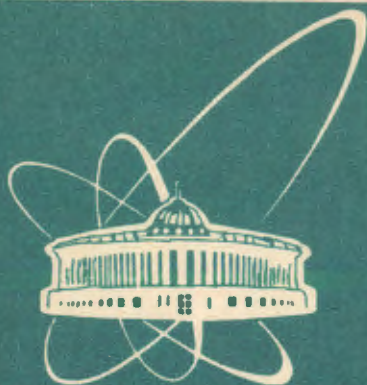


93-166



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P13-93-166

В.В.Калиниченко

МАГНИТНЫЙ КОМПАРАТОР ПОСТОЯННОГО  
ТОКА С КОМБИНИРОВАННЫМ  
УРАВНОВЕШИВАНИЕМ

1993

В прецизионных системах измерения и стабилизации постоянных токов широкое распространение получили магнитные компараторы постоянного тока (МК), построенные на основе магнитных модуляторов, действующих по принципу удвоения частоты. Магнитные модуляторы указанного типа имеют высокую чувствительность и малый дрейф нуля [1—3], благодаря чему МК на их основе обладают высокими метрологическими характеристиками. Основной недостаток магнитного модулятора, действующего по принципу удвоения частоты, состоит в наличии так называемых ложных нулей на его выходной статической характеристике. Однако отрицательные эффекты, вызванные наличием ложных нулей, устраняются в МК относительно простыми средствами [3—8].

Упрощенная блок-схема МК на основе магнитного модулятора представлена на рис. 1 (здесь не показаны средства ввода на рабочий участок характеристики магнитного модулятора). МК содержит: 1 — генератор возбуждения с выходами основной ( $F$ ) и удвоенной ( $2F$ ) частот, 2 — фазочувствительный детектор, 3 — усилитель постоянного тока (УПТ), 4 и 5 — магнитопроводы магнитного модулятора (рабочие магнитопроводы), 6 — магнитный экран, 7 и 8 — обмотки возбуждения, 9 — измерительную обмотку, 10 — компенсационную обмотку, 11 — эталонный резистор. Принцип действия МК подробно изложен, например, в работе [3].

В стационарном режиме выходной ток МК  $I_k$  (ток на выходе УПТ 3, протекающий через компенсационную обмотку 10 и эталонный резистор 11) равен  $I_k = I W_n / W_k$ , а выходное напряжение соответственно  $U_n = I_k R_{эт}$ , где  $W_n$  — число витков измерительной обмотки 9,  $W_k$  — число витков компенсационной обмотки 10,  $R_{эт}$  — номинальное значение эталонного резистора 11. О величине измеряемого тока  $I$  судят по величине напряжения  $U_n$  на

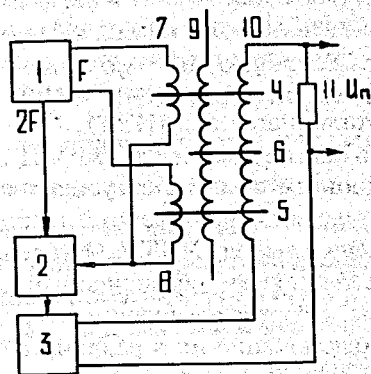


Рис. Упрощенная блок-схема МК с полным автоматическим уравновешиванием

выходе МК. Измерив  $U_n$ , ток  $I$  находят из соотношения  $I = KU_n$ , где  $K = W_k / W_n R_{эт}$ .

Предельное значение относительной погрешности  $\delta$  измерения тока  $I$  для устройства по блок-схеме рис.1 может быть определено из соотношения  $\delta = \delta_n + \delta_R$ , где  $\delta_n$  — относительная погрешность измерения выходного напряжения  $U_n$ ,  $\delta_R$  — относительная погрешность определения сопротивления эталонного резистора  $R$ , обусловленная действием совокупности дестабилизирующих факторов. При этом, как известно, одним из самых существенных дестабилизирующих факторов для резисторов является изменение температуры.

