

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

13-84-566

С.А.Ивашкевич

**СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ
НА РЕЗОНАНС В ЯДЕРНОМ МАГНИТОМЕТРЕ**

1984

В процессе измерения магнитных полей с помощью ядерных магнитометров ^{1,2/} обычно требуется производить несколько настроек и регулировок. Если все их осуществлять вручную, то это затрудняет поиск ядерного магнитного резонанса /ЯМР/ и достижение оптимальных условий его наблюдения. В результате время каждого измерения увеличивается, что делает ядерные магнитометры неудобными в эксплуатации. Этим, в частности, можно объяснить тот факт, что указанные магнитометры до сих пор используются чаще всего для градуировки измерителей, основанных на других физических явлениях и редко - как рабочие приборы в широкодиапазонных измерениях. Отсюда автоматизация измерительного процесса с использованием ядерных магнитометров представляется как принципиально важная задача. Для ее решения нами разработаны несколько схем, в том числе схема автоматической настройки частоты высокочастотного поля на резонансное значение.

Особенность разработанной схемы заключается в том, что в ней предусмотрена автоматическая регулировка коэффициента передачи цепи автонастройки частоты. Эта регулировка компенсирует изменения коэффициента передачи, связанные с изменением частоты, что способствует улучшению характеристик магнитометра.

Схема разрабатывалась применительно к магнитометру, подобному тому, который описан в ^{3/}, но может успешно использоваться и в других приборах такого типа. Описанный в ^{3/} прибор - это ядерный магнитометр, основанный на вынужденной прецессии ядер. В нем вызывающее резонанс высокочастотное поле создается автогенератором, глубина модуляции /модулируется измеряемое поле/ превышает ширину резонансного сигнала, наблюдается сигнал поглощения. Такие магнитометры иногда называют ядерными магнитометрами обычного типа.

В основу автоматической настройки на резонанс положено перемножение двух напряжений - синусоидального с частотой модуляции и сигнала ЯМР. В результате такого перемножения получаем последовательность импульсов, амплитуда и полярность которых зависят от величины и знака отклонения резонансного магнитного поля B_0 от измеряемого поля B . В следующих за перемножителем схемах импульсный сигнал преобразуется в напряжение постоянного тока - управляющее напряжение.

Как показано в ^{3/}, амплитуда импульсов на выходе перемножителя

$$U_{\Pi} = k_{\Pi} E_C U_M \frac{B_0 - B}{B_M} ,$$

/1/



V_M, U_M, E_C - амплитуды соответственно модулирующего поля, синусоидального напряжения, резонансного сигнала, k_{II} - коэффициент, зависящий от характеристик перемножителя.

Известно, что поле V_0 связано с резонансной частотой высокочастотного поля соотношением

$$V_0 = \omega_0 / \gamma, \quad /2/$$

где γ - гиромагнитное отношение ядер рабочего вещества.

Выражая ω_0 через индуктивность L и емкость C колебательного контура автогенератора для случая, когда в качестве C используются два варикапа, включенных параллельно L по встречно-последовательной схеме, можно записать:

$$V_0 = \frac{1}{\gamma \sqrt{L} \sqrt{C_M + \frac{C_0}{2} (1 - U/\phi)^{-1/2}}}. \quad /3/$$

Здесь для емкости варикапа использовано выражение:

$$C_B = C_0 (1 - U/\phi)^{-1/2}, \quad /4/$$

U - обратное напряжение на варикапах /управляющее напряжение/, ϕ - контактная разность потенциалов, C_0 - начальная емкость варикапа, C_M - емкость монтажа. Рассматривается именно такой случай потому, что варикапы являются удобными и часто применяемыми элементами для перестройки частоты.

Коэффициент передачи

$$K_1 = \frac{dU_{II}}{dU} = k_{10} \frac{1}{f_1(U)}, \quad /5/$$

где $k_{10} = -k_{II} E_C U_M / 2\gamma \phi V_M \sqrt{2LC_0}$,

$$f_1(U) = (1 - U/\phi)^{3/4} \left[1 + \frac{2C_M}{C_0} (1 - U/\phi)^{1/2} \right]^{3/2}. \quad /6/$$

Функции $f_1(U)$ и $1/f_1(U)$, при $C_0 = 45$ пФ, $\phi = 0,75$ В /для варикапа KB102Г/ и $C_M = 10$ пФ, показаны на рис.1.

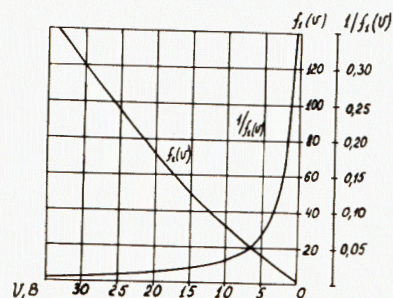


Рис. 1

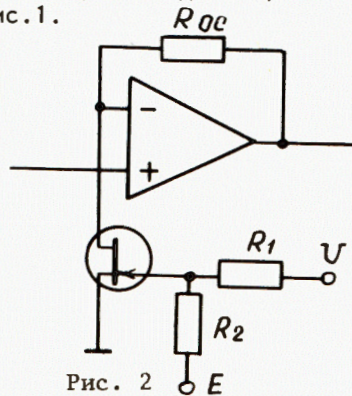


Рис. 2

Видно, что K_1 довольно сильно зависит от U . Например, в диапазоне изменений U от - 2 В до - 30 В крайние значения K_1 отличаются друг от друга в 18 раз. Такое изменение коэффициента передачи, влияя на качество автонастройки, в конечном итоге проявляется в ухудшении основных характеристик магнитометра: точности настройки на резонанс и допустимой неоднородности измеряемого поля.

