

3014

Экз. чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р9 - 3014



В.М. Лачинов

ЯМР ДИСКРИМИНАТОР МАГНИТНОГО ПОЛЯ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ МАГНИТОМЕТРА

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1966

Р9 - 3014

В.М. Лачинов

**ЯМР ДИСКРИМИНАТОР МАГНИТНОГО ПОЛЯ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ МАГНИТОМЕТРА**

В литературе ^{/1-4/} описаны различные дискриминаторы магнитного поля по сигналам ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и их применение для привязки магнитометров к измеряемым полям посредством соответствующей подстройки частоты автодинных детекторов. По сравнению с визуальной дискриминацией сигналов ЯМР по осциллографу с ручной подстройкой метод автоматического слежения за полем значительно ускоряет и упрощает процесс измерения поля, повышает точность измерения.

В указанных выше работах используются известные ЯМР дискриминаторы, в которых применяются фазочувствительные детекторы. Периодическое воспроизведение сигналов ЯМР осуществляется модуляцией с частотой в диапазоне 50-1500 гц либо магнитного поля, либо частоты автодинного детектора. Амплитуда модуляции бывает больше ^{/1,2/} и меньше ^{/3,4/} ширины линии ЯМР. В обоих случаях при отклонении магнитного поля от резонансного значения сигнал ошибки на выходе дискриминаторов имеет почти линейно нарастающую зависимость от величины отклонения поля в узком диапазоне, равном приблизительно ширине линии ЯМР. Вне этого диапазона сигнал ошибки начинает быстро уменьшаться при малой амплитуде модуляции и медленно - при большой. В любом случае этот спад приводит к выталкиванию системы из режима привязки, если она оказалась по каким-либо причинам в этой области. В результате нужна новая ручная установка поля или частоты автодина в узкий диапазон, соответствующий ширине линии ЯМР. К тому же ширина линии ЯМР, которая в основном определяется неуправляемой неоднородностью магнитного поля, сильно изменяется, что может ухудшить работу системы привязки.

Фазовые детекторы имеют чувствительность к нестабильности фазы сигнала. Поэтому требуются специальные меры для снижения возможных по разным причинам изменений фазы сигналов ЯМР в тракте их следования.

В последнее время в связи с появлением варикапов все более часто применяется частотная модуляция автодинного детектора. Однако при этом в тракт сигнала ЯМР попадает большой дополнительный сигнал с частотой модуляции. При амплитуде модуляции меньше ширины линии ЯМР через предшествующий фазовому детектору тракт необходимо пропускать сигнал с частотой модуляции. Следовательно, в этом случае придется создавать устройства для компенсации этого дополнительного сигнала, чтобы фазовый детектор правильно работал.

Ниже рассматривается дискриминатор магнитного поля, использующий иной принцип действия. По своим характеристикам дискриминатор может быть с успехом применен в системе привязки ЯМР магнитометра к измеряемому полю. Область захвата сигналов ЯМР дискриминатором равна почти двойной амплитуде модуляции, которая может варьироваться от 3-4 до десятков единиц ширины линии ЯМР. Это свойство дискриминатора позволяет автоматизировать поиск сигналов ЯМР, устраняет необходимость новой подстройки сигнала при сбое в системе от внешних причин. Кроме того, дискриминатор отличается нечувствительностью к изменениям фазы сигналов и ширины линии ЯМР, малым дрейфом его выходного сигнала ошибки и допускает полное подавление сигнала с частотой модуляции в тракте усиления.

ЯМР дискриминатор магнитного поля

Принцип работы дискриминатора /5/ состоит в следующем. Условие ЯМР выполняется при соответствии частоты автодина детектора и магнитного поля, в котором находится контурная катушка автодина с протонсодержащим веществом, т.е.:

$$f = \gamma H_0 \quad (1)$$

где f — частота автодина в Мгц,

H_0 — магнитное поле в а/м,

$\gamma = 0,535056 \cdot 10^{-4}$ — коэффициент, пропорциональный гиромагнитному отношению

протона.

Если магнитное поле модулируется с частотой f_M и амплитудой H_M , то из рис. 1,а,в. видно, что сигнал ЯМР возникнет с частотой $2f_M$. Отклонение магнитного поля от H_0 на $\pm \Delta H$ вызывает смещение сигналов ЯМР по фазе (рис. 1,б,г). Используя эти сигналы для запуска обычного триггера (рис. 2), на выходе последнего получим прямоугольные импульсы со скважностью, которая зависит от величины магнитного поля (рис. 1,б-е, в-ж, г-з). Скважность прямоугольных импульсов с постоянной амплитудой легко детектируется. В зависимости от знака отклонения поля ΔH на выходе дискриминатора получается сигнал ошибки ΔU соответствующей полярности. Крутизна зависимости ΔU от ΔH определяется величиной H_M . Чтобы сделать эту зависимость однозначной, так как появление одного паразитного импульса меняет знак этой связи, триггер синхронизируется специальными импульсами (рис. 1,д). Импульсы синхронизации с чередующейся полярностью получают из модуляционного сигнала и фазируются с импульсами ЯМР, как показано на рис. 1. Эти импульсы могут запускать триггер только в отсутствие сигналов ЯМР (рис. 1,и), а при наличии их исправляют срабатывания триггера от паразитных импульсов, устанавливая нужный знак зависимости ΔU от ΔH (рис. 1,к,л). Изменение фазы импульсов синхронизации в относительно широком диапазоне не сказывается на работе устройства.

