие операции, считается, что все подготовительные операции выполнены ранее). Коммутатор 7 устанавливается в такое положение, при котором отклонение нуль-индикатора минимально и равно  $\Delta A$  (первая операция). По элементам индикации коммутатора 7 регистрируется число включенных витков  $W_{ко}$  обмотки 4. Затем коммутатором 7 производится изменение количества включенных витков обмотки 4 на один виток в сторону уменьшения (вторая операция). При этом отклонение нуль-индикатора 8 составит  $A_1$ , например, в область отрицательных значений. После этого коммутатором 7 производится изменение количества включенных витков обмотки 4 на один виток в сторону увеличения по сравнению с зарегистрированным значением  $W_{ко}$  (третья операция). При этом отклонение нуль-индикатора составит  $A_2$  в область положительных значений, причем  $|A_1| \approx |A_2|$ . Отметим следующее. Если при выборе величины тока  $I_n$  условие (3) было соблюдено, то  $|A_1| \approx |A_2| \gg |\Delta A|$ .

Если в конкретном случае поверки все происходит в точном соответствии, как в описанном выше процессе поверки, то

зарегистрированное после первой операции значение  $W_{ко}$  соответствует состоянию  $W_{ко} = W_{кп}$ . Это означает, что число витков  $W_{кп}$  точно определено.

На рис.2 приведена блок-схема второго варианта выполнения устройства. Узлы и элементы 1-4, 6, 7, 9-16 этого устройства полностью соответствуют аналогичным узлам и элементам первого варианта выполнения устройства.

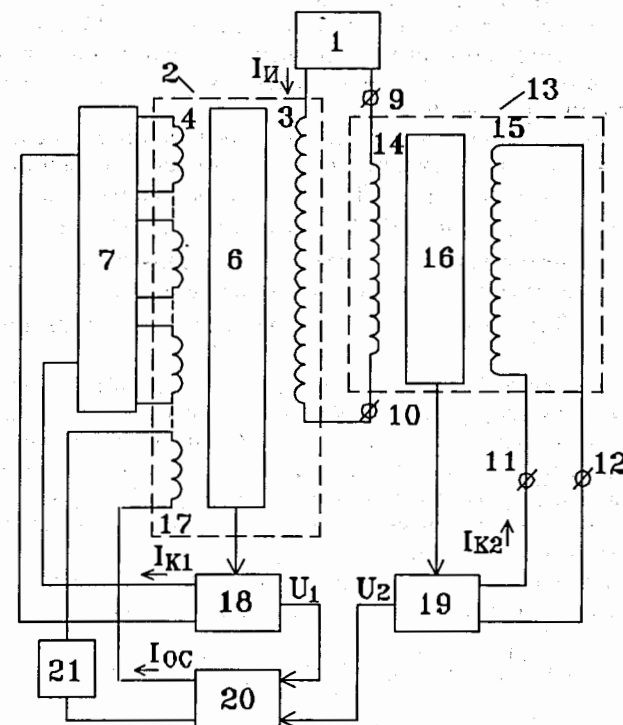


Рис.2. Блок-схема второго варианта выполнения устройства для определения числа витков компенсационной обмотки в магнитных компараторах постоянного тока

Кроме того, второй вариант устройства содержит: 17-обмотку обратной связи образцового компаратора, 18-усилитель постоянного тока образцового компаратора, имеющий токовый выход ( $I_{к1}$ ) и выход напряжения ( $U_1$ ), 19-усилитель постоянного тока поверяемого компаратора, имеющий токовый выход ( $I_{к2}$ ) и выход напряжения ( $U_2$ ), 20-измерительно-усилительный блок, 21-измеритель постоянного тока.

Приведенное выше описание работы первого варианта устройства частично применимо и ко второму варианту. Кроме того укажем, что второй

вариант устройства содержит три замкнутых контура авторегулирования следящего типа, связанных между собой.

Первый контур авторегулирования содержит магнитный компаратор 2 с измерительной 3 и компенсационной 4 обмотками, усилитель постоянного тока (УПТ) 18, к токовому выходу которого через коммутатор 7 подключены секции компенсационной обмотки 4. Сигнальный вход УПТ 18 подключен к выходу преобразователя неравновесия ампервитков 6.

