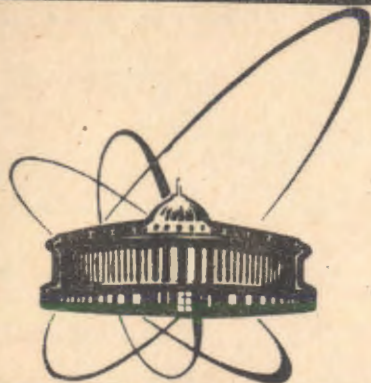


90-582



**сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна**

P13-90-582

Э.К.Батманова, Г.Г.Казакова, В.В.Калиниченко

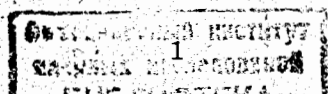
**ДАТЧИК ПОСТОЯННОГО ТОКА НА 12,5 кА**

**1990**

В работе<sup>1/</sup> описан стабилизированный источник постоянного тока на номинальный ток 12,5 кА для питания основной обмотки железно-токового канала (ЖТК) системы вывода пучка из фазотрона ОИЯИ. Здесь используется магнитомодуляционный датчик постоянного тока, который через преобразователь переменного тока в постоянный включен на первичной стороне силового трансформатора выпрямительного агрегата. Такое включение датчика тока обусловлено следующим. На момент создания стабилизированного источника тока разработчик располагал магнитопроводами с размерами: наружный диаметр ( $D_n$ ) — 70 мм, внутренний диаметр ( $D_v$ ) — 50 мм, высота ( $v$ ) — 10 мм. На магнитопроводах этого типоразмера могут быть изготовлены магнитомодуляционные датчики тока на номинальные токи до 1 кА. Поэтому обеспечить непосредственное измерение тока выпрямительного агрегата 12,5 кА с помощью датчика тока на номинальный ток до 1 кА возможно при соответствующем включении такого датчика на первичной стороне агрегата.

В 1986 г. появилась возможность изготовить ограниченное количество магнитопроводов с размерами:  $D_n = 185$  мм,  $D_v = 175$  мм,  $v = 10$  мм. На магнитопроводах этого типоразмера в соответствии с известными техническими решениями могут быть изготовлены датчики тока на номинальные токи до 5÷6 кА. В работе<sup>2/</sup> предложено техническое решение, которое на данном типоразмере магнитопроводов обеспечивает увеличение номинального тока датчика по сравнению с известными решениями.

На рис.1 представлена блок-схема датчика тока, разработанная на основе предложенного технического решения<sup>2/</sup>. Датчик содержит два измерительных преобразователя (1 и 2) постоянного тока с уравниванием магнитодвижущей силы (МДС) измеряемого тока МДС компенсирующего тока. Измерительные преобразователи 1 и 2 снабжены соответственно дополнительными обмотками 3 и 4. К выходу измерительного преобразователя 2 подключен эталонный резистор  $R_{эТ}$ , падение напряжения  $U_n$  на котором является выходным напряжением датчика тока. К выходу измерительного преобразователя 1 подключена дополнительная обмотка 4 измерительного преобразователя 2. Входные выводы измерительного преобразователя 1 подключены соответственно к выходным зажимам Х1 и Х2 датчика тока, к этим же зажимам подключены входные выводы измерительного преобразователя 2 соответственно через дополнительную обмотку 3 измерительного преобразователя 1



