

Л-312

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



4245/2-74

28/x-74

P9-8118

В.М.Лачинов, В.К.Маковеев

**ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

1974

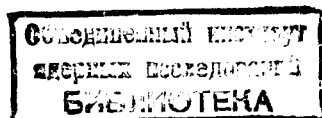
ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

P9-8118

В.М.Лачинов, В.К.Маковеев

**ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Направлено в ЦТЭ



ВВЕДЕНИЕ

Методика измерения мгновенных значений магнитных полей позволяет определять как амплитуду и градиенты постоянных, переменных и импульсных полей, так и их распределение во времени. Магнитометры, основанные на этой методике, отличаются большей универсальностью, возможностью калибровки в постоянных полях по ЯМР-измерителям и обеспечивают высокие относительные и абсолютные точности измерений. Они успешно применяются в технике ускорителей заряженных частиц, где используются разнообразные магнитные поля.

Ниже рассмотрен двухканальный магнитометр /МИХ-2/ указанного типа с датчиками Холла /ДХ/, предназначенный для измерений с точностью 0,1% импульсных и постоянных магнитных полей в коллективном ускорителе ОНМУ ОИЯИ. Применение ДХ, обладающих малыми размерами, широкополосностью, чувствительностью к направлению поля, линейностью и большим динамическим диапазоном характеристик, дает дополнительные полезные возможности при измерениях магнитных полей.

Одной из причин, ограничивающих точность измерений переменного-импульсных полей, являются индукционные наводки на ДХ и кабель связи. Индукционная наводка пропорциональна скорости нарастания магнитного поля и эффективной, по отношению к полю, площади во входных цепях. Повышение чувствительности ДХ позволяет относительно снизить влияние наводок. В магнитометре повышение чувствительности достигается за счет питания ДХ импульсным током с амплитудой $I_{\text{пи}}$,

превышающей в $10 \div 20$ раз номинальное значение $I_{\text{п}}$ на постоянном токе, ограниченное перегревом ДХ /Л1/. Используя для питания ДХ прямоугольные импульсы с длительностью τ и частотой повторения ν и сохраняя допустимый перегрев ДХ, амплитуду импульса тока можно увеличить до

$$I_{\text{пи}} = I_{\text{п}} (\tau \nu)^{-1/2} \quad /1/$$

Высокое быстродействие ДХ допускает τ ~мкс, что при 10-20-кратном превышении $I_{\text{п}}$ позволяет иметь частоту повторения до ~кГц. Кроме того, импульсное питание ДХ соответствует импульсному характеру измерений при небольшой частоте повторения и стремлению к мгновенности измерений, а также улучшает параметры других узлов магнитометра. Дополнительно в МИХ-2 уменьшены индукционные наводки обычными методами - скручиванием и укладкой подводов к ДХ, введением экранов. Применение в магнитометре современных интегральных операционных усилителей /ОУ/ с дифференциальным входом позволило получить широкополосные, стабильные и линейные измерительные каналы и ряд дополнительных возможностей, способствующих достижению высоких результатов.

БЛОК-СХЕМА МАГНИТОМЕТРА

На рис. 1 представлена блок-схема одного измерительного канала МИХ-2. В отличие от МИХ-1 /Л2/, в нем установлены высокоточные ДХ из антимонида индия /Л3/. Эти ДХ имеют размер чувствительной области $1,6 \times 0,5 \times 0,13$ мм. Входное и выходное сопротивление ~ 2 Ом, чувствительность ~ 10^2 мВ/Т при номинальном токе питания 100 мА. ТКН Холла менее 0,01%/°С и ТКН неэквивипотенциальности 0,2 мкВ/°С. Линейность характеристики ДХ в диапазоне полей до 2,5 Т ~ 0,1%. Подводящие кабели связи и электроды к ДХ бифилярно скручены, а в области ДХ уложены так, что индукционная наводка на них поперечного и продольного магнитного поля менее 50 мкВ/Т.кГц.

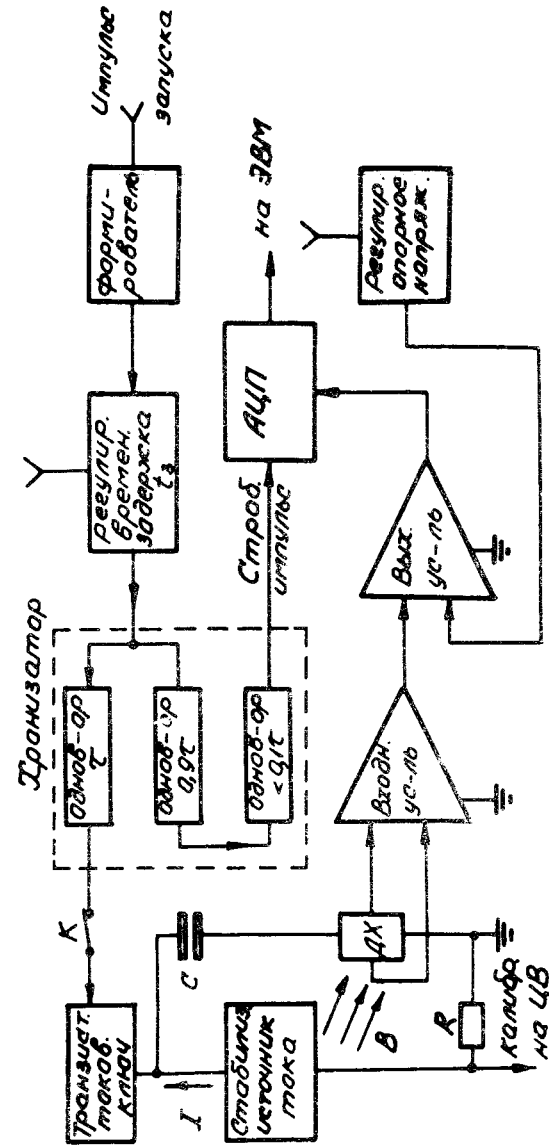


Рис. 1. Блок-схема одного измерительного канала магнитометра.