Второй контур авторегулирования содержит поверяемый магнитный компаратор 13 с измерительной 14 и компенсационной 15 обмотками, УПТ 19, к токовому выходу которого подключена компенсационная обмотка 15. Сигнальный вход УПТ 19 подключен к выходу преобразователя неравновесия ампервитков 16.

Измерительные обмотки 3 и 14, соединенные последовательно, подключены к выходу регулируемого источника постоянного тока 1. Напряжение  $U_1$  на выходе УПТ 18 (выход напряжения) связано с выходным током  $I_{K1}$  этого УПТ соотношением  $U_1 = K_1 I_{K1}$ , где  $K_1$  - коэффициент преобразования тока в напряжение. Аналогичное соотношение связывает выходное напряжение  $U_2$  и выходной ток  $I_{K2}$  УПТ 19:  $U_2 = K_2 I_{K2}$ , где  $K_2$  - коэффициент преобразования тока в напряжение.

Третий контур авторегулирования содержит измерительно-усилительный блок 20, обмотку обратной связи 17, последовательно с которой включен измеритель тока 21. Сигнальные входы блока 20 подключены соответственно к выходам первого и второго контуров авторегулирования (соответственно выходы напряжения УПТ 18 и УПТ 19). При этом выходное напряжение второго контура авторегулирования является задающим воздействием.

В установленном режиме состояние первого контура авторегулирования описывается соотношением

$$I_{II} W_{II} - I_{K1} W_{K1} - I_{OC} W_{OC} = \Delta IW_1; \quad (4)$$

$W_{II}$  - число витков измерительной обмотки 3,  $W_{K1}$  - число включенных витков компенсационной обмотки 4,  $W_{OC}$  - число витков обмотки обратной связи 17,  $I_{II}$  - испытательный ток,  $I_{K1}$  - выходной ток УПТ 18 (компенсирующий ток),  $I_{OC}$  - выходной ток измерительно-усилительного блока 20 (ток обратной связи),  $\Delta IW_1$  - действующее рассогласование в первом контуре авторегулирования в статическом режиме.

Аналогично для второго контура авторегулирования можно записать

$$I_{II} W_{II} - I_{K2} W_{K2} = \Delta IW_2, \quad (5)$$

где  $W_{II}$  и  $W_{K2}$  - число витков соответственно измерительной 14 и компенсационной 15 обмоток поверяемого компаратора,  $I_{II}$  - испытательный ток,  $I_{K2}$  - выходной ток УПТ 19 (компенсирующий ток в

обмотке 15 поверяемого компаратора),  $\Delta IW_2$  - действующее рассогласование во втором контуре авторегулирования в статическом режиме.

Действие третьего контура авторегулирования направлено на поддержание равенства напряжений  $U_1$  и  $U_2$ :

$$U_1 - U_2 = \Delta U, \quad (6)$$

где  $\Delta U$  - действующее статическое рассогласование в третьем контуре авторегулирования.

Из соотношения (6) с учетом соотношений (4), (5), а также представив относительные погрешности первого, второго и третьего контуров авторегулирования как

$$\delta_1 = \Delta IW_1 / I_{II}, \quad \delta_2 = \Delta IW_2 / I_{II}, \quad \delta_3 = \Delta U / U_2,$$

получим

$$I_{OC} = I_{II} \left( 1 - \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{W_{K1}}{W_{K2}} - \delta_1 + \delta_2 \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{W_{K1}}{W_{K2}} - \delta_3 \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{W_{K1}}{W_{K2}} \right). \quad (7)$$

При выводе соотношения (7) учтено, что  $U_1 = K_1 I_{K1}$ ,  $U_2 = K_2 I_{K2}$ . Кроме того, здесь учтено также, что на практике целесообразно иметь обмотки  $W_{II}$ ,  $W_{II}$  и  $W_{OC}$  одновитковыми (т.е.  $W_{II} = W_{II} = W_{OC} = 1$  виток). Целесообразно также иметь одинаковые коэффициенты преобразования тока в напряжение в первом и втором контурах авторегулирования. На практике указанные коэффициенты будут отличаться от желаемого номинального значения  $K_H$ , что можно представить в виде

$$K_1 = K_H (1 \pm \delta_{K1}), \quad K_2 = K_H (1 \pm \delta_{K2}),$$

где  $\delta_{K1}$  и  $\delta_{K2}$  - относительные погрешности коэффициентов преобразования тока в напряжение соответственно для первого и второго контуров авторегулирования. С учетом малости величин  $\delta_{K1}$  и  $\delta_{K2}$ , а также принимая во внимание, что  $W_{K1} = W_{K2}$ , выражение (7) представим в виде

$$I_{OC} = I_{II} (1 - W_{K1} / W_{K2}) \pm I_{II} (\delta_{K1} + \delta_{K2} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3). \quad (8)$$

Здесь учет частных погрешностей произведен в соответствии с концепцией максимально возможной величины суммарной погрешности.