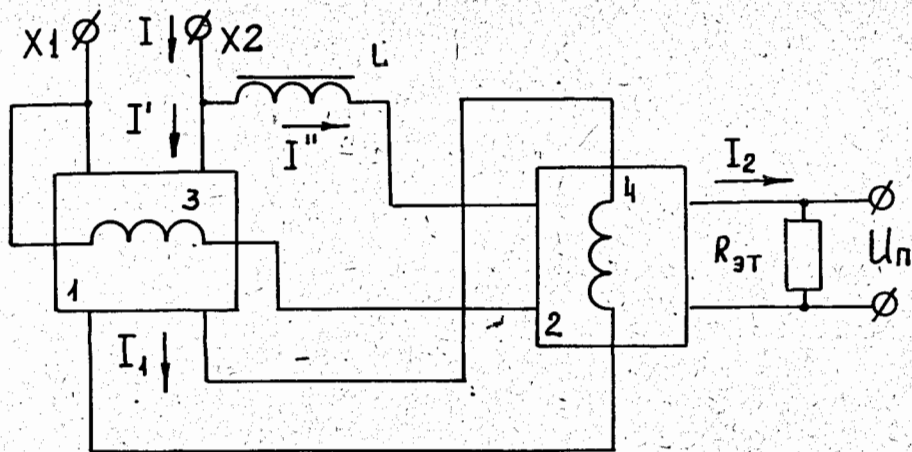


Рис.1. Блок-схема датчика тока.

и дроссель  $L$  (заметим, что дроссель  $L$  может быть выполнен не в виде отдельного элемента, а конструктивно совмещен с измерительной обмоткой измерительного преобразователя 2).

Измеряемый ток  $I$ , подводимый к входным выводам  $X1, X2$  устройства, распределяется по двум ветвям: первая часть  $I'$  измеряемого тока, равная  $I(1 - K)$ , поступает на вход измерительного преобразователя 1, а вторая часть  $I''$ , равная  $KI$ , через дополнительную обмотку 3 и дроссель  $L$  — на вход измерительного преобразователя 2 (здесь  $K$  — коэффициент деления делителя тока,  $K = R1/(R1 + R2)$ , где  $R1$  — входное сопротивление постоянному току измерительного преобразователя 1,  $R2$  — сопротивление постоянному току второй ветви, включающей дополнительную обмотку 3, дроссель  $L$  и входное сопротивление преобразователя 2; дроссель  $L$  повышает импеданс цепи, подключенной к обмотке 3, что ослабляет взаимную связь преобразователей 1 и 2 на частоте модуляции).

Входной и выходной токи измерительного преобразователя связаны соотношением

$$I_{вх} = NI_{вых},$$

где  $N$  — коэффициент преобразования измерительного преобразователя. При наличии в измерительном преобразователе других (аналогичных измерительной) обмоток с токами их действие учитывается путем определения приведенных токов; знаки этих приведенных токов определяются с учетом направления магнитодвижущих сил (МДС), создаваемых соответствующими обмотками (по отношению к МДС измерительной обмот-

ки). Например, при наличии в измерительном преобразователе обмотки с числом витков  $W$ , по которой протекает ток  $I_1$ , создающий МДС, направленную навстречу МДС измерительной обмотки, можно записать:

$$I_{вх} - I'_{вх} = NI_{вых},$$

где  $I'_{вх}$  — приведенный к измерительной обмотке ток  $I_1$ ,  $I'_{вх} = I_1 W/W_{и1}$ ,  $W_{и1}$  — число витков измерительной обмотки.

В дополнительной обмотке 3 с числом витков  $W_{д1}$  протекает, как уже отмечалось, ток  $KI$ , МДС этой обмотки направлена навстречу МДС измерительной обмотки преобразователя 1. Выходной ток  $I_1$  измерительного преобразователя 1 с учетом приведенных выше замечаний может быть определен как

$$I_1 = I(1 - K - KW_{д1}/W_{и1})/N_1,$$

где  $N_1$  — коэффициент преобразования преобразователя 1,  $W_{и1}$  — число витков измерительной обмотки преобразователя 1. Этот ток протекает через дополнительную обмотку 4 с числом витков  $W_{д2}$ , МДС этой обмотки совпадает с МДС измерительной обмотки преобразователя 2. Выходной ток  $I_2$  преобразователя 2 определим как

$$I_2 = (KI + I_1 W_{д2}/W_{и2})/N_2,$$

где  $N_2$  — коэффициент преобразования преобразователя 2,  $W_{и2}$  — число витков измерительной обмотки преобразователя 2.

Из последнего соотношения с учетом предыдущего и при условии, что  $W_{д2}/W_{и2} = N_1/(1 + W_{д1}/W_{и1})$ , получаем

$$I = N_2(1 + W_{д1}/W_{и1})I_2.$$

Выходное напряжение датчика тока

$$U_{п} = IR_{ЭТ}/(1 + W_{д1}/W_{и1})N_2,$$

где  $R_{ЭТ}$  — номинальное значение эталонного резистора.

