

СЗУ5С

В-63

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



78/2-78

13 - 10907

2/1-78

М.А.Воеводин, Ю.И.Романов

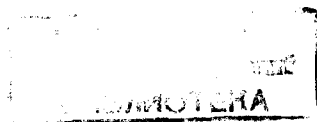
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАКТ И КОММУТАТОР
МНОГОКАНАЛЬНОГО МАГНИТОМЕТРА
С ГАЛЬВАНОМАГНИТОРЕКОМБИНАЦИОННЫМИ
ДАТЧИКАМИ

1977

13 - 10907

М.А.Воеводин, Ю.И.Романов

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАКТ И КОММУТАТОР
МНОГОКАНАЛЬНОГО МАГНИТОМЕТРА
С ГАЛЬВАНОМАГНИТОРЕКОМБИНАЦИОННЫМИ
ДАТЧИКАМИ



Воеволин М.А., Романов Ю.И.

13 10907

Измерительный тракт и коммутатор многоканального магнитометра с гальваномагниторекомбинационными датчиками

Описаны электронные схемы десятиканального магнитометра, предназначенного для измерения постоянных магнитных полей в диапазоне (10^{-5} $2 \cdot 10^{-2}$) Т. В качестве датчиков используется новый тип магниточувствительного элемента – гальваномагниторекомбинационные преобразователи, обладающие повышенной чувствительностью к магнитному полю (100 200 В/Т). Измерительный тракт магнитометра обеспечивает хорошую избирательность, малый уровень собственных шумов и стабильный коэффициент усиления. Аналоговый коммутатор снабжен цифровой индикацией опрашиваемого канала. Магнитометр используется для измерения остаточного магнитного поля синхрофазотрона.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

© 1977 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

В середине 50 гг. при изучении процессов рекомбинации в полупроводниковых приборах был предложен новый метод измерения напряженности магнитного поля⁴. Этот метод основан на эффекте изменения концентрации носителей заряда в тонком полупроводниковом образце, находящемся в магнитном поле, при пропускании через него электрического тока¹⁻³. Дальнейшие исследования нового типа преобразователя, названного гальваномагниторекомбинационным /ГМР/, были продолжены в Институте физики полупроводниковых приборов АН Литовской ССР⁵⁻⁷.

ГМР преобразователь является более простым элементом, чем датчик Холла, т.к. представляет собой полупроводниковый резистор с активным сопротивлением, величина которого зависит от магнитного и электрических полей, скрещенных в пространстве. Влияние магнитного поля на среднюю концентрацию носителей тока в ГМР элементе увеличивается или уменьшается с увеличением или уменьшением напряженности электрического поля. Таким образом, ГМР преобразователь в отсутствие магнитного поля ведет себя как обычный резистор, а в магнитном поле проявляет вентильные свойства⁸.

В отличие от магниторезисторов и магнитодиодов, ГМР преобразователь имеет линейную зависимость выходного напряжения от величины измеряемого магнитного поля. Он чувствителен не только к величине, но и к направлению магнитного поля, имеет небольшие размеры /10 x x 1,5 x 0,5 мм/, незначительную величину потребляемой мощности /~20 мВт/ и высокую чувствительность к магнитному полю /50 ... 200/ В/Т.

Используя ГМР преобразователи, можно проектировать многоканальные магнитометры для измерения малых и средних магнитных полей со сравнительно несложной электронной аппаратурой^{16/}.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА

Измерительный тракт десятиканального магнитометра, предназначенного для измерения в одном диапазоне $/10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-2} / T$ постоянных и медленно меняющихся $/f \leq 5 \text{ Гц}/$ магнитных полей, состоит из следующих узлов /рис. 1/:

- а/ термостабилизированной капсулы с ГМР-элементом и нагревателем;
- б/ линии связи длиной до 200 м, определяющей максимально возможное удаление датчика от схемы входного устройства;
- в/ измерительного моста, содержащего активные и реактивные элементы;
- г/ узкополосного фильтра низких частот /ФНЧ/;
- д/ двух источников опорного напряжения /ИОН/;
- е/ схемы термостатирования датчика;
- ж/ аналогового коммутатора и выходного каскада.

