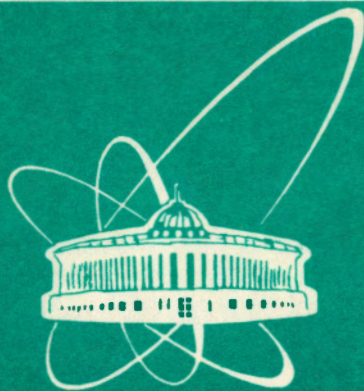


93-268



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P13-93-268

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

ПЕРМЕАМЕТР  
ДЛЯ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

1993

Сердечник магнитопровода МВТ (Muon Barrel Toroid) собирается из большого количества стальных плит. Необходимость относительно малого разброса по величине магнитной проницаемости стали от плиты к плите налагает повышенные требования к точности измерений относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  (порядка  $\pm 1\%$ ). Для выполнения этих измерений в ЛЯП ОИЯИ в 1992 г. был разработан пермеаметр, упрощенная блок-схема которого показана на рис.1.

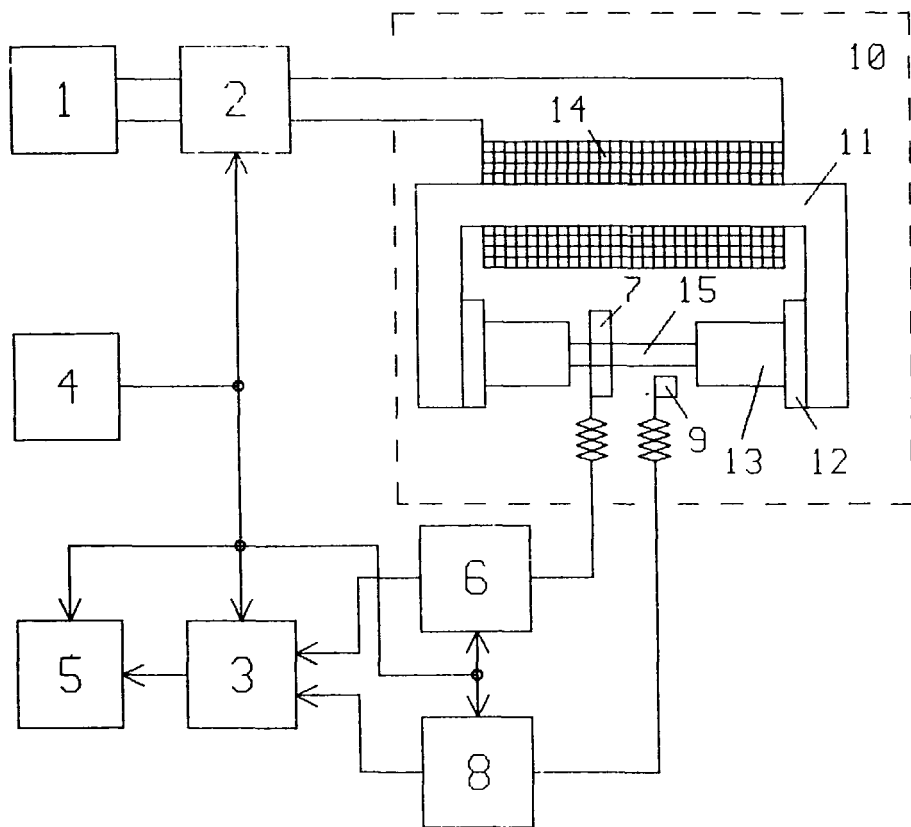


Рис.1. Упрощенная блок-схема пермеаметра для испытания магнитомягких материалов

Пермеаметр содержит следующие основные узлы: 1 — регулируемый стабилизатор постоянного тока, 2 — блок реверса тока, 3 — коммутатор, 4 — блок управления, 5 — цифровой вольтметр, 6 — электронный интегратор канала измерения магнитной индукции  $B$ , 7 — катушку для измерения индукции  $B$ , 8 — электронный интегратор канала измерения напряженности магнитного поля  $H$ , 9 — катушку для измерения напряженности поля  $H$  и 10 — намагничивающее устройство. В состав намагничивающего устройства входят: 11 — ярмо, 12 — подкладки, 13 — полюса, 14 — обмотка возбуждения. Образец испытуемой стали 15 вставляется в отверстия в полюсах и прижимается к полюсам с помощью специальных прижимов (на чертеже не показаны).