Триггер дискриминатора (рис. 2) состоит из двух транзисторов, T_1 и T_2 , с обычными перекрестными обратными связями. В состоянии проводимости транзисторы насыщаются, что обеспечивает стабильные амплитуды импульсов на коллекторах, которые равны $\approx E_1$. Детектор скважности состоит из двух выпрямительно-интегрирующих цепей, через емкости связанных с коллекторами триггера. Разница выходных напряжений этих цепей дает сигнал ошибки $\pm \Delta U$. Диоды D_1 и D_2 восстанавливают постоянную составляющую напряжения на переходных конденсаторах C_1, C_3 .

Приближая постоянные времени $R_1 C_1$ и $R_2 C_2$ достаточно большими и обозначая через α (рис. 1,а) отклонение длительности импульса от половины периода $T/2 = \pi$, можно получить для оптимального случая, $R_2 = 2R_1$, выражение

$$\Delta U = \frac{E_1 \alpha}{T} = \frac{E_1 \alpha}{2\pi} \quad (2)$$

Для малых ΔH имеем из рис. 1,а

$$\alpha = \frac{\Delta H \cdot 2}{H_M} \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в (2), получим зависимость сигнала ошибки от входных параметров дискриминатора:

$$\Delta U = \frac{E_1 \cdot \Delta H}{\pi \cdot H_M} \quad (4)$$

Например, при $E_1 = 15$ в, $\Delta H = 80$ а/м (≈ 1 эрстед), $H_M = 400$ а/м сигнал ошибки $\Delta U = 1$ в. Дискриминатор на выходе имеет сравнительно небольшой временной дрейф (± 1 мв за 8 час), так как работа устройства происходит на переменном токе, структура его балансная, а выходное напряжение достаточно велико.

Схема привязки ЯМР магнитометра к измеряемому полю

Рассмотренный выше дискриминатор магнитного поля был использован для привязки ЯМР магнитометра к измеряемому полю. Применяемые в магнитометре, схемы автономного детектора с устройством стабилизации уровня генерации и усилителя низкой частоты с контрольным осциллографом могут быть подобны описанным в работе /8/.

Структурная и принципиальная схемы автономного блока привязки показаны на рис. 3 и 4.

В магнитометре применена модуляция магнитного поля с частотой 50 гц и регулируемой амплитудой. Поступающие на вход схемы привязки сигналы ЯМР представляют собой производные линии поглощения ЯМР (рис. 5), так как в предшествующем усилителе имеется дифференцирующая цепь, уменьшающая низкочастотные наводки и шумы.

Устройство автоограничения шума (T_{11} , $D_{14,16}$) предварительно формирует сигналы ЯМР (рис. 5). Половина сигнала положительной полярности выпрямляется диодами D_{14}, D_{15} . В точке А получается выпрямленное напряжение, пропорциональное амплитуде сигналов ЯМР. Это напряжение смещает диод D_{16} и тем самым отсекает от полуволны отрицательной полярности ту часть сигнала вместе с шумами, амплитуда которых меньше напряжения в точке А. На выход автоограничителя проходят только вершины импульсов ЯМР, причем их амплитуда меняется в меньшей степени, чем амплитуда входных сигналов. Последняя обычно превышает $5 \div 10$ в, а минимальное отношение сигнала к шуму для нормальной работы системы должно быть больше $2 \div 3$.

Дальнейшее формирование сигналов ЯМР происходит с помощью триггера Шмитта и дифференцирующей цепи. Запуск триггера дискриминатора осуществляется каждым импульсом положительной полярности, который соответствует заднему фронту сигнала ЯМР, т.е. средней части линии ЯМР. Это условие ограничивает изменение фазы импульсов на коллекторах триггера дискриминатора при изменении амплитуды модуляции.

В тракте синхронизации напряжение модуляции после фазовращателя формируется с помощью ограничивающих диодов (D_1, D_2) и триггера Шмитта (T_1, T_3) в импульсы прямоугольной формы с половинной скважностью, которые затем дифференцируются. Импульсы положительной полярности через диод D_3 подаются в коллекторную цепь T_4 , а импульсы другой полярности после инвертирования (T_6) через диод D_8 в коллекторную цепь T_5 . Фаза импульсов синхронизации задается такой, чтобы они находились на середине между импульсами ЯМР.