При измерении с помощью ГМР преобразователей постоянных магнитных полей использование известных схем, предназначенных для определения относительного изменения сопротивления /например, схем тензометров/, оказывается малоэффективным, т.к. величина относительного изменения сопротивления ГМР элемента в маг-

нитном поле (H) сравнительно мала $/\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dH} \approx \approx 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ I/Гс}/$, в то время как его температурный коэффициент сопротивления имеет большую величину $/\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ I/}^\circ\text{C}/$ при $t = 25^\circ\text{C}$.

Поэтому с целью уменьшения влияния нестабильности температуры на выходное напряжение мостовой схемы

необходимо использовать вентильные свойства ГМР преобразователя. Для этого датчик возбуждают переменным напряжением синусоидальной формы, а величину магнитного поля (H_0) измеряют на удвоенной частоте возбуждения ($2f_B$) или выделяют постоянную составляющую в цепи, содержащей преобразователь. В этом случае относительная погрешность измерения H_0 равна относительному изменению температуры преобразователя.

Величина напряжения постоянной составляющей определяется выражением^{3,4/}:

$$V_0 = A \cdot H_0 V_B^2$$

где A - коэффициент, характеризующий чувствительность датчика; V_B - амплитудное значение напряжения возбуждения.

Для уменьшения влияния величины V_B на показания датчика возбуждение измерительного моста осуществляется генератором стабильной амплитуды /ГСА/, относительная нестабильность величины выходного напряжения которого не превышает $10^{-4} \dots 10^{-5}$.

Возбуждая ГМР преобразователь переменным напряжением, удается осуществить хорошую развязку по постоянному току мостовой схемы от ГСА, что приводит к дополнительному увеличению чувствительности датчика. Кроме того, высокостабильное напряжение практически полностью приложено к преобразователю

/т.к. $\frac{1}{\omega_B C_0} \ll R_{\text{ГМР}} /$, что снижает требование к величине

выходного напряжения ГСА. Используя дополнительные реактивные элементы в мостовой схеме, удается значительно /не менее 60 дБ/ ослабить напряжение возбуждения в измерительной диагонали моста. Необходимое согласование высокоомного измерительного моста, работающего в режиме холостого хода с последующими цепями схемы достигается с помощью операционного усилителя /ОУ/ МАА-501. Неинвертирующий вход ОУ с 50% отрицательной обратной связью /ООС/ обеспечивает высокое входное сопротивление $/R_{\text{вх. ОУ}} \approx 5 \text{ МОм}/$.

Для уменьшения напряжения ошибки на выходе ОУ, которое зависит от величин внешних сопротивлений^{9/},

на неинвертирующий вход ОУ последовательно с ГМР преобразователем включен высокостабильный и высокоомный резистор $R = 1 \text{ МОм}$ /рис. 2/. При выполнении условия $R \gg R_{\text{ГМР}}$ температурные изменения абсолютной величины сопротивления ГМР преобразователя незначительно сказываются на выходном напряжении ОУ.

Для ослабления наводки от ГСА и источников, работающих на частоте 50 Гц , в измерительном канале используется узкополосный ФНЧ, реализующий структуру Рауха /ФНЧ третьего порядка/^{10/}. Частота среза ФНЧ $f_0 = 10 \text{ Гц}$, неравномерность частотной характеристики - не более 1 дБ , наклон характеристики - 20 дБ/октаву . Использование десяти ФНЧ /по числу каналов магнитометра/, включенных до коммутатора аналоговых сигналов, позволяет повысить скорость опроса каналов, т.к. в этом случае снимается вопрос о переходных процессах, которые возникают на выходе ФНЧ при коммутации сигналов на его входе^{14/}. Скорость опроса каналов магнитометра приобретает большое значение при работе прибора на линии с ЭВМ.

Всего в измерительном тракте одного канала задействовано три операционных усилителя, работающих с глубокой ООС, что позволило уменьшить дрейф выходного напряжения магнитометра. Установка нулевого уровня осуществляется с помощью регулировки напряжения на неинвертирующем входе операционного усилителя ФНЧ.

Регулируемые делители напряжения подключены к двум образцовым источникам опорного напряжения с пониженным выходным сопротивлением^{12/}. Выходное напряжение ИОН составляет $\pm 2,178 \text{ В}$. В качестве первичного источника напряжения в ИОН используется стабилитрон типа Д818Е. Временной дрейф за 8 ч работы при токе нагрузки 18 мА и температуре $t = 22^\circ \text{С}$ не превышает $0,5 \text{ мВ}$. Общая временная нестабильность нулевого уровня измерительного тракта магнитометра составляет 50 мкВ в течение 8 ч непрерывной работы при температуре $t = 20 \div 25^\circ \text{С}$.

ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ ГМР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Как отмечалось ранее, ГМР преобразователь имеет большой температурный коэффициент сопротивления /ТКС/. Для уменьшения погрешности измерения магнитного поля, вызванной изменением температуры окружающей среды, в магнитометре осуществлено термостатирование датчика. Температура ГМР преобразователя $t = 35^\circ \text{С}$ поддерживается с точностью $\pm 0,05^\circ \text{С}$, при изменении температуры окружающей среды от $+15$ до $+33^\circ \text{С}$. Это достигнуто с помощью системы автоматического не-реверсивного регулирования^{12/}, состоящей из термочувствительного элемента, усилительно-преобразующего устройства, регулирующего и нагревательного элементов, капсулы с теплоизоляционным корпусом /термостата/. В отличие от широко известных конструкций термостатов, в которых для снятия температурных градиентов используются детали повышенной теплопроводности /медь, латунь, бронза/, термостат магнитометра не имеет металлического корпуса. Это приводит к уменьшению его габаритов, веса и, что особенно важно, возможности использования в переменных магнитных полях. Возникающий при этом температурный градиент внутри термостата не приводит к погрешности термостатирования датчика, так как сигнал ошибки для системы авторегулирования снимается с диагонали рабочего измерительного моста, состоящего из прецизионного резистора и ГМР преобразователя. Переменное напряжение в диагонали измерительного моста на частоте возбуждения ($f_{\text{В}}$) зависит только от разбаланса среднего значения сопротивлений моста, то есть температуры датчика и не зависит от величины измеряемого магнитного поля.

Таким образом, использование одного измерительного моста для измерения магнитного поля и температуры датчика стало возможным благодаря использованию вентильных свойств ГМР элемента.

Усилительно-преобразующее устройство термостабилизирующей системы состоит из следующих узлов /рис. 1 и 2/:

а/ избирательного усилителя / $f = 300 \text{ Гц}$ $\Delta f_{0,5} = 10 \text{ Гц}$, $k = 600/;$

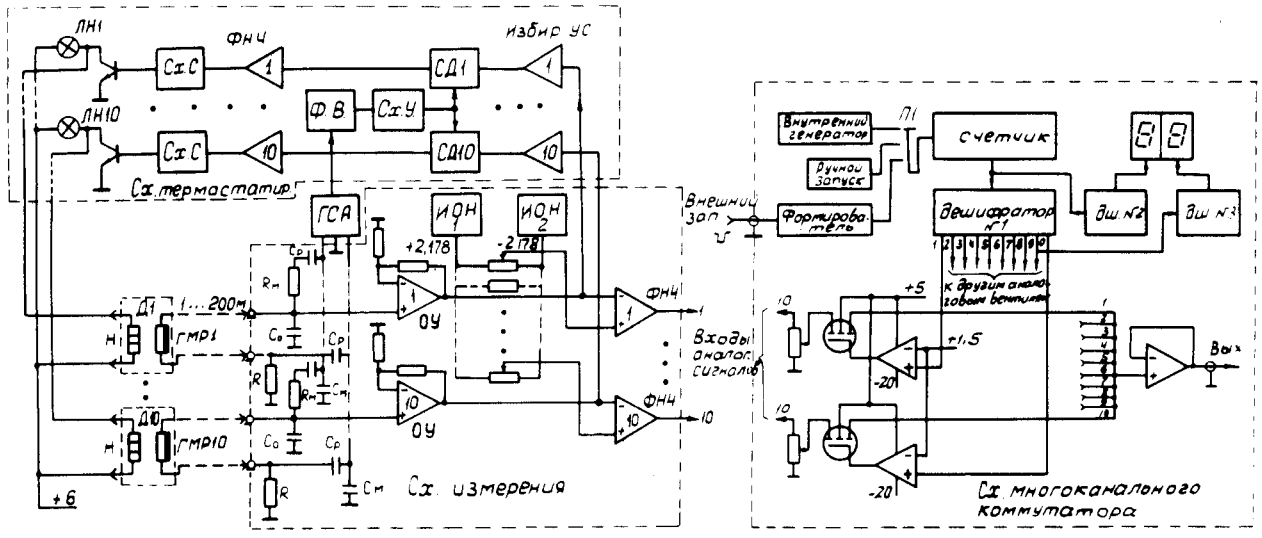


Рис. 1. Блок-схема измерительного тракта и коммутатора.