ДХ питается импульсным $i = 10 \text{ мкс/}$ током $\sim 1 \text{ А}$, что повышает чувствительность его до $\sim 10^3 \text{ мВ/Т}$. Источник постоянного тока со стабильностью 10^{-4} подсоединен к входу ДХ через конденсатор C , а параллельно им подключен транзисторный токовый ключ, который на время питания ДХ запирается управляющим импульсом модуляции от хронизатора. Стабильный ток питания проходит то через токовый ключ, то через ДХ. Конденсатор C выбран по величине так, что за время импульса модуляции напряжение на C мало меняется и практически на ток не влияет. После окончания импульса C быстро перезаряжается. Конденсатор C полезен тем, что он предохраняет ДХ от длительного протекания через него повышенного тока. Так, в аварийном случае за время более 20τ напряжение на C настолько возрастает, что стабилизатор тока выходит из нормального режима и ток прекращается. Кроме того, конденсатор C после перезарядки обеспечивает нулевой начальный ток через ДХ, хотя на ключе есть остаточное напряжение.

Начало процесса измерения определяется подачей на вход формирователя /рис. 1/ запускающего импульса, который жестко привязан по времени к измеряемому импульсу магнитного поля /рис. 2а,б/. Кроме того, при автономной работе магнитометра формирователь вырабатывает импульсы разового пуска и периодические с частотой 500 Гц .

Импульсы с формирователя задерживаются на время t_3 /рис. 2,в/ в блоке цифровой управляемой задержки от 0 до 10 мсек или более /Л4/. Задержка регулируется с шагом $0,1 \text{ мксек}$ и обеспечивает измерение полей в разные моменты времени. Задержанный импульс поступает в хронизатор. Он запускает первый одновибратор, вырабатывающий импульс модуляции /рис. 2,г/ с длительностью τ , и второй, вырабатывающий импульс /рис. 2,д/ с длительностью $0,9\tau$. Последний задним фронтом запускает третий одновибратор, обеспечивающий стробимпульс /рис. 2,е/ с длительностью менее $0,1\tau$.

Если ДХ находится в магнитном поле B /рис. 2,б/, то при прохождении через ДХ тока питания на его выходе возникает сигнал, пропорциональный B . Этот сигнал

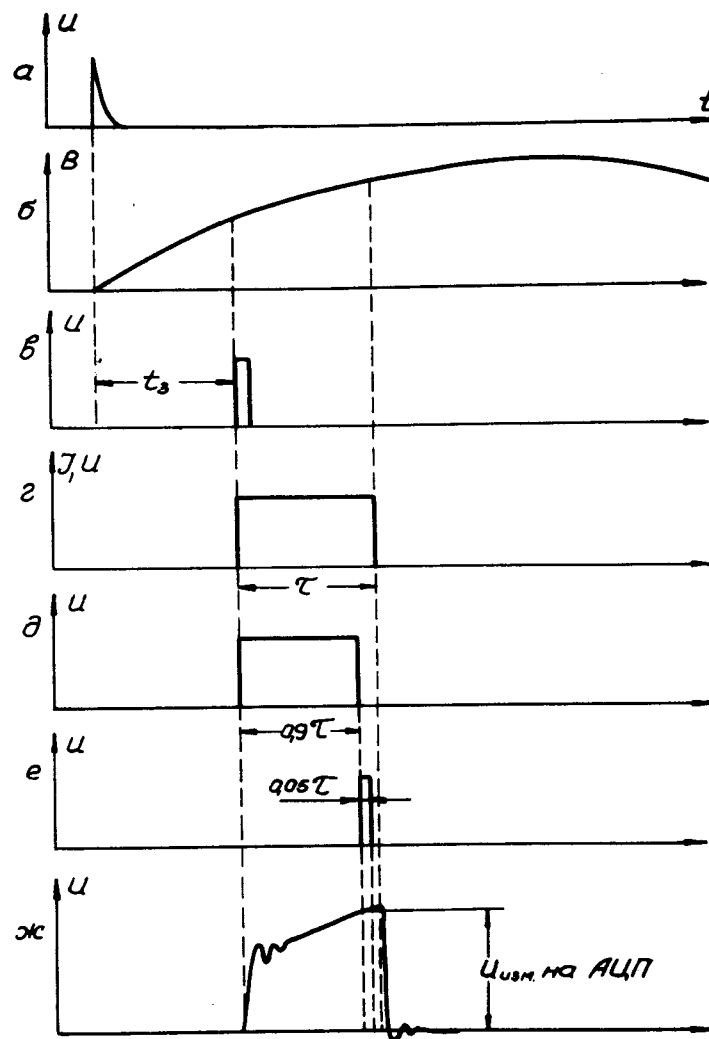


Рис. 2. Временные диаграммы магнитометра.

после усиления подается на регистрирующий аналого-цифровой преобразователь /АЦП/ /рис. 1/. В начале импульса модуляции в кабеле связи и в усилителях возникают переходные процессы, которые быстро /менее чем за 2 мксек/ заканчиваются. Значение $\tau = 10$ мксек выбрано сравнительно большим, чтобы обеспечить хорошее соответствие выходного сигнала полю B в момент измерения. Последний определяется стробимпульсом, положение которого строго фиксировано по отношению к импульсу модуляции и соответствует его конечной части /рис. 2, ж/. Мгновенное значение /в пределах 1 мксек/ измеряемого сигнала регистрируется в цифровом виде в блоке АЦП. В МИХ-2 использован АЦП /Л4/ с диапазоном входных сигналов 50 мВ - 5 В, $R_{вх.} = 1$ К, с 1024 каналами и двоично-десятичной индикацией. Результат с АЦП можно подать на ЭВМ или на десятичный индикатор.