Амплитуда прямоугольных импульсов, поступающих в детектор скважности из триггера, равна ≈ 16 в. При половинной скважности этих импульсов напряжение на выходе обоих плеч детектора равно ≈ 8 в с пульсацией 50 гц пилообразной формы. Постоянная времени детектора $\approx 0,2$ сек. Снижение пульсаций до весьма малых величин производится двойным Т-образным фильтром для 50 гц гармоника и RC-фильтром в основном для следующей 3-ей гармоники, имеющихся в спектре пульсаций. Такая конструкция фильтра вносит минимальную постоянную времени в тракт сигнала ошибки.

Выходы фильтров подключены к базам T_7, T_8 дифференциального усилителя постоянного тока (УПТ). Усилитель реагирует лишь на разницу входных напряжений, т.е. на сигнал-ошибку. Для улучшения работы УПТ в цепи эмиттеров поставлен стабилизатор тока T_9 с диодной термкомпенсацией D_{13} . Коэффициент усиления УПТ равен ≈ 40 , а временной дрейф выходного напряжения в течение 8 часов был менее $\pm 0,15$ в. Выходное напряжение УПТ, соответствующее нулевому сигналу ошибки, равно ≈ 15 в. Для индикации сигнала ошибки применен прибор М (тип М132,5 мка) с нулем на середине шкалы.

С помощью диодной схемы (D_{11}, D_{12}) чувствительность прибора сделана неравномерной. В области нуля она составляет величину ≈ 1 см/в и позволяет выставлять 0 с точностью лучше 10 мв. На краях чувствительность значительно ниже и можно индифферентировать напряжения 0 и -50 в, соответствующие границам динамического диапазона УПТ, на крайних отметках шкалы прибора.

Выходное напряжение УПТ подается на варикап и производит необходимую подстройку частоты автодиодного детектора. Для указанного динамического диапазона УПТ пересчитанное в контур изменение емкости варикапа достигает ≈ 8 пф.

Между выходом УПТ и варикапом имеется устройство для плавной ручной подстройки сигнала ошибки к нулю в диапазоне $+ 3,7$ в. Подстройка осуществляется двоеконтурным потенциометром R_1 , ручка управления которым расположена на передней панели блока (рис. 8). Питаящая это устройство батарея подсоединяется одновременно с включением стабилизированных выпрямителей, которые располагаются в том же блоке. Последние обеспечивают необходимые для системы напряжения питания с малыми пульсациями (менее 1мв) и высокими коэффициентами стабилизации (до 500).

Устойчивость, точность и проверка системы привязки

В отношении устойчивости системы авторегулирования особых трудностей не возникает. Однако для повышения быстродействия и качества регулирования приняты специальные меры. Общая постоянная времени системы ($\approx 0,25$ сек) практически сведена до минимума. В УПТ между эмиттерами транзисторов включена дифференцирующая RC-цепь, а на выходе — корректирующая RC-цепь. Эти меры обеспечили относительно хорошие динамические качества системы. Принципиально быстродействие системы легко поднять, увеличив более чем на порядок частоту модуляции, что полезно и для улучшения отношения сигналов ЯМР к шуму.

Выражение для коэффициента усиления системы с разорванной петлей обратной связи достаточно громоздко. Его значение сильно меняется как от поддиапазона автодина, в который попадает измеряемое магнитное поле, так и от положения поля в этом поддиапазоне. По линеаризованному выражению была проведена оценка коэффициента усиления для магнитного поля ≈ 560 ка/м при полностью введенной емкости в автодиодном детекторе ($f = 30$ Мгц) и амплитуде модуляции ≈ 800 а/м. В этом случае усиление достигает ≈ 100 , что при экспериментальной проверке подтвердилось (изменение поля на $+80$ а/м приводит к $+10$ в сигналу ошибки на выходе УПТ). Считая, что нестабильность в основном определяется дрейфом в тракте сигнала ошибки, имеем точность привязки частоты автодина к измеряемому полю лучше $3 \cdot 10^{-6}$.

Нужно отметить, что точность дискриминаторов магнитного поля с амплитудой модуляции больше ширины линии ЯМР, в том числе и рассмотренного выше, зависит

от формы сигнала модуляции. Наличие в нем второй гармоники, что визуально проявляется в притушении одной из полуволи сигнала, приводит к погрешности в определении величины измеряемого поля. Для обеспечения точности измерения лучше 10^{-5} необходимо снижать содержание второй гармоники до $0,5 \pm 1\%$.

Проверка рассмотренной выше системы привязки ЯМР магнитометра к полю проводилась с помощью цифрового частотомера и установки^{/8/} и показала, что точность непрерывного измерения магнитного поля в течение более 4 часов была лучше 10^{-5} . Существенно упростился поиск сигнала, а по индикатору нуля быстрее и более объективно, чем при визуальной индикации по осциллографу, устанавливается частота автодина, точно соответствующая условию ЯМР. Привязка к полю сохраняется (ΔU максимально) при отклонении магнитного поля от резонансной величины на $\pm 5\%$ значения минимального поля в данном поддиапазоне магнитометра. Область захвата привязки определяется амплитудой модуляции и может сильно меняться.