Приведенные здесь соотношения для  $I_1$ ,  $I_2$  и  $U_{п}$  получены в предположении, что погрешности измерительных преобразователей 1 и 2 пренебрежимо малы. Обсуждение указанных погрешностей, как и погрешностей датчика тока в целом, выходит за рамки данного сообщения и может быть предметом специального исследования.

Измерительные преобразователи постоянного тока с уравниванием МДС измеряемого тока МДС компенсирующего тока обычно выполняются на основе различных типов магнитных модуляторов. В этом случае измерительный преобразователь постоянного тока содержит следующие основные элементы: магнитомодуляционный узел, генератор возбуждения, демодулятор и усилитель постоянного тока. Такой измерительный преобразователь постоянного тока представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования, действие которой направлено на поддержание баланса МДС измеряемого и компенсирующего токов.

Магнитомодуляционные узлы измерительных преобразователей 1 и 2 для опытных образцов датчика тока целесообразно выполнять по принципиальной схеме, представленной на рис.2. Магнитомодуляционный узел по такой универсальной схеме позволяет реализовать несколько типов измерительных преобразователей<sup>3-8</sup>, что, соответственно, дает возможность на одном опытном образце датчика тока исследовать ряд вариантов его выполнения (это существенно уменьшает трудозатраты по реализации вариантов выполнения датчиков тока, так как наиболее трудоемким является процесс изготовления магнитомодуляционного узла).

Магнитомодуляционный узел содержит магнитопроводы М1-М4, на каждом из которых имеется модуляционная обмотка (обмотки  $W_{M1}-W_{M4}$  соответственно). На сборку магнитопроводов М1 и М2 намотана уравнивающая обмотка ( $W_{ур}$ ). Обмотки измерительная ( $W_{и}$ ), дополнительная ( $W_{д}$ ), смещения ( $W_{см}$ ) и секции компенсационной обмотки ( $W_{1k}...W_{nk}$ ) являются общими для всех магнитопроводов М1-М4.

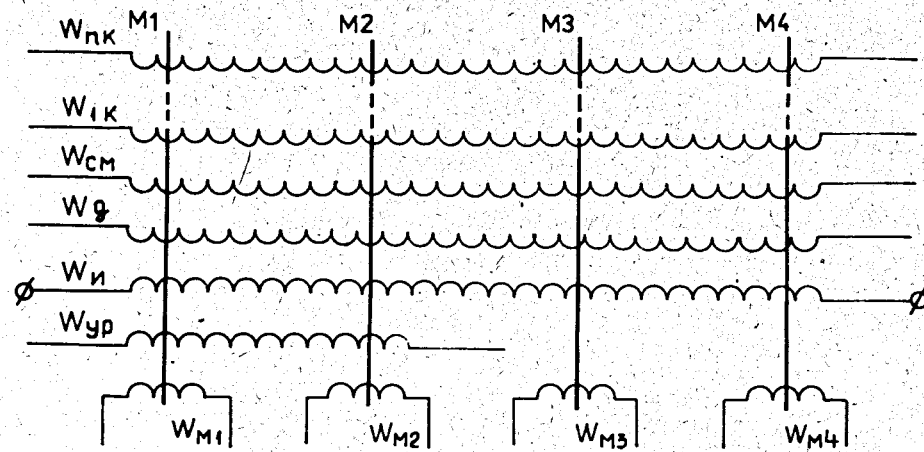


Рис.2. Принципиальная схема магнитомодуляционного узла.