В работах [1—3] обсуждались некоторые вопросы, касающиеся выбора конфигурации намагничивающего устройства, а также ряд вопросов, связанных с определением напряженности магнитного поля в исследуемом образце. В настоящем сообщении будут рассмотрены основные узлы пермеаметра: регулируемый стабилизатор тока, блок реверса тока, блок управления и электронный интегратор.

Определение относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  с помощью пермеаметра [4, 5] предполагает измерение продольных составляющих индукции  $B$  и напряженности  $H$  поля в образце. По измеренным значениям  $B$  и  $H$  относительная магнитная проницаемость материала образца определяется из соотношения

$$\mu_r = B / \mu_0 H ,$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м). При этом важно подчеркнуть, что измеренные значения  $B$  и  $H$  должны соответствовать основной кривой индукции. Такое соответствие достигается применением метода коммутирования для измерения индукции  $B$  в образце.

Сущность этого метода состоит в том, что после размагничивания образца устанавливают определенное значение намагничивающего тока  $I_1$  (напряженности поля  $H_1$ ). Затем многократно изменяют направление намагничивающего тока (магнитная подготовка) для получения установившегося цикла. После завершения магнитной подготовки производят рабочую коммутацию, при которой, изменив направление намагничивающего тока от  $+I_1$  до  $-I_1$  (или от  $-I_1$  до  $+I_1$ ), регистрируют показания соответствующих приборов. Эти показания будут соответствовать изменению индукции от  $+B_1$  до  $-B_1$  ( $-B_1$  до  $+B_1$ ) и изменению напряженности поля от  $+H_1$  до  $-H_1$  ( $-H_1$  до  $+H_1$ ). После этого увеличивают значение намагни-

чивающего тока до значения  $I_2$  и производят те же самые операции. Таким образом можно получить необходимые точки основной (коммутационной) кривой индукции и определить  $\mu_r$  в интересующем диапазоне индукций.

Практически все методы определения индукции в образцах основаны на законе электромагнитной индукции. Образец охватывается измерительной катушкой, плоскости витков которой должны располагаться перпендикулярно направлению магнитного потока. Необходимо также, чтобы витки измерительной катушки как можно ближе прилегали к поверхности образца. Измерительная катушка подключается ко входу интегратора. Можно показать, что при определенных условиях между величиной изменения  $\Delta B$  индукции в образце и выходным напряжением  $U$  интегратора существует связь

$$\Delta B = U\tau / WS ,$$

где  $\tau$  — постоянная времени интегратора,  $W$  — количество витков измерительной обмотки,  $S$  — площадь поперечного сечения образца. В методе коммутирования индукция в образце в каждой измеряемой точке (например, в  $i$ -й точке коммутационной кривой) изменяется от  $+B_i$  до  $-B_i$ , поэтому  $\Delta B = 2B_i$ . С учетом этого получаем

$$B_i = 0,5C_B U ,$$

где  $C_B$  — постоянная канала измерения индукции,  $C_B = \tau / WS$ .

На рис. 2 представлена упрощенная принципиальная схема регулируемого стабилизатора постоянного тока  $I$ . Устройство является классическим транзисторным компенсационным стабилизатором постоянного тока, который содержит транзисторный регулятор (VT1 — VT3), схему сравнения (ДА2) и регулируемый источник опорного напряжения (ДА1, ДА3, клавишный переключатель SA1 — SA10). Микросхемы ДА1 и ДА3 образуют цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), цифровые входы которого подключены к клавишному переключателю. Микросхема ДА1 (типа К252ПА3) содержит ключи, резистивную матрицу и резистор обратной связи. Операционный усилитель ДА3 является суммирующим усилителем в схеме ЦАП.

Корректирующие цепочки R2C1 и R5C2 обеспечивают работу стабилизатора без перерегулирования в переходном процессе. Резистор R10 является эталонным резистором стабилизатора. Многооборотный переменный резистор R9 служит для плавного уменьшения величины тока стабилизатора при размагничивании образцов. Ниже описаны операции по управлению стабилизаторами тока, производимые в режиме размагничивания образцов. Это описание дает более полное представление о функции резистора