Автоматизация подстройки нуля и поиска сигналов ЯМР

Рассмотренная выше система привязки магнитометра к измеряемому полю является статической. Устранение статизма данной системы осуществляется ручной установкой сигнала ошибки в нуль либо напряжением на варикапе, либо переменной емкостью в контуре автодина. Добавление в систему привязки второй, более инерционной петли обратной связи (рис. 3, пунктир), включающей мотор в качестве интегрирующего элемента, делает систему астатической.

На рис. 6 представлена принципиальная схема автоподстройки нуля. В схеме используется мотор типа ДГ-3Т, с тахогенератором переменного тока, рассчитанный на питание от сети 400 гп. Выходной сигнал ошибки с УПТ преобразуется 400 гп модулятором^{/7/} на транзисторах (T_1, T_2) в переменное напряжение, фаза которого изменяется на 180° при перемене полярности входного сигнала. Усилитель переменного тока ($T_{4 \div 7}, T_{11 \div 14}$) обеспечивает нужную амплитуду и мощность для питания управляющей обмотки (2) мотора. Усилитель и мотор охвачены отрицательной обратной связью которая подается с выходной обмотки (3) тахогенератора в коллекторную цепь входного каскада усилителя (T_8). Обратная связь укорачивает длительность переходных процессов, стабилизирует работу устройства.

Питание обмотки возбуждения (1) мотора и модулятора осуществляется с помощью задающего RC-генератора (T_3) и соответствующего усилителя мощности ($T_{8 \div 10}, T_{15 \div 18}$). Нагрузкой мотора является 10-витковый потенциометр П типа LP1510, включенный через редуктор (200:1). Напряжение с подвижного контакта потенциометра П подается на отдельный варикап, который заменяет переменный подстроечный конденсатор в автодине. В этом случае привязка к полю является автоматической и непрерывной в одном из поддиапазонов магнитометра.

Чувствительность по выходу (≈ 1 мв) и быстродействие (доля сек.) схемы подстройки нуля для описанной системы привязки имеют по величине некоторый запас. Между выходом системы привязки и входом схемы подстройки нуля ставится эмиттерный повторитель, диодный ограничитель и RC-фильтр. Повышение частоты модуляции до ≈ 1 кГц значительно улучшит быстродействие системы привязки и ее динамическую точность. В этом случае схемы автоподстройки нуля и привязки по полю будут соответствовать друг другу по быстродействию.

Наличие дискриминатора с широким захватом магнитного поля и достаточно быстродействующей системы привязки позволяют автоматизировать поиск сигналов ЯМР. Частотную развертку по одному из диапазонов автодиагностики выполняет схема автоподстройки нуля с добавлением устройства (рис. 7), управляющего реверсом мотора при подходе движка потенциометра П к краям. Устройство состоит из триггера (T_1, T_2), который переключается с помощью T_3, D_1 и D_2 при достижении напряжения на выходе П-1в или -4в. С части коллекторного сопротивления транзистора T_2 снимается сигнал $+5$ в относительно потенциала -15 в. Через сопротивление R и нормально замкнутый контакт P_2 сигнал подается на вход схемы автоподстройки нуля. Длительность развертки частоты автодиагностики в обоих направлениях определяется величиной R и может регулироваться от ≈ 20 сек до нескольких минут.

Вторая схема (рис. 7) позволяет детектировать появление сигналов ЯМР и начало работы дискриминатора. Это фазовый детектор на диодах D_4, D_8 . Опорное напряжение на него поступает из коллекторной цепи T_3 (рис. 4) триггера Шмитта тракта синхронизации через фазоинвертор T_4 (рис. 7). Детектируемый сигнал берется с одного из коллекторов триггера дискриминатора. Он синфазен с опорным сигналом при отсутствии импульсов ЯМР (рис. 1, и) или сдвинут по фазе на 90° при появлении импульсов ЯМР (рис. 1, е, ж, з). На выходе фазового детектора получается сигнал $+1,5$ в или $-1,5$ в, который после усиления транзисторами T_6, T_9 управляет реле P_1 и P_2 . Таким образом, когда привязки магнитометра к полю нет, оказывается включенным режим поиска (схема автоподстройки нуля подсоединена к устройству развертки, амплитуда модуляции на ЯМР датчике увеличена для облегчения поиска). После появления сигналов ЯМР и начала работы системы привязки к полю срабатывают реле P_1 и P_2 , которые останавливают развертку, подключают схему автоподстройки нуля к выходу УПТ и уменьшают амплитуду модуляции. Две последние схемы проверены совместно с системой привязки и магнитометром. Время прохождения каждого поддиапазона (перекрытие по полю $\approx 1,5$) магнитометра при поисках сигнала ЯМР в полях вплоть до ≈ 1200 кА/м удалось сделать менее 20 сек. При этом поиск сигнала и установление привязки к полю были весьма четкими даже без специального увеличения амплитуды модуляции (≈ 400 а/м).