Из соотношения (8) легко получить сведения, необходимые для производства измерения количества витков компенсационной обмотки поверяемого компаратора посредством сравнения поверяемой компенсационной обмотки с компенсационной обмоткой образцового компаратора, число включенных витков которой регулируется и точно

известно в каждом случае. При этом о равенстве (или неравенстве) числа витков сравниваемых обмоток судят о величине тока  $I_{OC}$ .

В идеальном случае (при равенстве нулю всех частных погрешностей  $\delta_{K1}, \delta_{K2}, \dots, \delta_3$ ) в момент достижения  $W_{K1} = W_{K2}$  ток  $I_{OC}$  становится равным нулю. В реальных условиях значение тока при этом условии определяется соотношением

$$I_{OC} = \pm I_n (\delta_{K1} + \delta_{K2} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = \pm I_n \sum \delta_i. \quad (9)$$

При  $W_{K1} \neq W_{K2}$ , когда  $W_{K1} - W_{K2} = \pm \Delta W$

$$I_{OC} = I_n \frac{|\Delta W|}{W_{K1}} \pm I_n \sum \delta_i. \quad (10)$$

Из опыта работы с магнитными компараторами известно, что при  $I_n = 10 \div 100$  А порядок значений  $\delta_1$  и  $\delta_2$  составляет  $10^{-4} \div 10^{-5}$ . Что касается  $\delta_{K1}$  и  $\delta_{K2}$ , то при использовании прецизионных резисторов в качестве преобразователей тока в напряжение их порядок будет определяться погрешностью используемых резисторов. Если ориентироваться на использование доступных резисторов с погрешностью порядка  $10^{-4}$ , то порядок значений  $\delta_{K1}$  и  $\delta_{K2}$  будет составлять также  $10^{-4}$ . Порядок величины  $\delta_3$  зависит от уровня напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . При значении этих напряжений порядка нескольких вольт и при использовании в измерительно-усилительном блоке 20 операционных усилителей с малым температурным дрейфом нуля легко достичь значений  $\delta_3$  порядка  $10^{-4} \div 10^{-5}$ .

Возьмем для оценки  $\sum \delta_i = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $W_{K1} = 1000$  витков и  $I_n = 10$  А. Тогда из соотношения (10) при  $\Delta W = 0$  (путем изменения  $W_{K1}$  достигнуто условие  $W_{K1} = W_{K2}$ ).

$$I_{OC} = \pm 10 \text{ А} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = \pm 0,5 \text{ мА}$$

при  $|\Delta W| = 1$

$$I_{OC} = 10 \cdot 10^3 \text{ мА} / 1000 \pm 0,5 \text{ мА} = (10 \pm 0,5) \text{ мА}.$$

Эта оценка показывает, что выполнение или невыполнение условия  $W_{K1} = W_{K2}$  может регистрироваться по величине тока  $I_{OC}$ , индицируемого измерителем тока 21.

#### Литература

1. Спектор С.А. - Измерение больших постоянных токов. Л: Энергия, 1978.
2. Калининченко В.В. - А.с.179847 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1993, №8, с.149.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 декабря 1998 года.

Казакова Г.Г., Калининченко В.В., Федоренко С.Б.

P13-98-384

Устройство для определения числа витков компенсационной обмотки в магнитных компараторах постоянного тока

Рассматриваются два варианта устройства для определения числа витков компенсационной обмотки в магнитных компараторах постоянного тока и методика ее выполнения. Приведены упрощенные блок-схемы обсуждаемых вариантов устройства.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1998

Перевод авторов

Kazakova G.G., Kalinichenko V.V., Fedorenko S.B.

P13-98-384

A Device for Determination of the Number of Winds of a Compensation Coil in Magnetic Comparators of DC

Two variants of a device for determination of the winds number of a compensation coil in magnetic comparators of DC and technique of its fulfilment are considered. Simplified block diagrams of the circuits of the discussed variants of device are indicated.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1998