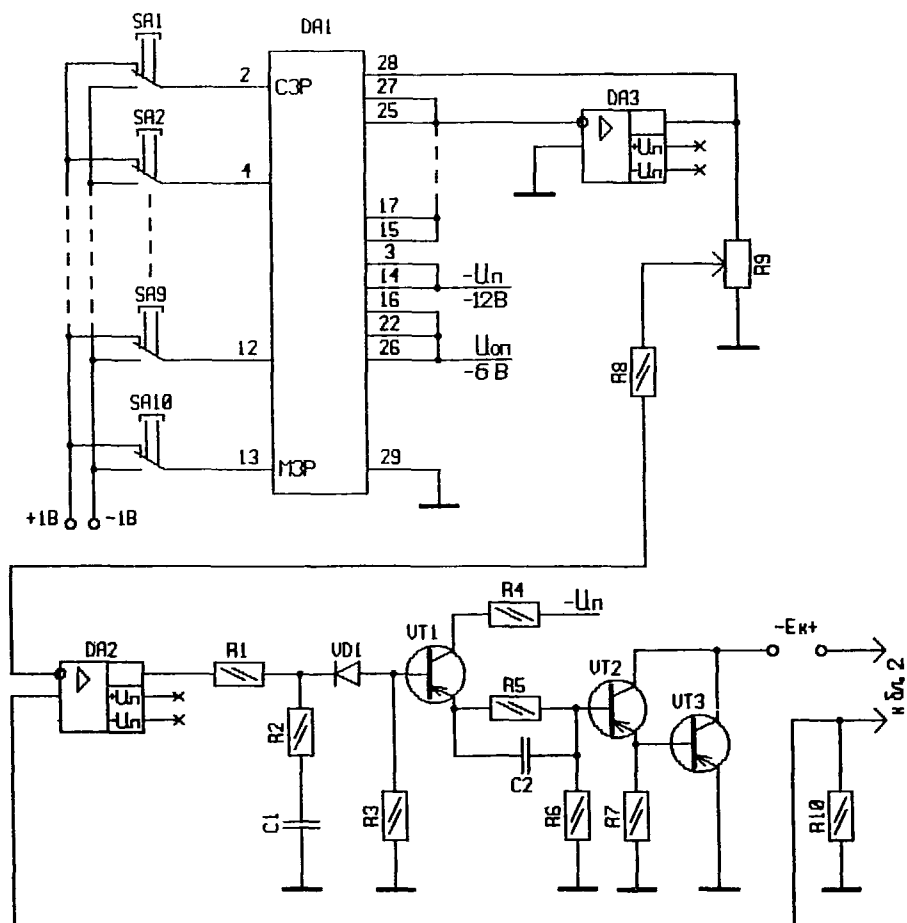


Рис.2. Упрощенная принципиальная схема регулируемого стабилизатора постоянного тока

**Р9.** Питание оконечного каскада транзисторного регулятора (VT2 и VT3) осуществляется от отдельного изолированного источника постоянного напряжения ( $E_K$ ).

Во всех режимах работы пермеаметра (кроме режима размагничивания образцов) движок многооборотного переменного резистора R9 фиксируется в крайнем верхнем (по схеме) положении. При этом напряжение с выхода ЦАП поступает непосредственно на соответствующий вход схемы сравне-

ния. Величина этого напряжения (и, соответственно, требуемая величина тока стабилизатора, то есть намагничивающего тока) устанавливается с помощью клавишного переключателя.

При размагничивании образца (блок управления в этом режиме обеспечивает циклический реверс намагничивающего тока) последовательно выполняются следующие операции по управлению стабилизатором:

— с помощью клавишного переключателя устанавливается требуемое для размагничивания значение тока  $I_p$  стабилизатора (движок резистора R9 при этом находится в исходном, то есть в крайнем верхнем, положении);

— обеспечивается равномерное (плавное или дискретное с малой величиной шага) перемещение движка потенциометра R9 с таким расчетом, чтобы в течение 5—10 мин движок переместился в крайнее нижнее положение, при этом ток стабилизатора от значения  $I_p$  уменьшится до нулевого значения.

На этом собственно процесс размагничивания образца заканчивается. Далее для подготовки к снятию точек основной кривой индукции выполняются операции:

— с помощью кнопок клавишного переключателя набирается код, соответствующий требуемому минимальному значению намагничивающего тока  $I_1$  (соответствует первой точке того участка основной кривой индукции, который подлежит измерению);

— движок резистора R9 устанавливается в исходное положение.

В дальнейшем все операции производятся при условии, что движок резистора R9 находится в исходном положении.