В заключение отметим, что рассмотренный выше способ дискриминации магнитного поля обладает такими свойствами, которые обеспечивают как высокую точность при дискриминации поля, так и возможность полной автоматизации работы магнитометра в каждом его поддиапазоне. В системах стабилизации магнитного поля можно также с успехом использовать данный дискриминатор.

Автор выражает свою благодарность П.П. Гавришу за монтаж и помощь в настройке приведенных в статье схем.

Л и т е р а т у р а

1. Н.И. Леонтьев. ЖЭТФ, 29, 75 (1955).
2. Я.А. Зильберштейн, В.И. Зяггерман. Труды институтов Госкомитета по стандартам, вып. 79 (139), 56 (1965).
3. А.Н. Maki, R.J. Volpicelli. Rev. Sci. Instrum., 36, N 3, 325 (1965).
4. H.R. Opliger, P. Schmid, Hs.H. Ganthard. J. Sci. Instrum., 42, N 12, 865 (1965).
5. В.М. Лачиков. Дипломный проект, МИФИ, 1963.
6. Л.В. Васильев и др. Преприят ОИЯИ, 2459, Дубна, 1965.
7. Н.С. Николаенко. Проектирование транзисторных усилителей измерительных устройств. Изд. "Энергия", 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 ноября 1966 г.

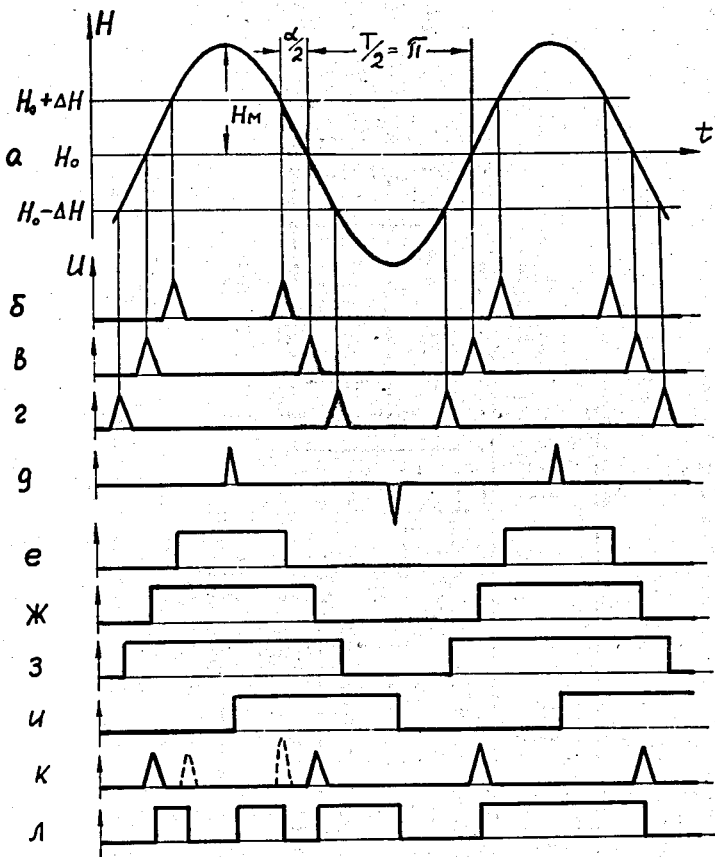


Рис. 1. Эпюры, поясняющие принцип действия дискриминатора магнитного поля.

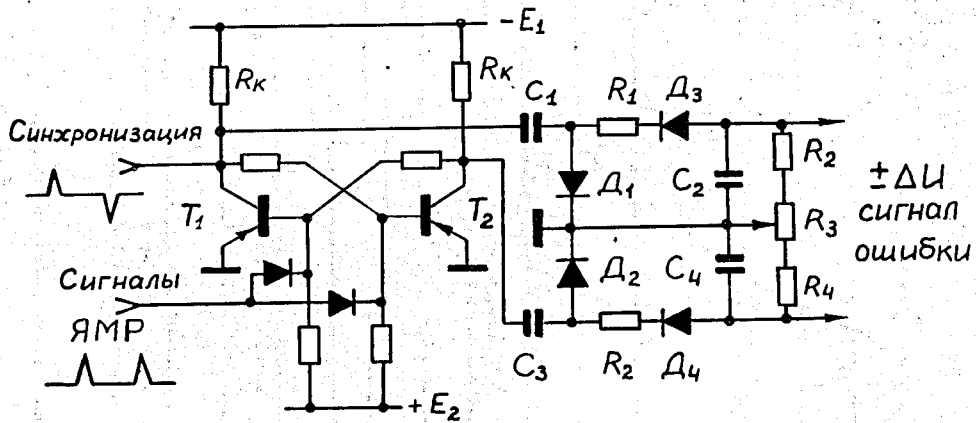


Рис. 2. Принципиальная схема дискриминатора магнитного поля.