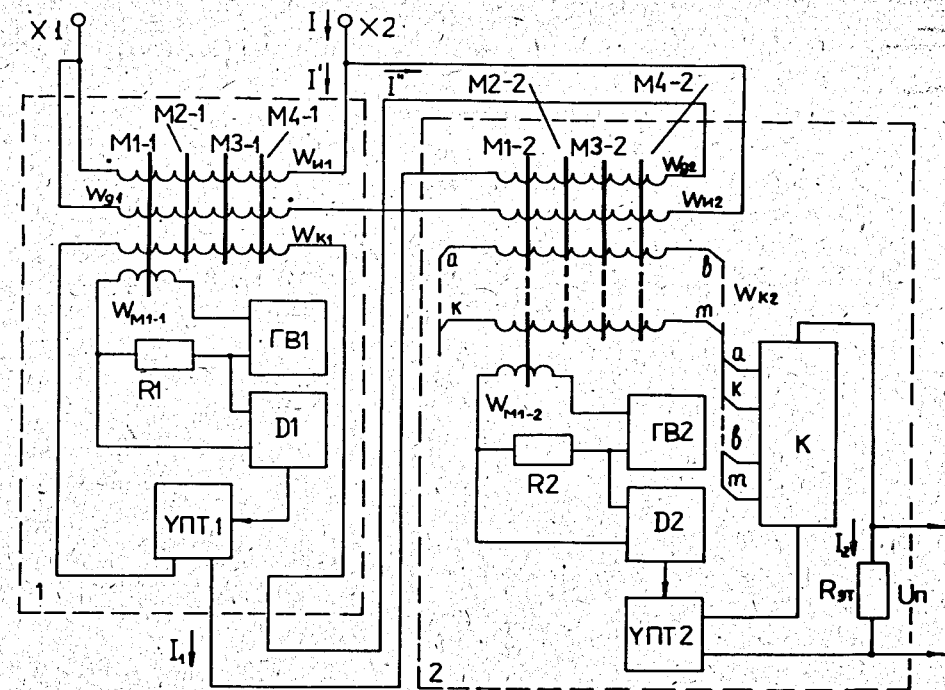


Рис.3. Блок-схема опытного образца датчика тока.

На рис.3 приведена блок-схема варианта датчика тока, который был разработан и изготовлен в 1987-1989 гг. Измерительный преобразователь 1 содержит генератор возбуждения (ГВ1), демодулятор 1 (D1), усилитель 1 постоянного тока (УПТ1), резистор R1 и магнитомодуляционный узел на магнитопроводах М1-1÷М4-1 с обмотками измерительной  $W_{и1}$ , компенсационной  $W_{к1}$ , дополнительной  $W_{д1}$  и возбуждения  $W_{M1-1}$ .

Преобразование разбаланса МДС осуществляется с помощью магнитного модулятора с двуполярным импульсным возбуждением<sup>7,8</sup>. Магнитный модулятор содержит магнитомодуляционный узел, резистор R1, блоки ГВ1 и D1. Магнитопроводы М2-1÷М4-1 образуют магнитный экран.

Измерительный преобразователь 2 содержит ГВ2, D2, УПТ2, резистор R2 и магнитомодуляционный узел на магнитопроводах М1-2÷М4-2 с обмотками измерительной  $W_{и2}$ , компенсационной  $W_{к2}$ , дополнительной  $W_{д2}$  и возбуждения  $W_{M1-2}$ . Компенсационная обмотка измерительного преобразователя 2 выполнена в виде отдельных секций с разным числом витков, которые с помощью коммутатора К включаются в цепь тока  $I_2$ , являющегося выходным током УПТ2. В цепь тока  $I_2$  включен также эталонный резистор  $R_{эт}$ , падение напряжения  $U_n$  на котором является



выходным напряжением датчика тока (как и в обобщенной схеме рис.1).

Магнитный модулятор с двуполярным импульсным возбуждением содержит магнитомодуляционный узел, резистор R2, блоки ГВ2 и D2. Магнитопроводы М2-2÷М4-2 образуют магнитный экран.

Измерительные преобразователи постоянного тока на основе магнитного модулятора с двуполярным импульсным возбуждением имеют простую электрическую схему, высокую надежность и относительно высокие метрологические характеристики (малую величину дрейфа нуля).

Благодаря этим качествам было решено использовать их при реализации первого опытного образца предложенного в <sup>12</sup> датчика постоянного тока и, как отмечалось выше, выполнить этот образец на базе универсальных магнитомодуляционных узлов (рис.2). На рис.3 неиспользуемые обмотки универсальных магнитомодуляционных узлов не показаны. Коэффициенты преобразования представленных на рис.3 измерительных преобразователей 1 и 2 равны соответственно  $N_1 = W_{к1}/W_{и1}$  и  $N_2 = W_{к2}/W_{и2}$ .