При умеренном числе витков компенсационной обмотки (порядка 1000+2000 витков) значение тока  $I_k$  составляет 0,5+1 А, если значение измеряемого тока достигает порядка 1+2 кА (обычно  $W_n$  содержит 1 виток). Выходное напряжение МК  $U_n$  должно иметь уровень в несколько вольт (при номинальном значении измеряемого тока). Соответственно, мощность, рассеиваемая на эталонном резисторе, будет составлять несколько ватт, что приводит к перегреву последнего на несколько десятков градусов относительно окружающей среды. Тяжелый температурный режим эталонного резистора приводит к существенному увеличению погрешности  $\delta_R$ , что вызывает снижение точности МК в целом. Очевидно, что переход к измерению еще больших токов будет сопровождаться соответственно увеличением температурной погрешности.

МК, практически свободный от указанного недостатка, предложен в работе [9]. Упрощенная блок-схема этого МК представлена на рис.2 (здесь не указаны узлы, обеспечивающие его работу в автоматическом режиме). Кроме известных из рис.1 узлов 1—9, 11, он содержит дополнительные узлы: 14 — коммутатор секций компенсационной обмотки, 15 — источник эталонного тока (ИЭТ), 16 — блок управления коммутатором 14, в блоке 16 обеспечивается также индикация состояния коммутатора 14. Компенсационная обмотка обсуждаемого МК выполнена в виде отдельных секций, при этом одна из секций (секция 10) через эталонный резистор 11 подключена к выходу УПТ 3. Остальные  $N$  секций (на рис.2 показаны лишь первая и  $N$ -я секции, обозначенные соответственно позициями 12 и 13) подключены к соответствующим выходам коммутатора 14, который обеспечивает подключение их в различных комбинациях к выходу ИЭТ 15. Обсуждаемый МК может быть использован в системах измерения и стабилизации постоянных токов большой силы.

В упрощенном виде работу устройства можно представить следующим образом. Измеряемый ток  $I$ , протекая по измерительной обмотке 9 с числом

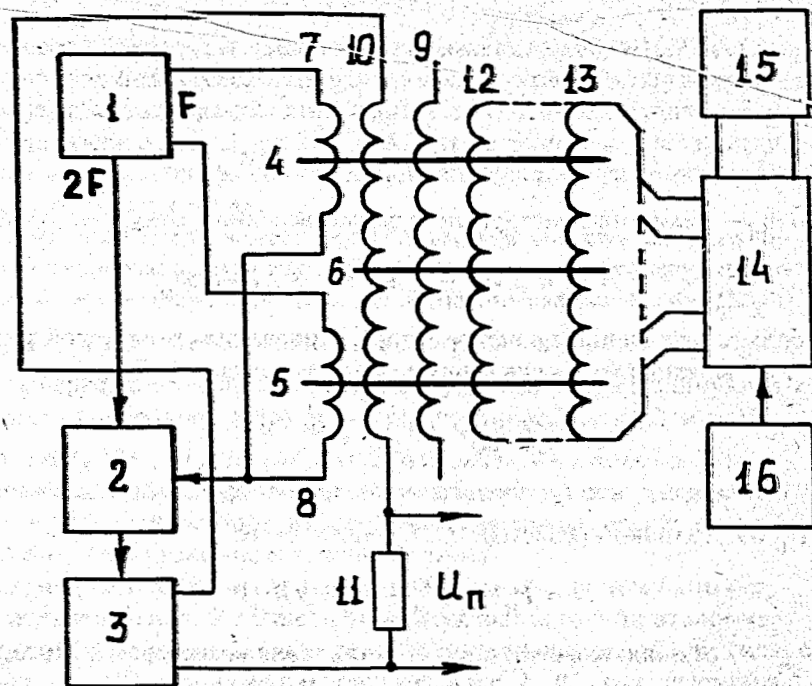


Рис.2. Упрощенная блок-схема МК с комбинированным уравниванием

витков  $W_n$ , создает намагничивающую силу (н.с.)  $IW_n$  в магнитопроводах 4, 5 магнитного модулятора и в магнитном экране 6. С помощью коммутатора 14 к ИЭТ 15 подключаются требуемые секции компенсационной обмотки (в соответствии с величиной измеряемого тока), при этом включенные секции создают в магнитопроводах 4—6 н.с.  $I_{эт} W_k$ , направленную навстречу н.с.  $IW_n$ . Здесь  $I_{эт}$  — номинальное значение эталонного тока, создаваемого ИЭТ 15,  $W_k$  — суммарное количество витков включенных секций.