Для улучшения разрешения и расширения функциональных возможностей магнитометра с помощью устройства регулируемого опорного напряжения /рис. 1/ на входе АЦП можно задавать смещение $U_{см}$ в пределах $+5$ В ÷ $-7,5$ В.

Измерение градиентов магнитных полей осуществляется по следующей схеме соединения двух ДХ и измерительных каналов с ОУ /рис. 3/. Оба ДХ питаются последовательно от одного стабилизатора тока, что способствует повышению точности измерения. Поскольку цепь питания ДХ заземлена, то согласование по постоянному току выходных цепей ДХ реализуется двумя ОУ с дифференциальными входами, которые нечувствительны к синфазным сигналам /Л5/. Сигнал градиента магнитного поля, в котором расположены ДХ, получается с помощью дополнительного усилителя ОУ3.

БЛОК ВХОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЕЙ

На рис. 4 показана схема одного канала входного усилителя сигнала с ДХ. Основу усилителя составляют

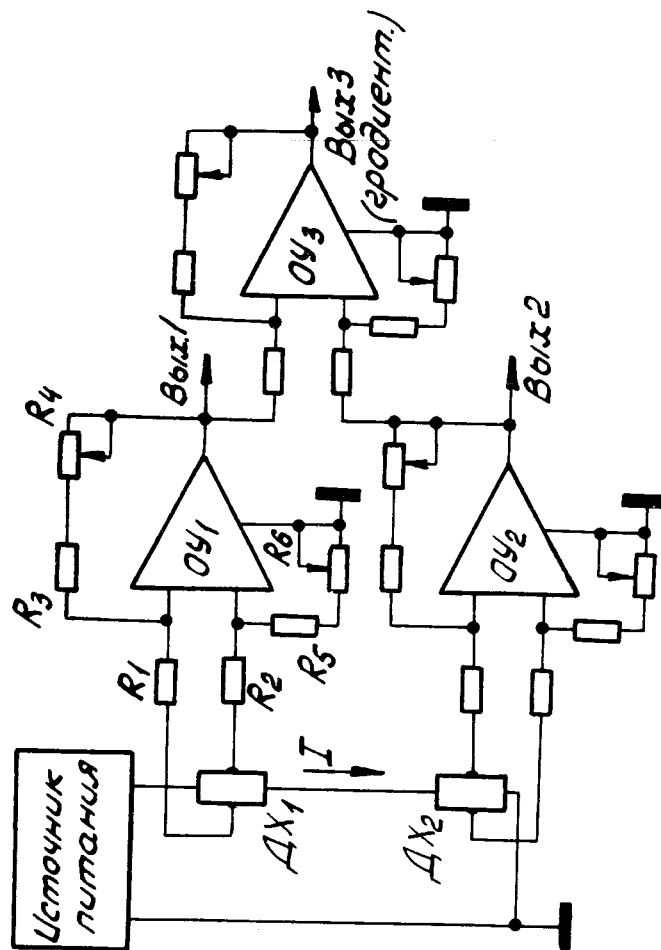


Рис. 3. Схема измерения градиентов магнитных полей.

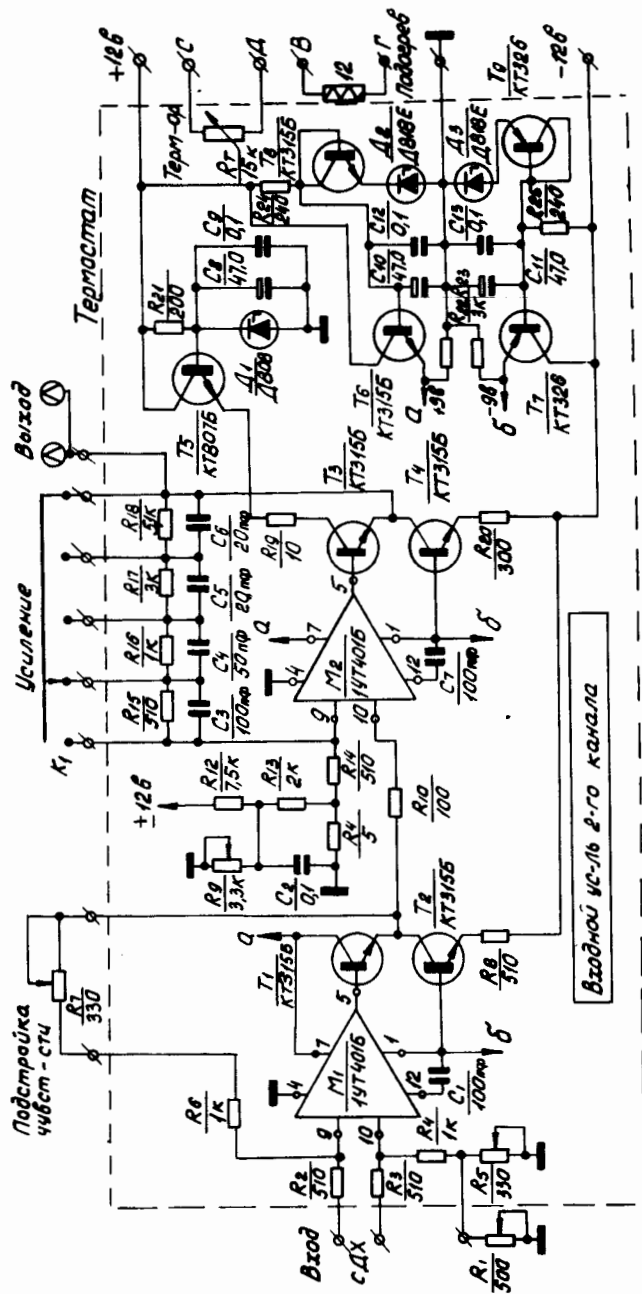


Рис. 4. Схема одного канала входного усилителя.