Конструктивная схема сборки магнитомодуляционных узлов обсуждаемого датчика тока представлена на рис.4. Приведем основные конструктивные данные сборки. Размеры магнитопроводов  $D_H = 185$  мм,  $D_B = 175$  мм,  $b = 10$  мм для М1-1÷М4-1 и  $D_H = 70$  мм,  $D_B = 50$  мм,  $b = 10$  мм для М1-2÷М4-2. Магнитопроводы выполнены из ленточного пермаллоя 79 НМ (витые, кольцевой формы); толщина ленты 0,1 мм. Каждый магнитопровод заключен в защитный каркас.

Измерительная обмотка  $W_{и1}$  (в виде одного проходного витка) выполнена из нескольких квадратных медных проводников с каналами для охлаждающей воды. Площадь поперечного сечения проводников (расчетное значение) составляет  $715$  мм<sup>2</sup>. К контактным площадкам К1 и К2 токопровода  $W_{и1}$  подсоединены соответственно выводы  $W_{д1}$  и  $W_{и2}$ . Рабочая длина токопровода  $W_{и1}$  (между контактными площадками К1 и К2) составляет 1500 мм.

Дополнительная обмотка  $W_{д1}$  содержит 18 витков. Она намотана медным канатиком совместно с медной трубкой (наружный диаметр медной трубки — 7 мм, внутренний — 4 мм). По этой трубке пропускается вода, охлаждающая обмотку  $W_{д1}$ . Сечение проводника обмотки  $W_{д1}$  (расчетное значение) составляет  $226$  мм<sup>2</sup>, длина — 8500 мм.

Модуляционная обмотка  $W_{м1-1}$  содержит 1440 витков провода ПЭВ-2,  $\phi$  1,0 мм. Количество витков компенсационной обмотки  $W_{к1} = 9975$  витков, провод ПЭВ-2,  $\phi$  0,7 мм.

Модуляционная обмотка  $W_{м1-2}$  содержит 500 витков, провод ПЭВ-2,  $\phi$  0,45 мм. Компенсационная обмотка  $W_{к2}$  выполнена проводом ПЭВ-2,  $\phi$  0,6 мм и содержит секции с числом витков 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128,