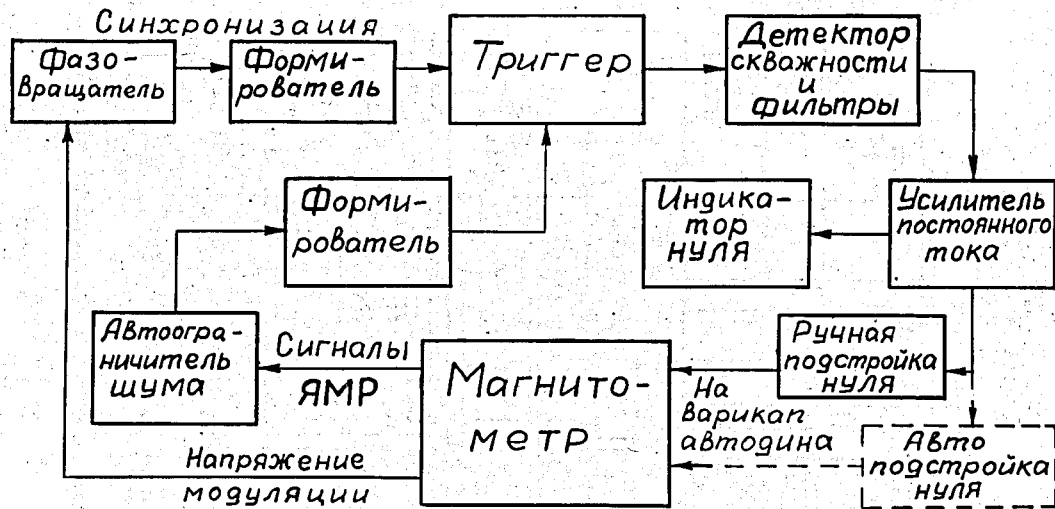


Рис. 3. Блок-схема системы привязки ЯМР магнитометра к измеряемому полю.

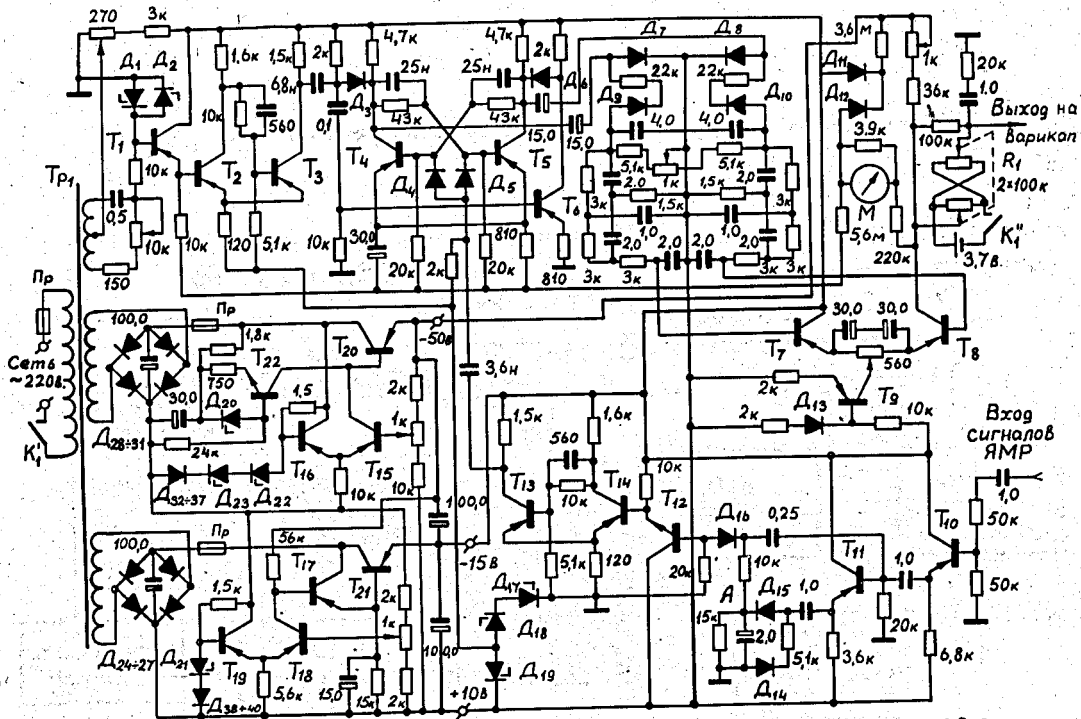


Рис. 4. Принципиальная схема блока привязки магнитометра к измеряемому полю.