ОУ типа 1УТ401. Они имеют полосу пропускания до -5 МГц, дрейф до -10 мкВ/°С, дифференциальный вход и обеспечивают при малых коэффициентах масштабного преобразования их высокую стабильность. Кроме того, усилители используются для компенсации неэквипотенциальности ДХ, выравнивания чувствительности каналов и подавления синфазной наводки на ДХ и входные цепи.

Первый каскад /M1/ работает в дифференциальном режиме ($K'_{yc} = 2$). С помощью R_1 осуществляется балансировка его и компенсация неэквипотенциальности ДХ. Для подстройки одинаковой чувствительности каналов, так как ДХ обычно отличаются по чувствительности, служит R_7 .

Второй каскад /M2/ реализует пять коэффициентов масштабного преобразования $/K''_{yc} = 1,2,5,10,20/$. Он обеспечивает напряжения на выходе до $+5$ В и имеет цепь $R_6 \div R_9$ подстройки нуля. На выходе всех ОУ поставлены эмиттерные повторители (T_1, T_3) для снижения выходного сопротивления. Питание выходного повторителя, который нагружается на 50 Ом кабель и потребляет в импульсе ток до 100 мА, обеспечивается цепью с T_5 и D_1 . В схеме усилителя установлены стабильные резисторы. Питание ОУ стабилизировано с помощью $D_1 \div D_4$ /Д818Е/. Импульсный режим работы усилителей с большой скважностью способствует уменьшению временного дрейфа ОУ, т.к. режим по постоянному току мало изменяется в процессе измерений.

Для снижения температурных нестабильностей входных усилителей /а они наиболее сильно снижают точность магнитометра/ в МИХ-2 усилители помещены в подогревный термостат. В нем поддерживается $+50^\circ\text{C}$ с точностью до $\pm 0,1^\circ\text{C}$ при колебаниях внешней температуры $\pm 5^\circ\text{C}$.

Схема управления термостатом показана на рис. 5. Термистор типа СТЗ-19 включен в плечо моста / $D_1 \div D_4, R_1, R_2$ /. Напряжение разбаланса усиливается ОУ /M1/ и каскадом $T_2 \div T_4$. Током подогрева управляют транзисторы $T_5 - T_7$. Начальный ускоренный разогрев термостата осуществляется подключением подогревате-

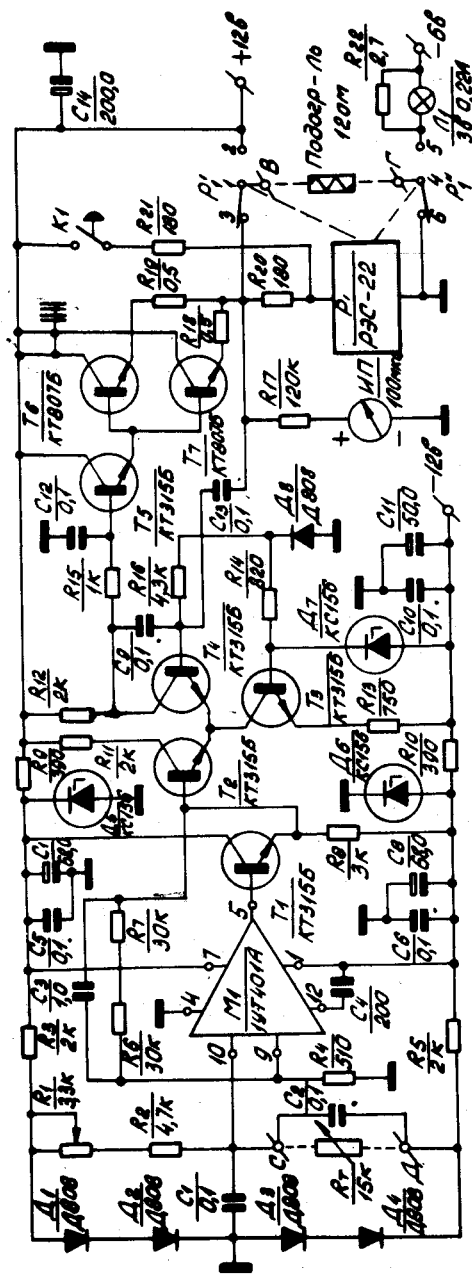


Рис. 5. Схема управления термостатом.

ля с помощью кнопки $K1$ и реле P_1 к источнику с повышенным напряжением. После разогрева автоматически включается система термостабилизации. Термостат представляет собой коробку 160 x 160 x 50 мм из меди толщиной 1 мм с равномерно намотанными на ней подогревателем с сопротивлением 12 Ом. Поверх подогревателя расположен теплоизолирующий экран. Работа системы контролируется по стрелочному прибору ИП.