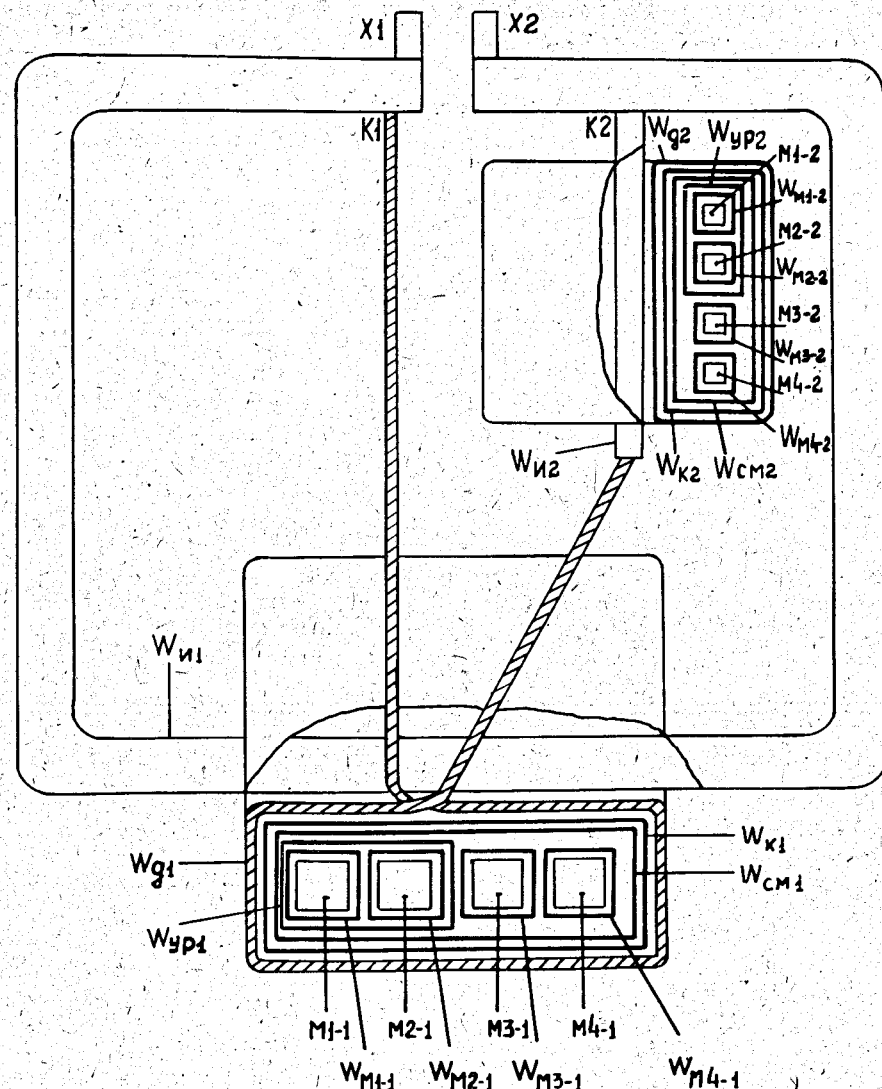


Рис.4. Конструктивная схема сборки магнитомодуляционных узлов.

256, 512 и 1024. Дополнительная обмотка  $W_{д2}$  имеет 525 витков, провод ПЭВ-2,  $\phi$  0,6 мм.

Электронные узлы ГВ1, Д1, УПТ1, ГВ2, Д2 и УПТ2 обсуждаемого опытного образца датчика тока имеют несущественные отличия по сравнению с аналогичными узлами, описанными в работе <sup>19</sup>.

В 1989 г. сборка магнитомодуляционных узлов в комплекте с релейным коммутатором секций компенсационной обмотки  $W_{к2}$  была размещена на верхних балках электромагнита фазотрона ОИЯИ, при этом измерительная обмотка  $W_{и1}$  включена последовательно с основной обмоткой ЖТК. Электронные блоки датчика тока размещены на первом этаже пристройки № 3 (первый корпус ЛЯП) и соединяются с магнитомодуляционными узлами кабелями длиной  $\sim 100$  м.

Составляющая погрешности датчика тока, обусловленная дрейфом нуля измерительных преобразователей 1 и 2, оценивается значением  $\sim 10^{-4}$  (по результатам измерения дрейфа нуля магнитных модуляторов с двуполярным импульсным возбуждением). Остальные составляющие погрешности, вызванные другими дестабилизирующими факторами, могут быть определены в результате поверки датчика тока.

К настоящему времени произведена поверка этого опытного образца датчика тока при токе 11 кА. В качестве эталонного измерителя тока был использован шунт на 15 кА (два параллельно включенных стандартных манганиновых шунта 75 ШС на номинальный ток 7,5 кА) в комплекте с цифровым вольтметром В7-34. С учетом относительно низкого класса эталонного измерителя (не лучше 0,5%) по результатам поверки не представляется возможным определить действительные погрешности поверяемого датчика тока. Косвенные оценки величины относительной погрешности опытного образца датчика тока дают значение порядка  $10^{-3}$ . Актуальной задачей является создание средств более высокого класса точности для поверки разрабатываемых датчиков тока большой силы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов В.В. и др. — Сообщение ОИЯИ, Р13-90-420, Дубна, 1990.
2. Калининко В.В. — А.с. № 1386921 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1988, № 13, с.177.
3. Денисов Ю.Н. и др. — В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1984, т.1, с.384.
4. Калининко В.В. — А.с. № 1182422 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1985, № 36, с.173.
5. Калининко В.В. — А.с. № 1150566 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1985, № 14, с.142.
6. Спектор С.А. — Измерение больших постоянных токов. Л.: Энергия, 1978.
7. Батманова Э.К. и др. — Сообщение ОИЯИ, 13-87-781, Дубна, 1987.
8. Калининко В.В. — А.с. № 1180862 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1985, № 35, с.193.
9. Ахманов В.В. и др. — Сообщение ОИЯИ, Р13-90-532, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 декабря 1990 года.