Результирующая н.с., действующая на магнитопроводы 4—6 магнитного модулятора (обобщенно можно говорить о действии результирующей н.с. на магнитный модулятор, который является детектором или преобразователем разбаланса н.с.), равна  $IW_n - I_{эт} W_k$ . Под действием результирующей н.с. на выходе магнитного модулятора в соответствии с его статической характеристикой появляется напряжение, которое поступает на вход УПТ 3 и вызывает появление на его выходе тока  $I_c$ . Ток  $I_c$ , протекая по секции 10 с числом витков  $W_c$ , создает н.с.  $I_c W_c$ . Заметим, что магнитный модулятор

УПТ 3 и секция 10 образуют замкнутую систему авторегулирования, действие которой направлено на устранение разбаланса н.с. В стационарном режиме состояние системы авторегулирования описывается соотношением

$$IW_{и.} - I_{эт} W_{к} + I_{с} W_{с} = \Delta IW_{д}, \quad (1)$$

где  $\Delta IW_{д}$  — величина действующего рассогласования, откуда получаем

$$I = I_{эт} W_{к} / W_{и.} - I_{с} W_{с} / W_{и.} + \Delta IW_{д} / W_{и.} \quad (2)$$

При большом усилении в контуре авторегулирования статической ошибкой  $\Delta IW_{д} / W_{и.}$  можно пренебречь ввиду ее малости, тогда

$$I = I_{эт} W_{к} / W_{и.} - I_{с} W_{с} / W_{и.}$$

В МК определение  $I_{с}$  производится путем измерения падения напряжения  $U_{п}$  на эталонном резисторе  $II$ . С учетом этого

$$I = I_{эт} W_{к} / W_{и.} - U_{п} W_{с} / R_{эт} W_{и.} \quad (3)$$

где  $R_{эт}$  — номинальная величина сопротивления резистора  $II$ . Предельное значение относительной погрешности  $\delta$  измерения тока для устройства по блок-схеме рис.2 может быть найдено из соотношения (при условии  $-I_{эт} W_{о} \leq I_{с} W_{с} \leq I_{эт} W_{о}$ )

$$\delta = \delta_I (1 - W_{о} / W_{к})^{-1} + (\delta_{и.} + \delta_R) (W_{к} / W_{о} - 1)^{-1},$$

где  $\delta_I$  — относительная погрешность источника эталонного тока  $I$ ,  $W_{о}$  — дискретность изменения числа включенных витков компенсационной обмотки. В режимах работы, для которых  $W_{к} \gg W_{о}$ ,

$$\delta = \delta_I + (\delta_{и.} + \delta_R) W_{о} / W_{к}$$

Из двух последних соотношений следует, что относительная погрешность  $\delta$  измерения тока  $I$  для предложенного МК определяется в основном относительной погрешностью  $\delta_I$  источника эталонного тока. Влияние погрешностей  $\delta_{и.}$  и  $\delta_R$  существенно ослабляется, при определенных условиях их влияние становится пренебрежимо малым. Не обсуждая здесь проблемы создания прецизионных источников эталонного тока в целом, отметим одно важное частное обстоятельство. В предложенном МК источник эталонного тока работает с фиксированным значением эталонного тока. Это означает, что его токозадающие (эталонные или опорные) узлы работают в стац-

зом, установившийся через некоторое время после включения ИЭТ тепловой режим будет нарушаться только внешними воздействиями. Внутренние дестабилизирующие факторы, например резкие изменения рассеиваемой мощности в каких-либо элементах ИЭТ, сводятся в данном случае к минимуму. Защита от действия внешних дестабилизирующих факторов более эффективна, чем от внутренних.

МК по схеме рис.1 представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования следящего типа. Действие системы авторегулирования направлено на поддержание баланса намагничивающих сил  $IW_{и.}$  и  $I_{к} W_{к}$ . При этом ток  $I_{к}$ , вырабатываемый системой авторегулирования и протекающий через компенсационную обмотку, обеспечивает полную автокомпенсацию (или полное автоматическое уравнивание) н.с.  $IW_{и.}$  По этому признаку МК по схеме рис.1 можно назвать МК с полным автоматическим уравниванием за счет действия системы авторегулирования. В общем случае МК по схеме рис.1 является измерительным преобразователем постоянного тока автокомпенсационного типа.