БЛОК ВЫХОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Этот блок /рис. 6/ реализует дополнительное усиление сигнала с ДХ, регулируемое стабильное смещение $+5 В \div -7,5 В$ на выходе и работу в режиме дифференциального усиления при измерении градиентов. Усилитель с дифференциальным входом, подобный входному усилителю, может работать в балансном режиме и в режиме усиления положительного сигнала. Выход его через Π_2 подсоединяется к каскаду на $M3 / K'' = 3 /$, который обеспечивает выходные сигналы до $\sim 8 В$ на 1 К. Во втором положении Π_2 к неинверсному входу $M2$ подключается сигнал с основного входа. Опорное напряжение берется с параметрического стабилизатора на $D_1 \div D_4 / KC196Г /$, $T_1 \div T_6$. Стабильность этого напряжения лучше 10^{-4} в диапазоне комнатных температур. С помощью делителей на R_4 , R_5 , R_7 , где R_7 - гелиопот с трехзначным счетчиком, переключателя Π_1 и ОУ / $M1$ / регулируемое напряжение любой полярности подается на инверсный вход $M2$.

БЛОК ФОРМИРОВАНИЯ И ХРОНИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

Схема блока представлена на рис. 7. Запуск устройства производится либо положительным импульсом до 300 В, либо отрицательным $+3 В - 0 В$, или кнопкой разового пуска, либо от внутреннего генератора 500 Гц. Способ запуска выбирается переключателем Π_1 . С вы-

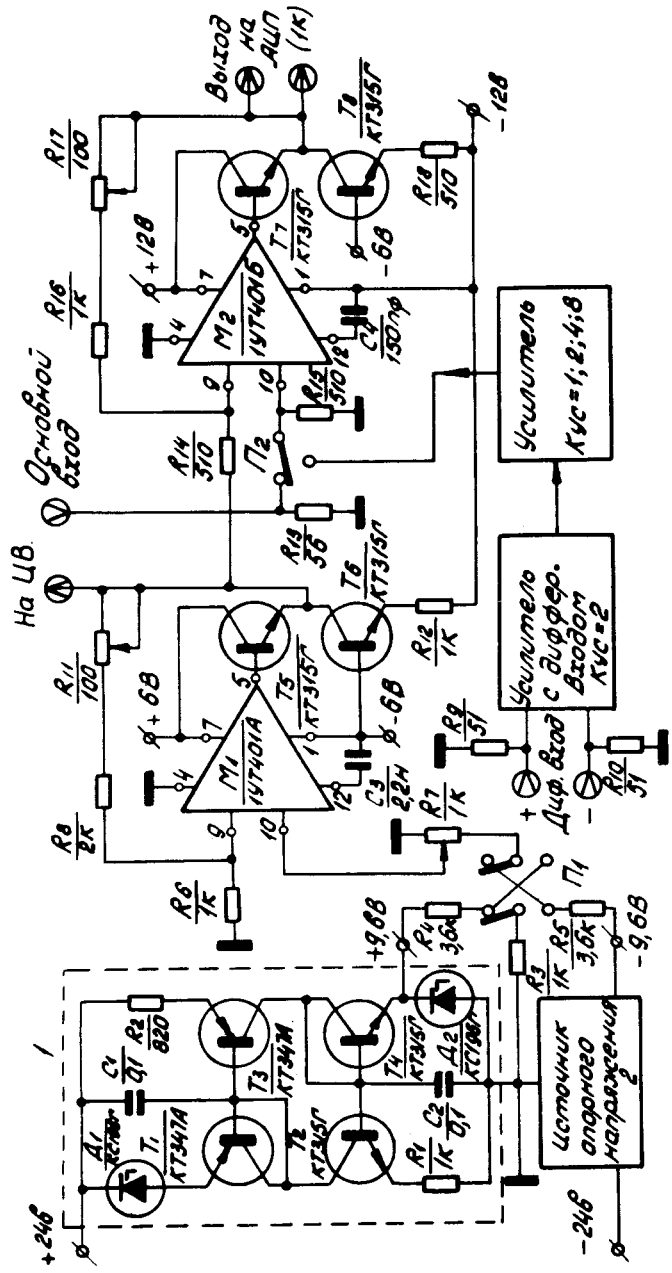


Рис. 6. Схема блока выходного усилителя.