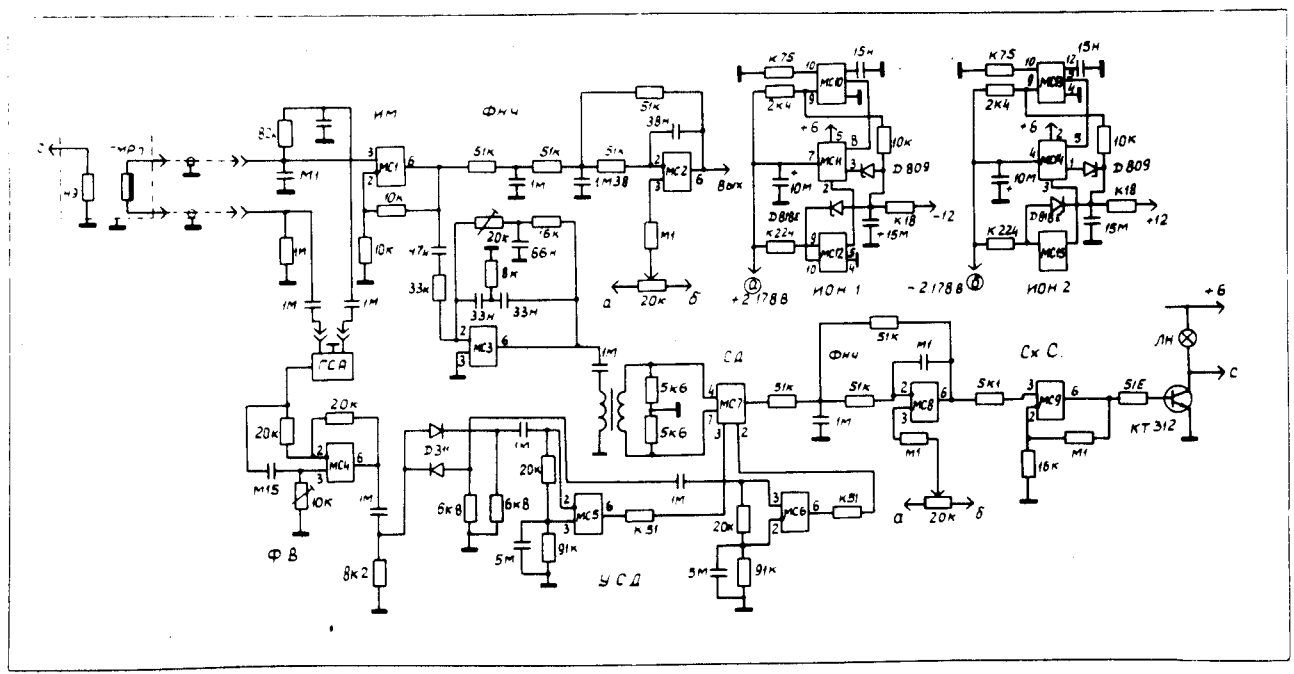


Рис. 2. Принципиальная схема измерительного тракта и термостабилизации датчика. MC1...MC6, MC8, MC9 - операционные усилители МАА-501; MC7 - аналоговый ключ К1КТ902; MC10, MC12, MC13, MC15 - операционные усилители К1УТ401Б; MC11 и MC14 - транзисторные сборки К1КТ011А и КТ118Б.

- б/ двухтактного синхронного детектора /СД/;
- в/ схемы управления синхронным детектором /Сх.У/;
- г/ фазовращателя /ФВ/;
- д/ фильтра нижних частот /ФНЧ/ с частотой среза 1 Гц.

Регулирующим элементом системы является схема сравнения /Сх.С/, работающая в режиме статического регулятора температуры, а нагревательным элементом /НЭ/ - резистор МЛТ-О,125 - 110 Ом. Для уменьшения периода колебаний температуры нагреватель максимально приближен к ГМР преобразователю и смонтирован вместе с ним на одной металлической подложке.