МК по схеме рис.2 содержит, как отмечалось выше, систему авторегулирования следящего типа, а также другие средства: источник эталонного тока, коммутатор, дополнительные секции компенсационной обмотки. Большая часть н.с.  $IW_{и.}$  уравнивается здесь н.с.  $I_{эт} W_{к}$ , создаваемой за счет включения в цепь эталонного тока  $I_{эт}$  необходимого числа витков ( $W_{к}$ ) компенсационной обмотки. Недокомпенсированная часть н.с.  $IW_{и.}$  (равная  $IW_{и.} - I_{эт} W_{к}$ ) уравнивается за счет действия системы авторегулирования. Подобное устройство можно назвать МК с комбинированным уравниванием. Как было показано выше, МК с комбинированным уравниванием может обеспечить при определенных условиях более высокую точность измерения, чем МК с полным автоматическим уравниванием.

В заключение обсудим относительно простой вариант выполнения стабилизатора тока на основе МК с комбинированным уравниванием. Упрощенная блок-схема его представлена на рис.3. Стабилизатор тока содержит: 1 — силовой управляемый преобразователь (управляемый вы-

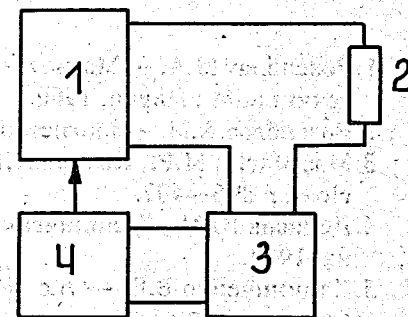


Рис.3. Упрощенная блок-схема стабилизатора тока на основе МК с комбинированным уравниванием

прямитель, мотор-генератор и др.), 2 — нагрузку, 3 — МК с комбинированным уравниванием по схеме рис.2, 4 — усилитель постоянного тока. Выход УПТ 4 подключен к управляющему входу силового управляемого преобразователя 1. На вход МК 3 (то есть в измерительную обмотку МК) поступает стабилизируемый ток  $I$ . Выход МК 3 подключен ко входу УПТ 4.

Стабилизатор по схеме рис.3 является замкнутой системой авторегулирования. Действие этой системы авторегулирования направлено на то, чтобы все время сводить к нулю напряжение  $U_{\text{п}}$  на выходе МК 3. С учетом этого обстоятельства из соотношения (3) имеем

$$I = I_{\text{эт}} W_{\text{к}} / W_{\text{и}} \quad (4)$$

Из соотношения (4) следует, что при принятых упрощениях погрешность стабилизатора определяется погрешностью  $\delta$ , источника эталонного тока. На самом деле, стабилизатору тока, как и любой другой следящей системе, присущи статическая и динамическая ошибки [10].

Рассматриваемый стабилизатор обеспечивает регулирование стабилизируемого тока с дискретностью (шагом), равной  $I_{\text{эт}} W_0 / W_{\text{и}}$ . Здесь (как и выше)  $W_0$  — дискретность изменения числа витков компенсационной обмотки. Обычно измерительная обмотка выполняется в виде одного проходного витка ( $W_{\text{и}} = 1$  виток), тогда при  $W_0 = 1$  (виток) дискретность уставки тока будет равна величине эталонного тока  $I_{\text{эт}}$ . Если требуется меньшее значение дискретности регулирования тока, стабилизатор может быть выполнен по более сложной схеме, предложенной в работе [9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Розенблат М.А. — Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1966.
2. Розенблат А.М. — Магнетоника. М.: Наука, 1967.
3. Mac Martin M.P., Kusters N.L. — IEEE Trans. on Magnetics, 1965, vol.1, No.4, p.396—402.
4. Денисов Ю.Н., Калинин В.В. — Сообщение ОИЯИ 13-6531, Дубна, 1972.
5. Калинин В.В. — А.с. 546869 (СССР). Опубликовано в ОИПОТЗ, 1977, 6, с.132.
6. Калинин В.В. — А.с. 922644 (СССР). Опубликовано в ОИПОТЗ, 1982, 15, с.214.
7. Баклаков Б.А. и др. — ПТЭ, 1981, 6, с.77.

8. Калинин В.В. — А.с. 1705753 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1992, 2, с.172.
9. Калинин В.В. — А.с. 1467546 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1989, 11, с.191.
10. Бесекерский В.А., Попов Е.П. — Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.

Работа поступила в издательский отдел  
12 мая 1993 года.