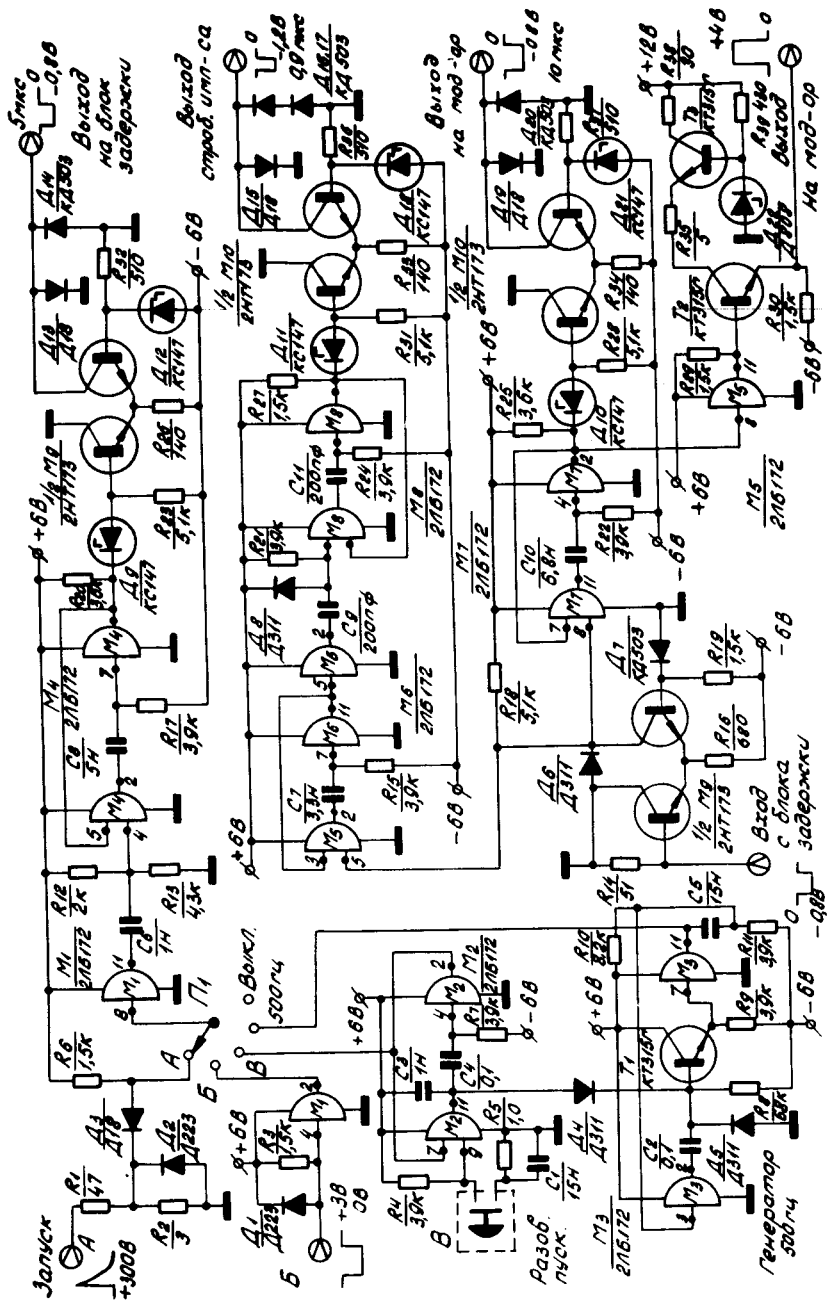


Рис. 7. Схема блока формирования и хронирования.

хода III импульс запускает одновибратор на М4, который вместе с каскадом на М9 формирует импульс 5 мксек, с амплитудой - 0,8 В на 50 Ом для подачи в блок задержек. После задержки импульс через каскад на М9 запускает два одновибратора на М5, М6 и М7. Одновибратор на М7 вырабатывает импульс модуляции с $\tau = 10$ мксек. С помощью каскадов на М5, М10 и Т2 реализуется два выхода на кабель 50 Ом с амплитудой + 4 В и -0,8 В для подачи одного из импульсов на транзисторный ключ. Одновибратор на М5, М6 вырабатывает импульс с длительностью ~ 9 мксек. После его инвертирования в М5 и дифференцирования сигнал, соответствующий заднему фронту импульса, запускает одновибратор на М8, который формирует стробимпульс с длительностью ~ 0,9 мксек. Выходной каскад на М10 обеспечивает стробимпульс с амплитудой - 0,8 В на нагрузке 50 Ом.

БЛОК СТАБИЛИЗАТОРА ТОКА И МОДУЛЯТОРА

Схема стабилизатора тока до 1,2 А показана на рис. 8. Источник опорного напряжения на Т4 ÷ Т7 и Д5, Д6 аналогичен рассмотренному выше. В стабилизаторе сравниваются в ОУ /М1/ регулируемое опорное напряжение с гелипота R11 и напряжение от стабилизируемого тока на эталонном сопротивлении R18. Усиленный сигнал ошибки с помощью составного транзистора на Т11, Т12 управляет выходным током. Установку тока 0,9 ÷ 1,2 А и проверку его стабильности осуществляют по цифровому вольтметру /ЦВ/, устанавливая ключ К1 в положение "Калибровка". Длительная стабильность тока после 20 мин прогрева составляет ~ 10⁻⁴.

Импульс модуляции в зависимости от полярности подается либо на вход каскада на Т1, Т2, либо на М1 /рис. 8/. После прохождения М2 импульс поступает на повторитель Т8, с выхода которого он управляет транзисторным ключом. Последний состоит из 14 параллельно включенных транзисторов Т13 ÷ Т26 типа КТ315Г. Он позволяет с высоким быстродействием коммутировать ток до 1,2 А, имея малый ток утечки в запертом состоя-