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛОГОВЫЙ КОММУТАТОР /МАК/

Для опроса датчиков в магнитометре используется десятиканальный аналоговый коммутатор. МАК должен обладать высокой точностью, надежностью и минимальным влиянием параллельных неопрашиваемых каналов. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет аналоговый коммутатор на полевых транзисторах с МОП-структурой¹³. В качестве элементов управления ключами используются операционные усилители¹⁴. Последние позволяют упростить схему управления и обеспечить согласование сигналов управления по уровням и полярности. На рис. 3 приведена схема МАК. Транзисторы с МОП-структурой, для построения бесконтактных ключей, выпускаются в виде интегральных сборок - 1КТ901, 1КТ902, реализованных по твердотельной технологии.

Интегральная микросхема 1КТ902, кроме четырех транзисторов, содержит также "охранные" диоды, работающие в режиме восстанавливаемого пробоя. Они предохраняют транзисторы от выхода из строя, вследствие появления недопустимо большого напряжения затвор-подложка. Остаточное напряжение открытого ключа на МОП-транзисторе практически равно нулю. Это позволяет коммутировать с малыми погрешностями напряжения порядка нескольких милливольт. Погрешности переключателя

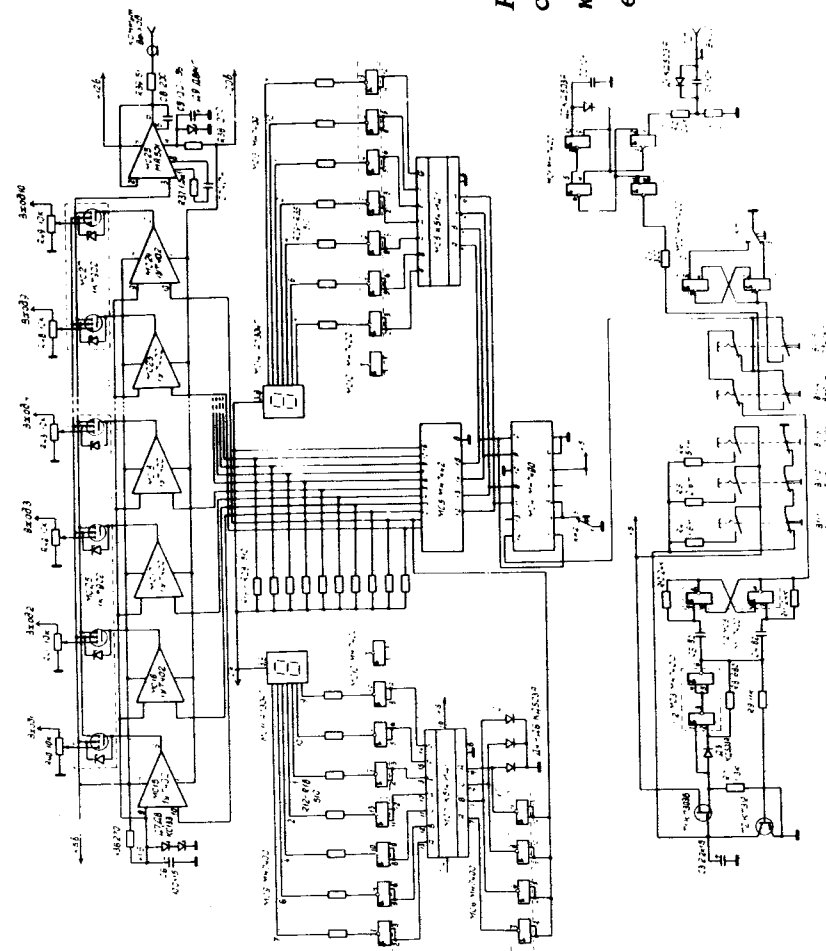


Рис. 3. Принципиальная схема многоканального коммутатора и цифровой индикации.

обусловлены сопротивлением открытого ключа $\sim 50 \text{ Ом}$, наводками из цепи управления в сигнальную цепь через емкость затвор-канал /несколько пикофард/, а также конечным сопротивлением закрытого ключа. Сопротивление между стоком и истоком закрытого МОП-транзистора обычно составляет несколько сотен мегаом.