Упрощенная принципиальная схема блока реверса 2 приведена на рис.3. Блок реверса содержит 4 транзисторных ключа (VT1—VT4), включенных силовыми выводами по схеме моста, 4 транзисторно-трансформаторных элемента (ТТЭ 2.1—2.4), генератор прямоугольного напряжения повышенной частоты (ГПН 2.5) и балластный резистор R3. ТТЭ предназначены для преобразования управляющих сигналов блока управления 4 в отпирающие напряжения, которые поступают на базы соответствующих транзисторных ключей. При этом ТТЭ обеспечивают необходимую гальваническую развязку транзисторных ключей. Питание ТТЭ обеспечивается от ГПН. На рис. 4 представлена принципиальная схема сборки ГПН и ТТЭ. Более полные сведения по этим узлам приведены в [6].

Стабилизатор тока и блок реверса тока должны обеспечивать неизменность значения намагничивающего тока, установленного для снятия заданной точки основной кривой индукции (в течение всего времени измерений в этой точке). Здесь имеется в виду, что установленное значение намагничивающего тока сохраняется для положительного и отрицательного его на-

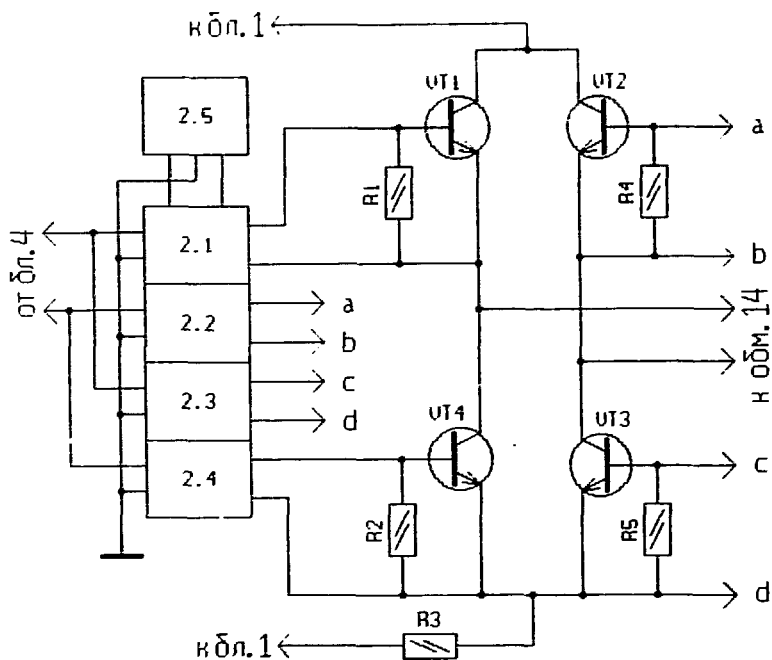


Рис.3. Упрощенная принципиальная схема блока реверса тока

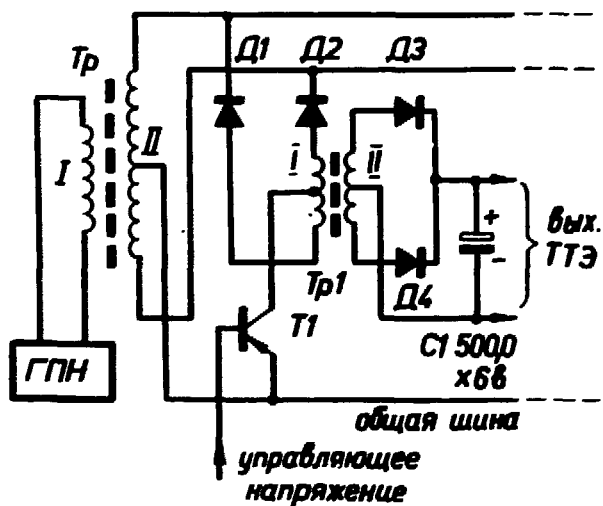


Рис.4. Принципиальная схема сборки генератора прямоугольного напряжения и транзисторно-трансформаторного элемента