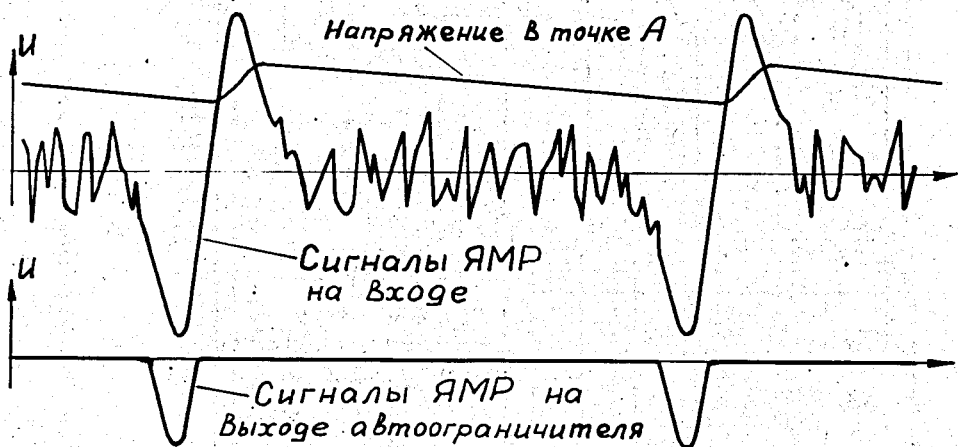
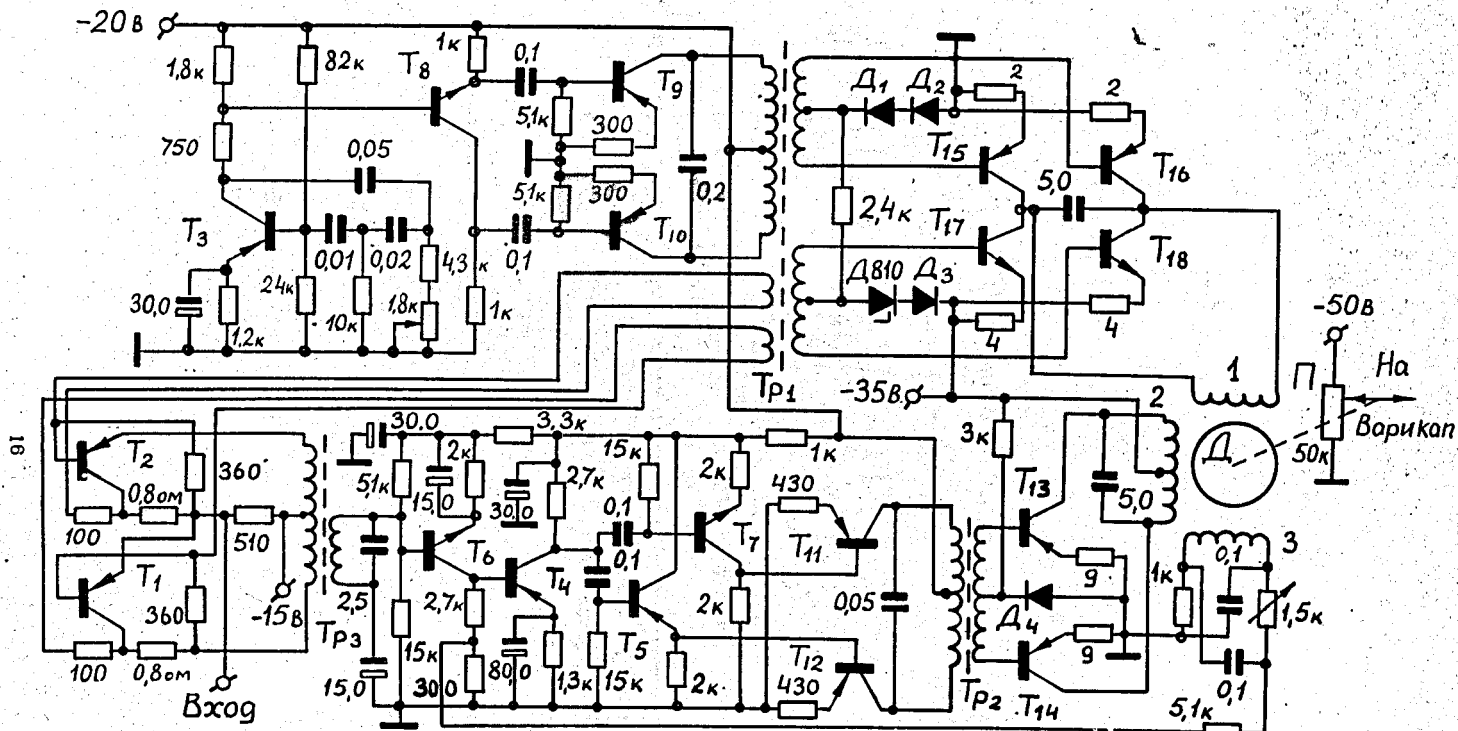