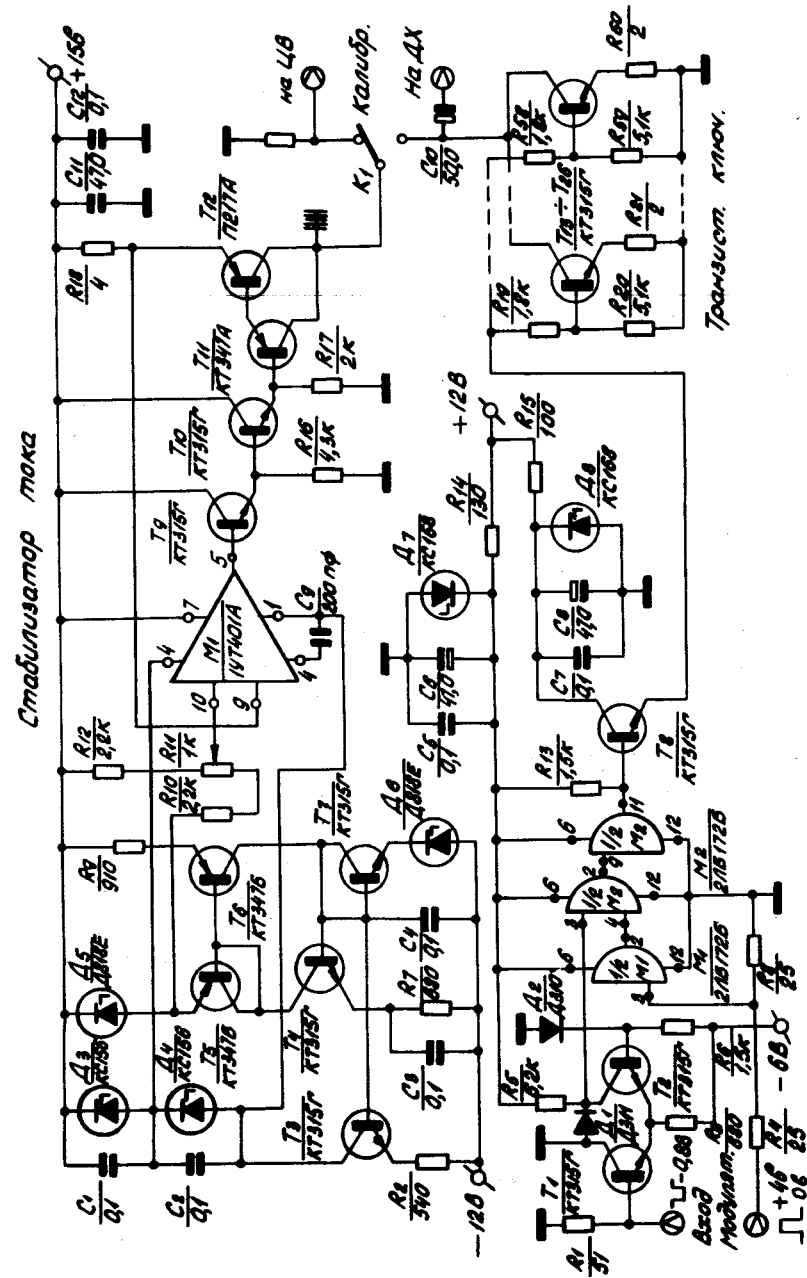


Рис. 8. Схема стабилизатора тока и модулятора.

нии, а в открытом - падение напряжения $\sim 0,4$ В. В положении К1 "на ДХ" ток питания шунтируется на землю открытым токовым ключом. Импульс модуляции запирает ключ, и ток через C_{10} поступает в цепь питания ДХ.

КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТОМЕТРА

Конструктивно МИХ-2 состоит из двух приборных секций-корзин типа "Вишня" с набором блоков /рис. 9/. Входная измерительная секция включает блок входных усилителей, блок стабилизатора тока и модулятора, блок управления термостатом и источники питания для этих блоков. Эта секция располагается вблизи измеряемого поля.

У каждого канала имеется пробник с ДХ, который соединен кабелем длиной до 10 м с соответствующими блоками. Кроме того, имеется градиентный пробник с двумя последовательно включенными по питанию ДХ, которые подключены к одному из стабилизаторов тока, а их холловские выходы - к входам отдельных каналов. В пробнике ДХ расположены в одной плоскости на расстоянии 10 мм друг от друга.

Выходная регистрационно-управляющая секция прибора соединяется 50-метровыми кабелями с входной секцией в цепях между блоками входных и выходных усилителей и в цепях передачи импульсов модуляции. При необходимости выходная секция МИХ-2 выносится в другое место. В эту секцию входит блок формирования и хронирования, блок цифровой задержки, блок АЦП, два блока выходных усилителей и блок десятичной индикации показаний АЦП. Источник питания собран из стандартных блоков питания ЦЭМ и расположен отдельно от секции.

ТОЧНОСТЬ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Перед началом измерений требуется прогрев магнитометра в течение 30-60 мин. По ЦВ проверяется

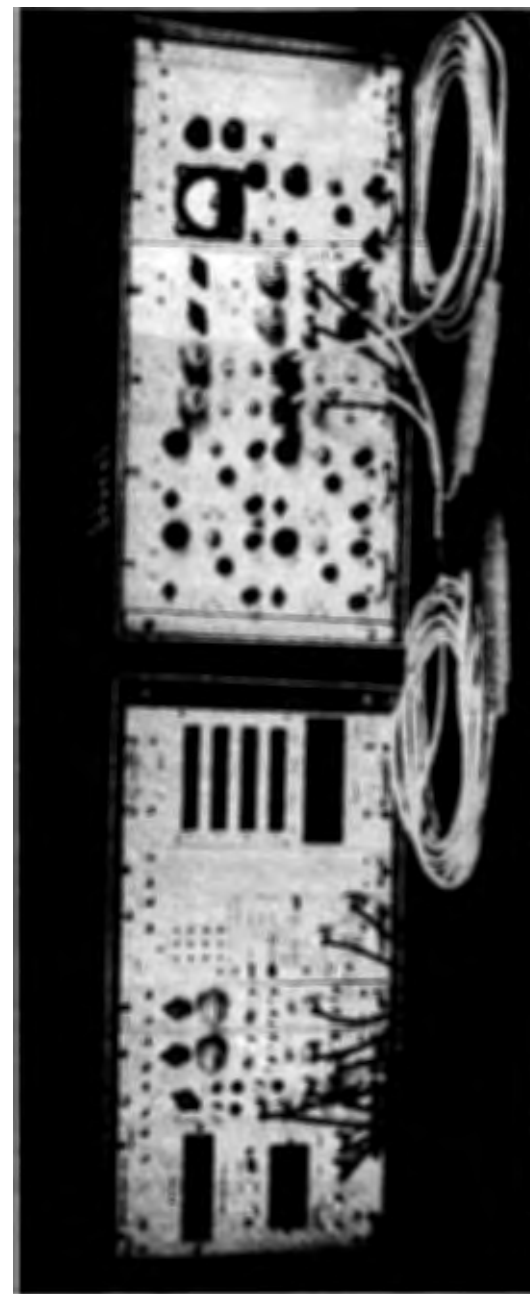


Рис. 9. Внешний вид магнитометра МИХ-2.