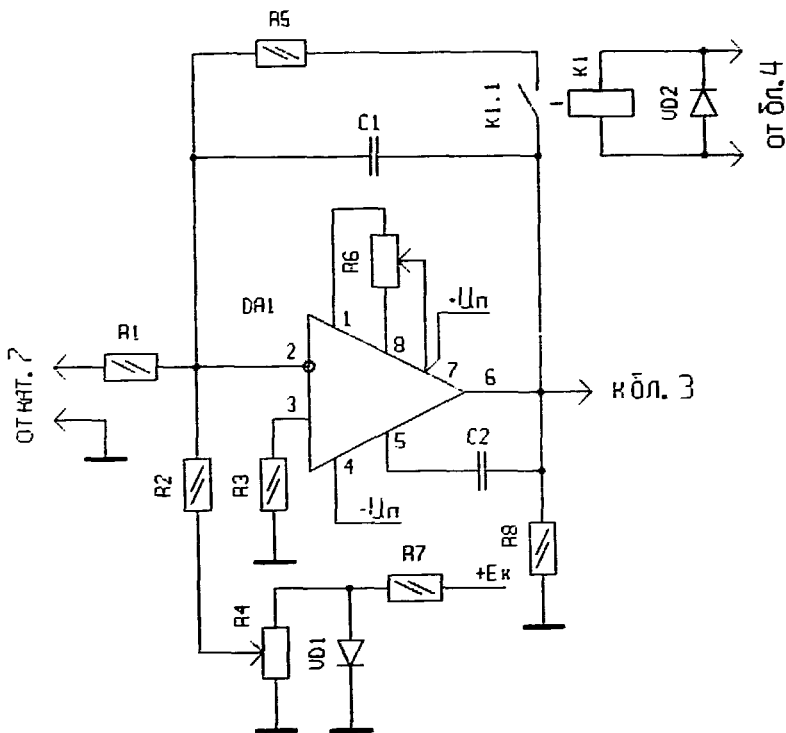


Рис.5. Принципиальная схема электронного интегратора на одном операционном усилителе

правлений в течение времени измерения индукции и напряженности поля в заданной точке кривой. Продолжительность указанных измерений составляет 1—2 мин. Нестабильность намагничивающего тока за это время не должна превышать 0,1%. Нестабильность тока рассмотренного выше стабилизатора тока не превышает 0,02% за 10 мин. Диапазон рабочих значений намагничивающего тока составляет 0,6—1,2 А, номинальное напряжение — 24 В. Токи утечки транзисторных ключей блока реверса (транзисторы типа КТ808А) не превышают значение 0,1 мкА. Таким образом, рассмотренные узлы обеспечивают требуемое качество намагничивающего тока.

Упрощенная принципиальная схема интегратора представлена на рис.5. Это одна из относительно простых классических схем интеграторов с компенсацией влияния на интегратор входного тока [7]. Указанная ком-



пенсация обеспечивается источником малого тока компенсации, который выполнен на элементах VD1, R2, R4, R7 и содержит источник напряжения  $E_K$ . Постоянная времени интегратора  $\tau = R1C1$ . Сброс интегратора осуществляется путем разряда конденсатора C1 через резистор R5, что происходит при замыкании контакта реле K1.1. Соответствующий импульс напряжения поступает на обмотку реле K1 с блока управления 4.

В качестве DA1 применен операционный усилитель типа АД504М. Постоянная времени интегратора  $\tau = 86,8 \cdot 10^{-3}$  с. Скорость дрейфа выходного напряжения интегратора составляет  $-0,4$  мВ/с. При таком относительно большом значении скорости дрейфа погрешность измерения напряженности поля  $H$  на поверхности образца определяется в основном ошибкой измерения выходного напряжения интегратора.

На рис.6 представлена упрощенная принципиальная схема второго варианта выполнения интегратора. Скорость дрейфа выходного напряжения этого интегратора составляет  $-0,05$  мВ/с при  $\tau = 90 \cdot 10^{-3}$  с. Такое значение скорости дрейфа выходного напряжения достигнуто за счет применения сложного усилителя, состоящего из нескольких операционных усилителей (ОУ) и имеющего относительно малые  $\Delta U_{CM} \leq 0,5$  мкВ/°С и  $I_{вх} \leq 0,2$  нА. Этот усилитель выполнен по двухканальной схеме с МДМ-преобразованием в НЧ-канале [8].

НЧ-канал выполнен на микросхемах DA2 и DA3, где DA2 — ОУ типа МДМ (K140УД13), DA3 — универсальный ОУ, включенный по схеме неинвертирующего усилителя переменного тока. ОУ на микросхеме DA1 выполняет функцию ВЧ-канала и схемы суммирования [9]. С помощью многооборотного потенциометра R18, подключенного через делители R14, R15 и R16, R17 к источникам +15 В и -15 В, достигается компенсация аддитивной погрешности всего усилителя в целом. Постоянная времени интегратора  $\tau = R1C1$ . С помощью реле K1 и K3 обеспечивается сброс интегратора и коммутация его входа (перевод в режим хранения). Соответствующие импульсы напряжения подаются на обмотки этих реле от блока управления 4.