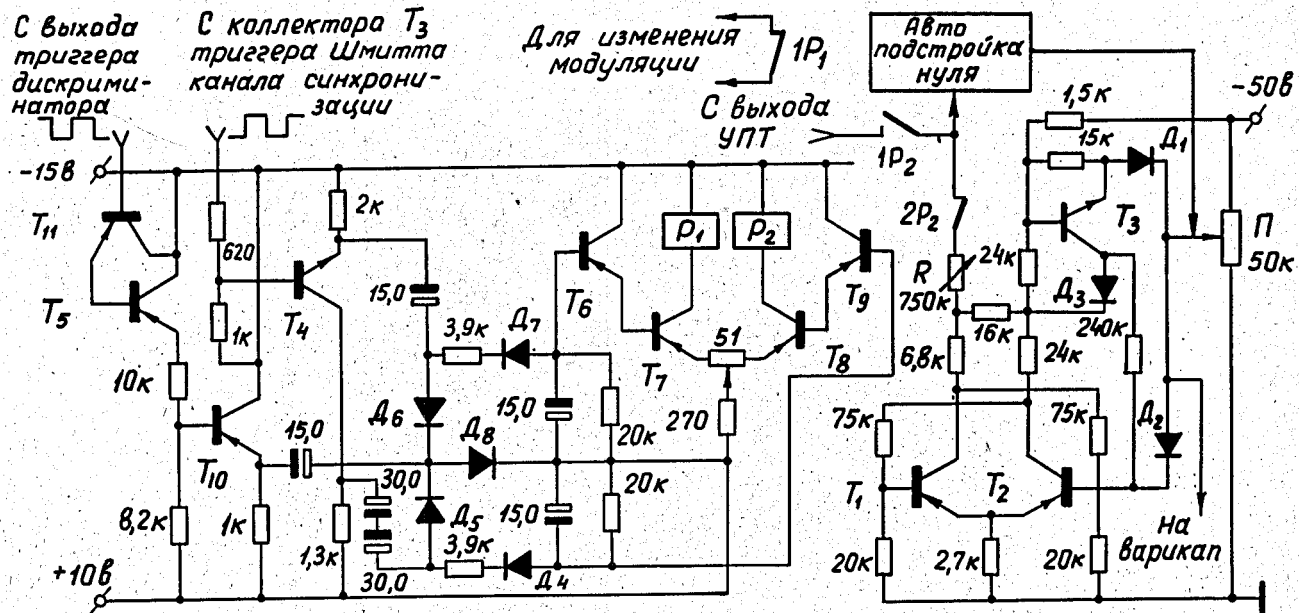
Рис. 5. Эпюры, поясняющие принцип действия автоограничителя шума.



D_{1-4} -Д310; D -ДГ-3Т; T_{1-5} -П15; T_{6-8} -П11; T_{9-12} -П26; T_{13-16} -П201; $T_{17,18}$ -П701А

П-10 вит. потенциометр LP 1510.

Рис. 6. Принципиальная схема автоподстройки нуля.



$T_{1,2,5} - 10 - \text{МП}21\text{Б}$; $T_{3,4} - \text{МП}10\text{Б}$; $T_{11} - \text{П}10\text{Б}$;

$D_{1+3} - \text{Д}104$; $D_{4+8} - \text{Д}9$; $P_1, P_2 - \text{РСМ}2$; $\text{П} - \text{ЛР}1510$

Рис. 7. Принципиальная схема автоматизации поиска и захвата сигналов ЯМР.

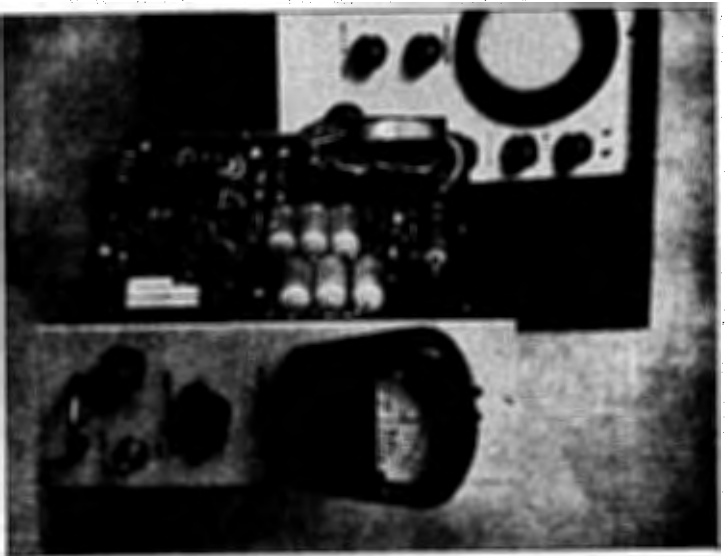


Рис. 8. Внешний вид блока протезов.