и корректируется ток питания ДХ и устанавливается необходимое смещение на входе АЦП. В отсутствие поля по осциллографу или АЦП осуществляется компенсация неэквипотенциальности ДХ. Устанавливается режим запуска и нужная задержка. Выбирается диапазон измерения /основные диапазоны 0 ± 1 , $4 \cdot 10^{-2} T$; $5,5 \cdot 10^{-2} T$; $0,1 T$; $0,4 T$; $1 T$; $2,5 T$ /.

Калибровка МИХ-2 проводится в постоянных однородных полях, которые контролируются с точностью до $0,001\%$ ЯМР-магнитометром. В этом случае с помощью МИХ-2 по калибровочным кривым или таблицам обеспечиваются наиболее низкие относительные и абсолютные погрешности измерений мгновенных значений магнитных полей.

Величину общей относительной погрешности измерений полей, B_x , магнитометром можно определить по следующей формуле:

$$\delta_{\text{отн.}} = \left(0,05 + \frac{10^{-3}}{B_x} + \frac{100}{N_{kx} \pm N_{k_{CM}}} \right) \% \quad /2/$$

Первые две составляющие $\delta_{\text{отн.}}$ определяются в основном температурными изменениями параметров ДХ, стабильностью тока питания ДХ, дрейфом и шумами усилителей. Указанные значения достигаются после прогрева прибора и изменения внешней температуры менее $\pm 5^\circ C$. Последняя составляющая $\delta_{\text{отн.}}$ является погрешностью дискретности АЦП. Уменьшение этой погрешности более чем в 2 раза получается при введении отрицательного смещения на входе АЦП - $N_{k_{CM}} = U_{CM} / 5 \text{ мВ}$.

Погрешность от индукционной наводки в МИХ-2 не превышает 1 канала АЦП для синусоидально меняющихся магнитных полей с частотой до 10 кГц . Если погрешность выше, то ее можно исключить, измерив отдельно сигнал наводки при отключении импульса модуляции ключом К /рис. 1/, и вычесть его из результата измерения поля при замкнутом К.

Дополнительная погрешность возникает при временных измерениях переменных магнитных полей. Во-

первых, имеется погрешность "мгновенности" измерения, т.е. усреднение измеряемого поля в пределах менее 1 мксек за счет длительности стробимпульса. Во-вторых, момент измерения относительно запуска определяется временем $\sim t_3 + \tau$ /рис. 2/ и нужно учитывать их нестабильность или дискретность, которая равна $\sim 0,1 \text{ мксек}$.

Для уменьшения относительных погрешностей в измерениях распределений градиентов магнитных полей нужно пользоваться градиентным каналом МИХ-2. Он позволяет измерять градиенты в полях до $0,5 T$ с чувствительностью $\sim 0,25 \cdot 10^{-4} T / \text{см}$. канал, а в полях до $2,5 T$ с чувствительностью $\sim 1,25 \cdot 10^{-4} T / \text{см}$. канал.

Точность измерений пространственных или временных распределений полей и их градиентов непосредственно зависит от стабильности воспроизведения измеряемых полей. Снижение этой погрешности достигается разными способами. Например, увеличивают количество измерений в отдельных точках или проводят относительные измерения. В ряде случаев вводят пересчет измеренного значения по параметру, связанному с измеряемым полем. Так, в МИХ-2 имеется два измерительных канала, один из которых можно использовать в качестве опорного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный выше магнитометр широко применяется при измерении и формировании магнитных полей в различных установках коллективного ускорителя ОНМУ. Диапазон измеряемых полей МИХ-2 составляет от 10^{-3} до $2,5 T$. Проводились как длительные /непрерывно более 2 недель/ на линии с ЭВМ, так и короткие сеансы измерений пространственных и временных распределений магнитных полей. Прибор показал высокую надежность функционирования и хорошую повторяемость результатов. Многие функциональные возможности магнитометра при точности измерения магнитных полей до $0,1\%$ делают его удобным и необходимым прибором для решения ряда задач магнитометрии в технике ускорителей заряженных частиц.

Возможности усовершенствования магнитометра далеко не исчерпаны. Использование ОУ с меньшим дрейфом и шумом, АЦП с числом каналов свыше 4000, термостабилизация ДХ, уменьшение временного интервала "мгновенности" и ряд других улучшений наряду с повышением уровня автоматизации магнитометра позволят достичь более высоких точностей измерений амплитудных и временных распределений магнитных полей.

В заключение авторы благодарят И.А.Голутвина за поддержку в работе, Д.А.Смолина и В.С.Хабарова за предоставление ряда стандартных электронных блоков и Н.Н.Корнилова, В.Н.Евдокимова, А.М.Старикова за хорошее выполнение монтажных работ.

Литература

1. D.L. Shirer. *Rev. Sci. Instr.*, 31, 9, p. 1000, 1960.
2. В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р9-7778, Дубна, 1974.
3. В.И.Погодин, Г.А.Юрьева. Датчик Холла из антимонида индия. Приборы и системы управления, 7, 15, 1972.
4. И.А.Голутвин и др. Труды VII Международного симпозиума по ядерной электронике, сентябрь 1973 г., Будапешт. ОИЯИ, Дубна, Д13-7616, 1974.
5. Л.И.Волгин. "Линейные электрические преобразователи для измерительных приборов и систем". Изд. "Сов. радио", стр. 82, 1971 г.

*Рукопись поступила в издательский отдел
19 июля 1974 года.*