Структурная схема блока управления 4 приведена на рис.7,а. Блок управления содержит: 4.1 — задающий генератор, 4.2 — счетчик-делитель, 4.3 и 4.4 — первый и второй делители частоты на 2 (триггеры со счетным входом), 4.5 — Д-триггер, 4.6 — импульсный усилитель с преобразованием полярности, 4.7—4.14 — одновибраторы, 4.15 — индикатор (дает информацию, выход какого измерительного канала переметра ( $B$  или  $H$ ) подключен в данный момент через коммутатор 3 к цифровому вольтметру 5), SA1 — переключатель, в положении 1 обеспечивается циклический реверс намагничивающего тока, в положении 2 реверс тока прекращается и появляется возможность произвести проверку нулей интеграторов (без выключе-

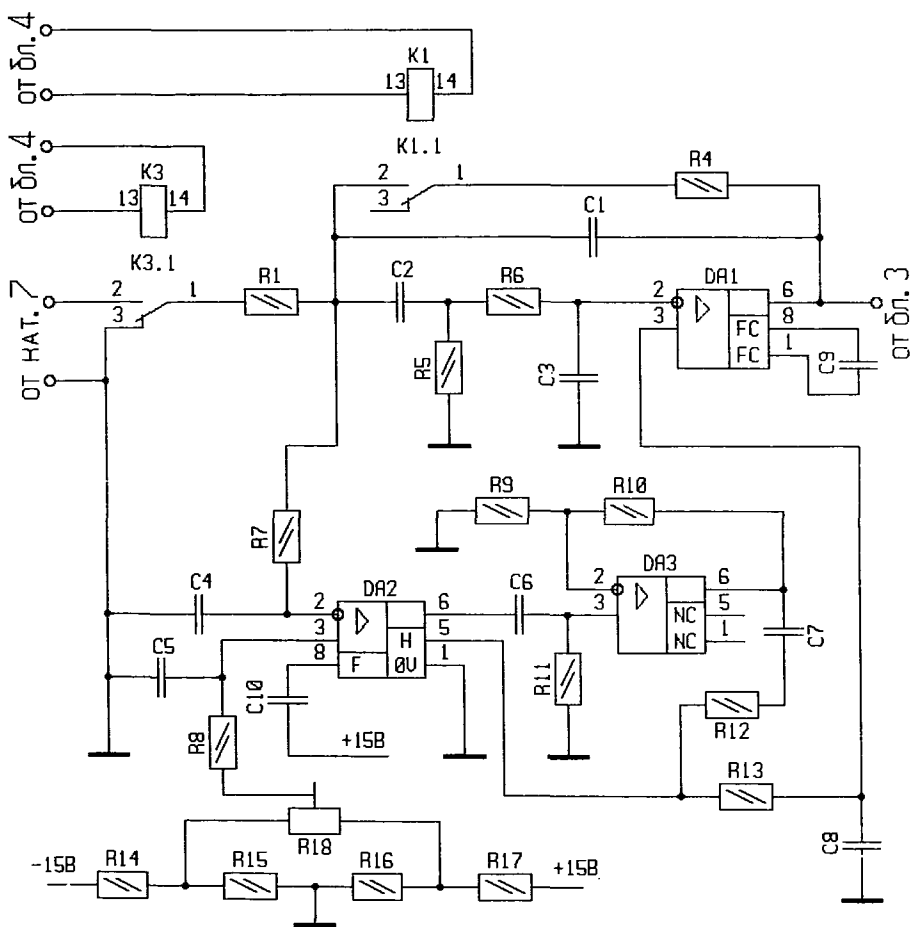
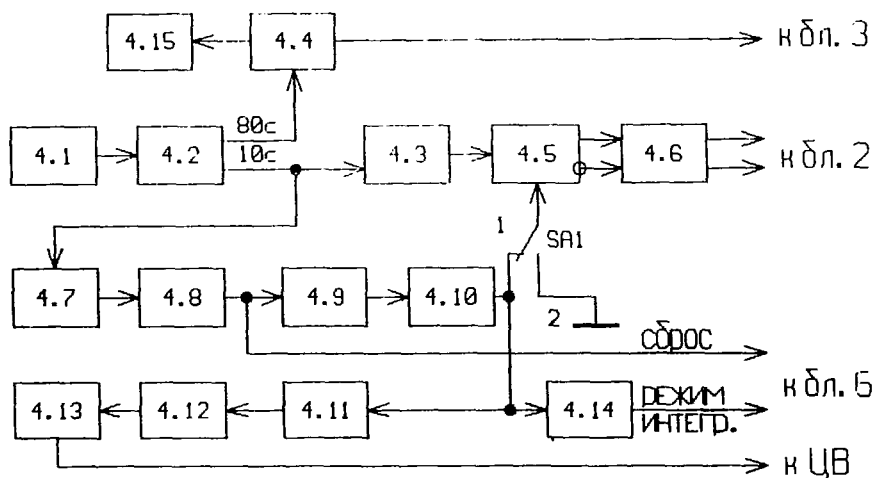