Для схемы МАК на одном типе транзисторов с МОП-структурой статическую погрешность коэффициента передачи можно определить по формуле ¹³.

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{i \text{ ВХ}} \frac{y}{y_{\Sigma}} + U_{\rho} (n-1) \frac{y_{\rho}}{y_{\Sigma}} + \frac{(n-1)i_{\rho}}{y_{\Sigma}} + e_i \frac{y_{y1}}{y_{\Sigma}}$$

где: $U_{i \text{ ВХ}}$ - входное напряжение на i -м входе коммутатора /включенное состояние канала/,

U_{ρ} - напряжение на ρ -м отключенном входе коммутатора,

y - проводимость замкнутого ключа,

y_{ρ} - проводимость разомкнутого ключа,

i_{ρ} - суммарный ток утечки разомкнутого ключа на подложку и затвор.

$$i_{\rho} = i_{\text{ОН}} + i_{\text{Д}}$$

$i_{\text{Д}}$ - ток утечки через охранный диод,

e_i - напряжение управления замкнутым ключом,

y_{y1} - проводимость цепи управления замкнутого ключа,

$$y_{\Sigma} = y + \sum_{\rho=1}^{n-1} y_{\rho} + y_{\text{II}} \quad \text{т.к.}$$

$$(y_{\text{II}} + \sum_{\rho=1}^{n-1} y_{\rho}) \ll y, \text{ то } y_{\Sigma} \approx y.$$

y_{II} - проводимость нагрузки.

Для интегральных ключей К1КТ902 имеем следующие параметры:

$$y = 2 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Ом}, y_{\rho} = 10^{-9} \text{ 1/Ом}, y_{y1} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ 1/Ом}$$

$$i = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ А.}$$

Напряжение управления ключами $e_i = 20 \text{ В}$, проводимость нагрузки $y_{\text{II}} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Ом}$. Расчет показывает, что статическая погрешность коэффициента передачи составляет величину $\sim 10^{-5}$ / и практически ею можно пренебречь.

Коммутатор состоит из внутреннего генератора тактовых импульсов и распределителя импульсов, выходы которого через согласующие устройства подключены непосредственно к ключам. В устройстве предусмотрено несколько режимов работы: а/ от внутреннего генератора с периодом $T = 3, 5, 10 \text{ с}$; б/ от внешнего генератора импульсов; в/ однократный ручной запуск коммутатора от кнопки КН1 "Запуск".

Коммутатор имеет 10 рабочих каналов и коммутирует аналоговые сигналы положительной и отрицательной полярности. Номер рабочего канала индицируется цифровым индикатором на лицевой панели прибора.

Устройство работает следующим образом. Кнопкой КН2 "Сброс" пересчетная декада /МС4/ устанавливается в состояние "0". При этом цифровые индикаторы /МС11, 14/ высвечивают номер канала - цифру 10. При подаче на управляющий вход счетной декады одного сигнального импульса индицируется номер канала 01 и т.д. Это обеспечивается соответствующим подключением дешифратора /МС7,8/ к выходам А, В, С, D счетчика.

Совокупность логических уровней, необходимых для высвечивания цифр "1" или "0" знаковым индикатором /МС11/, формируется дешифратором /МС7/, инверторами /МС10/ и диодами /Д4-Д6/. Выходы преобразователя двоично-десятичного кода в десятичный /МС5/ через резисторы /Р19-28/ подключены на уровень +5 В. Таким образом обеспечивается состояние логической "1" на остальных уровнях дешифратора, кроме первого, у которого на выходе находится уровень сигнала "0". Выходы дешифратора /МС5/ подключены к неинвертирующим входам операционных усилителей /ОУ/ - компараторов /МС 15-24/. На инвертирующие входы всех ОУ подается опорный потенциал +1,5 В. При поступлении на вход первого компаратора сигнала "0" на выходе компараторов появляется сигнал управления $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{КОМ}} = -19 \text{ В}$, так как

$U_{ВХ}^- = +1,5 В$ и $U_{ВХ}^+ < U_{ВХ}^-$. Выходы компараторов соединены с затворами ключей.

При испытаниях ОУ К1УТ401Б в качестве компараторов в схеме потребовался предварительный отбор ОУ, т.к. они не всегда обеспечивали на выходе необходимые уровни сигнала управления. Лучшие результаты были получены с ОУ К1УТ402А.