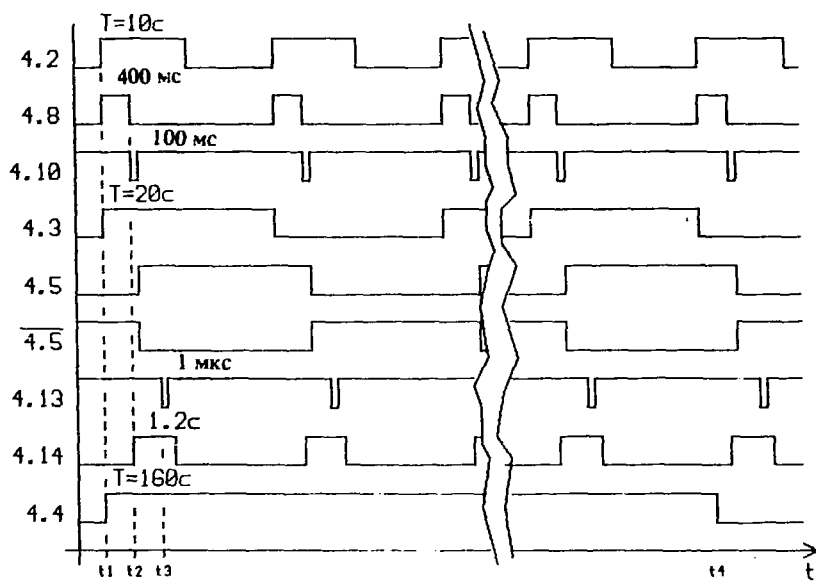
Рис.6. Принципиальная схема электронного интегратора со сложным усилителем

ния намагничивающего тока). Работу блока управления иллюстрируют временные диаграммы, приведенные на рис.7,б.

В блоке управления генерируются две последовательности импульсов с периодами 10 с и 80 с. Указанные последовательности вырабатываются счетчиком-делителем 4.2, на вход которого поступают импульсы с частотой 50 Гц ( $T = 0,02$  с) от задающего генератора 4.1. Импульсы последовательности с периодом 80 с поступают на вход триггера со счетным входом 4.4. На выходе триггера 4.4 получается последовательность импульсов, длительности которых равны длительностям пауз между ними (80 с).



а



б

Рис.7. Структурная схема блока управления (а); временные диаграммы (б)

Напряжение с выхода триггера 4.4 подается на коммутатор 3, при этом вход вольтметра 5 в течение 80 с (длительности импульса, от  $t_1$  до  $t_4$ ) подключен к выходу канала В. За это время 8 раз изменяется направление намагничивающего тока и производится 8 измерений. В течение последующих 80 с (длительности паузы) вход вольтметра 5 подключен к выходу канала Н и перечисленные выше операции выполняются в канале Н. Таким образом, в каждой точке основной кривой индукции значения В и Н определяются по 8 измерениям, что обеспечивает повышение точности определения  $\mu_r$ .

Одновибраторы 4.7, 4.9 и 4.11 запускаются фронтами соответствующих импульсов и формируют короткие импульсы, которые предназначены соответственно для запуска одновибраторов 4.8, 4.10 и 4.12. Других функций одновибраторы 4.7, 4.9 и 4.11 не несут. Одновибраторы 4.7, 4.9 и 4.11 выполнены по схеме, основанной на задержке распространения сигнала в логических элементах [10]. Назначение остальных одновибраторов, а также длительности импульсов, которые они вырабатывают, указаны ниже:

— одновибратор 4.8 вырабатывает импульс сброса интеграторов, длительность импульса — 400 мс;

— одновибраторы 4.12 и 4.13 работают в паре, в момент времени  $t_3$  одновибратор 4.13 вырабатывает импульс запуска вольтметра 5, параметры этого импульса определяются типом используемого вольтметра, одновибратор 4.12 обеспечивает необходимую задержку импульса запуска вольтметра (запуск вольтметра осуществляется или в конце режима интегрирования интеграторов (в момент времени  $t_3$ ), или в начале режима хранения, исходя из этого время задержки составляет 1—1,2 с); одновибратор 4.13 выполнен на двух инверторах с интегрирующей RC-цепочкой между ними [11];

— одновибратор 4.14 в момент времени  $t_2$  вырабатывает импульс длительностью ~1,2 с, задержанный относительно момента  $t_1$  на 400 мс, в течение действия этого импульса в интеграторах обеспечивается режим интегрирования, после его окончания интеграторы переходят в режим хранения;

— одновибратор 4.10 вырабатывает тактовые импульсы для Д-триггера 4.5, задержанные на ~100 мс относительно момента времени  $t_2$ . Каждый из одновибраторов 4.8, 4.10, 4.12 и 4.14 выполнен по схеме, содержащей элемент И—НЕ, транзистор, инвертор, конденсатор и резистор [11].

Последовательность импульсов с периодом 10 с поступает на вход одновибратора 4.7 и проходит по цепочке остальных одновибраторов, подвергаясь перечисленным выше преобразованиям. Кроме того, эта последовательность импульсов поступает на триггер со счетным входом 4.3, в котором

формируется последовательность импульсов с периодом 20 с (длительность каждого из импульсов этой последовательности (10 с) равна паузе между ними). Далее последовательность импульсов с периодом 20 с поступает на вход Д-триггера 4.5, на прямом и инверсном выходах которого последовательности импульсов будут задержаны на  $\sim 100$  мс по отношению к последовательности импульсов на его входе (ввиду указанной выше задержки тактовых импульсов, подаваемых на Д-триггер 4.5).

Блок реверса 2 получает управляющие сигналы с выходов Д-триггера 4.5 через импульсный усилитель с преобразованием полярности (так как ключи ТТЭ отпираются импульсами отрицательной полярности, см. рис. 4). При таком управлении блоком реверса 2 в течение первой (условно) половины периода (10 с) намагничивающий ток протекает в положительном (условно) направлении, в течение второй половины — в обратном (отрицательном) направлении.

Обратим внимание на некоторые временные соотношения во взаимодействии узлов пермеметра. За  $\sim 500$  мс до момента реверса тока (в момент времени  $t_1$ ) начинается сброс интеграторов, который, как указывалось выше, длится  $\sim 400$  мс. По окончании сброса интеграторов и примерно за 100 мс до момента реверса тока (в момент времени  $t_2$ ) включается режим интегрирования, который имеет длительность 1,2 с. После этого интеграторы переводятся в режим хранения, который продолжается до следующего сброса.

Перевод интеграторов в режим интегрирования примерно за 100 мс до момента начала реверса тока, то есть до момента появления сигналов с измерительных катушек, имеет целью надежно исключить потери начальных участков сигналов при каких-либо изменениях продолжительности собственно режима сброса и других временных отклонениях во взаимодействии узлов. Чтобы исключить потери сигнала на заключительном этапе промагничивания материала при относительно толстых образцах, продолжительность интегрирования сигналов с измерительных катушек выбрана  $\sim 1,2$  с.

Диапазон рабочих значений индукции в испытываемом образце составляет от 1,6 до 1,95 Тл, рабочий зазор — 50 мм, диаметр образца — 23 мм, его длина — 230 мм. Погрешность измерения относительной магнитной проницаемости  $\mu$ , составляет  $\pm 1,5\%$ .

В заключение авторы выражают благодарность Ю.А.Будагову, Ю.Ф.Ломакину и В.И.Сняткову за полезные обсуждения на всех этапах выполнения работы.

#### Литература

1. Ворожцов С.Б. и др. — Сообщение ОИЯИ P13-93-149, Дубна, 1993.
2. Vorozhtsov S.B. et al. — SDC Notes, SDC-93-485, April 2, 1993.

3. Vorozhtsov S.B. et al. — SDC Notes, SDC-93-486, April 3, 1993.
4. Чечерников В.И. — Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ, 1963.
5. Кифер И.И. — Испытания ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969.
6. Калиниченко В.В. — Сообщение ОИЯИ 13-8157, Дубна, 1974.
7. Шяло В.Л. — Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1979.
8. Гутников В.С. — Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
9. Полонников Д.Е. — Операционные усилители: принципы построения, теория, схемотехника. М.: Энергоатомиздат, 1983.
10. Вениаминов В.Н. и др. — Микросхемы и их применение. М.: Радио и связь, 1989.
11. Зельдин Е.А. — Импульсные устройства на микросхемах. М.: Радио и связь, 1991.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 июля 1993 года.