При напряжении 19 В на затворе ключ открывается и пропускает сигнал с датчика, подключенного на его вход. Таким образом, при подаче на вход счетной декады сигнального импульса включается 1 канал коммутатора. На входе "+" других компараторов напряжение +4,5 В, что соответствует сигналу "1" на остальных входах дешифратора. При поступлении на вход счетной декады следующего сигнального импульса нулевой потенциал подается на вход второго компаратора и замыкается второй ключ. Индикаторы высвечивают номер канала - О2 и т.д.

Передающая характеристика ключа приведена на рис. 4, где 1 - "паспортный" режим работы ключа

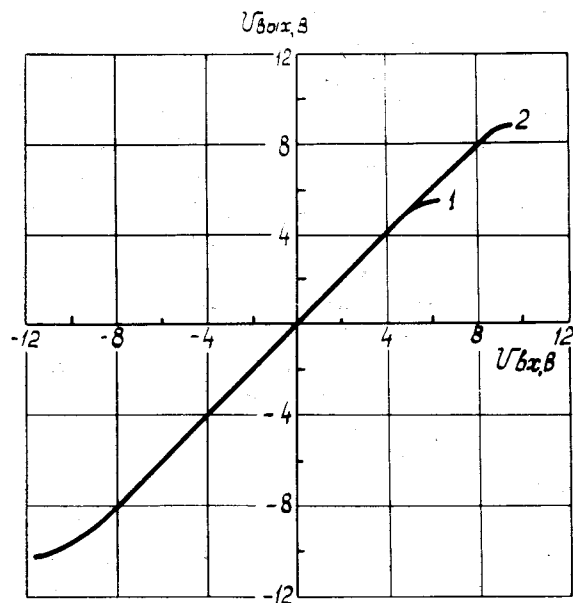


Рис. 4. Передаточная характеристика ключа.

/на подложку подано +5 В/; 2 - режим работы ключа с отключенной подложкой.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАК

1. Число опрашиваемых каналов	10
2. Коэффициент передачи ключа	1
3. Задержка управляющего сигнала в распределителе	50 нс
4. Задержка управляющего сигнала в схеме управления ключами /ОУ/	/650-700/ нс
5. Время переключения ОУ	/50 - 60/ нс
6. Быстродействие аналогового ключа	/150-200/ нс
7. Индикация опрашиваемого канала выполнена на светодиодных матрицах типа АЛ304Г	

Описываемое устройство смонтировано в двух блоках шириной 68,7 мм механического стандарта КАМАК.

В заключение авторы благодарят А.А.Анашина и В.Н.Кузнецова за монтаж и настройку блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Madelung O., Teword L., Welker H. Zs.Naturforsch t. 10, 476, 1955.
2. Пикус Г.Е. ЖТФ, 1956, 26, 22, 36.
3. Жузе В.П., Пикус Г.Е., Сорокин О.В. ЖТФ, 1957, 27, 1167.
4. Пикус Г.Е., Сорокин О.В. ЖТФ, 1957, 27, 2647.
5. Левитас И.С., Пожела Ю.К. Лит.физ.сб., 1967, 2, VII.
6. Левитас И.С., Пожела Ю.К., Сащук А.П. Лит.физ.сб. 1971, XI, 4, 631.
7. Левитас И.С., Пожела Ю.К., Сащук А.П. Лит.физ.сб. 1972, XII, 5, 825.
8. Вайсс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение. Перевод с немецкого. "Энергия", 1974.

9. Шило В.Л. *Линейные интегральные схемы*. "Сов.радио", 1974.
10. Марше Ж. *Операционные усилители и их применение*. Пер. с франц., "Энергия", Л., 1974.
11. Прянишников В.А. *Интегрирующие цифровые вольтметры постоянного тока*. "Энергия", Л., 1976.
12. Венгеровский Л.В., Вайнштейн А.Х. *Системы термостатирования в радиоэлектронике*. "Энергия", Л., 1967.
13. *Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации*. Под редакцией В.Б.Смолова, "Энергия", Л., 1976.
14. Демиденко В.В. *ПТЭ*, 1975, №3, 105.
15. Воеводин М.А. *ОИЯИ*, 13-10822, Дубна, 1977.
16. Воеводин М.А. и др. *ОИЯИ*, 13-10761, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 августа 1977 года.