Чтобы устранить эти недостатки или, во всяком случае, существенно уменьшить их проявление, предлагается сигнал после перемножителя пропустить через схему рис.2 с коэффициентом передачи K_2 , зависящим от U . Схема достаточно хорошо отвечает указанному требованию, если определенным образом выбрать сопротивления R_{oc}, R_1, R_2 и напряжение E , задавшись $U_{мин}$ и $U_{макс}$ - минимальным и максимальным напряжениями на варикапах. Ниже показано, как это можно сделать.

Коэффициент усиления операционного усилителя в неинвертирующем включении применительно к схеме рис.2:

$$K_2 = 1 + R_{oc} G_{си}, \quad /7/$$

где $G_{си}$ - проводимость канала полевого транзистора в омической области его характеристики. Для транзисторов типа КП103 можно считать

$$G_{си} = G_0 (1 - U_{зи}/U_0). \quad /8/$$

Это видно из рис.3, на котором в качестве примера приведены зависимости $G_{си}$ и $R_{си} = 1/G_{си}$ от напряжения на затворе $U_{зи}$ одного из транзисторов КП103Л.

G_0 - проводимость $G_{си}$ при $U_{зи} = 0$, U_0 - напряжение, близкое к напряжению отсечки.

Для схемы рис.2 справедливо также следующее равенство:

$$U_{зи} = E(1 - h) + hU, \quad /9/$$

где $h = R_2 / (R_1 + R_2)$. Для данной схемы $U_{зи} > 0$, $E > 0$, $U < 0$.

Если потребовать, чтобы $U_{зи} = 0$ при $U = U_{макс}$ /этому ничто не мешает/, то получается:

$$E = - \frac{h}{1 - h} U_{макс}. \quad /10/$$

Используя выражения /7 ÷ 10/, K_2 можно записать в следующем виде:

$$K_2 = k_{20} f_2(U). \quad /11/$$

Здесь $k_{20} = R_{oc} / R_0$, $R_0 = 1/G_0$,

$$f_2(U) = 1 + \frac{R_0}{R_{oc}} - h \frac{U - U_{макс}}{U_0}. \quad /12/$$

Общий коэффициент передачи

$$K = K_1 K_2 = k_0 \frac{f_2(U)}{f_1(U)}, \quad /13/$$

где $k_0 = -k_{\text{п}} E_{\text{с}} U_{\text{М}} R_{\text{ос}} / 2\gamma \phi V_{\text{М}} V_{\text{В}} \sqrt{2LC_0}$.

Функция $f_2(U)$ - линейная. Если считать линейной и функцию $f_1(U)$, то задача нахождения параметров схемы, когда K не зависит от U , существенно упрощается. В этом случае можно записать

$$\frac{f_2(U_{\text{МИН}})}{f_2(U_{\text{МАКС}})} = \frac{f_1(U_{\text{МИН}})}{f_1(U_{\text{МАКС}})}. \quad /14/$$

Отсюда после подстановки $f_2(U)$ при $U = U_{\text{МИН}}$ и $U = U_{\text{МАКС}}$ нетрудно найти:

$$h = \frac{U_0}{U_{\text{МИН}} - U_{\text{МАКС}}} \left[1 + \frac{R_0}{R_{\text{ос}}} - \frac{f_1(U_{\text{МИН}})}{f_1(U_{\text{МАКС}})} - \frac{R_0}{R_{\text{ос}}} \frac{f_1(U_{\text{МИН}})}{f_1(U_{\text{МАКС}})} \right]. \quad /15/$$

Если пренебречь последним слагаемым в квадратных скобках /реально это величина второго порядка малости/, то выражение h принимает вид:

$$h = \frac{U_0}{U_{\text{МИН}} - U_{\text{МАКС}}} \left[1 + \frac{R_0}{R_{\text{ос}}} - \frac{f_1(U_{\text{МИН}})}{f_1(U_{\text{МАКС}})} \right]. \quad /16/$$

Зная h , можно вычислить E и выбрать R_1 и R_2 .

Величину $R_{\text{ос}}$ следует выбирать, пользуясь неравенством

$$R_{\text{ос}} > R_0 \frac{f_1(U_{\text{МАКС}})}{f_1(U_{\text{МИН}})}, \quad /17/$$

которое получается исходя из условия $U_{\text{зи}} < U_0$ при $U = U_{\text{МИН}}$.

Приведенных выше выражений достаточно, чтобы найти необходимые величины $R_{\text{ос}}$, R_1 , R_2 и E . Затем, используя выражение $U_{\text{зи}}$ и зависимость $G_{\text{си}} = f(U_{\text{зи}})$, следует проверить, не заходит ли $U_{\text{зи}}$ в область /вблизи U_0 /, где $G_{\text{си}}$ - функция явно нелинейная.

Если это происходит, то надо увеличить $R_{\text{ос}}$, заменить транзистор, или, наконец, уменьшить диапазон изменений U . После этого можно проверить, насколько корректным было пренебрежение

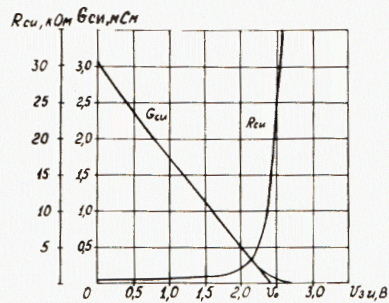


Рис. 3

нелинейностью $f_1(U)$, иначе говоря, посмотреть, исходя из реальных величин $f_1(U)$, на много ли K отличается от постоянной величины во всем диапазоне изменений U . У нас в пределах $U_{\text{МИН}} = -2$ В, $U_{\text{МАКС}} = -30$ В это отличие не превышает 30%. Без регулируемого K_2 , как уже говорилось, коэффициент передачи изменился бы в 18 раз.

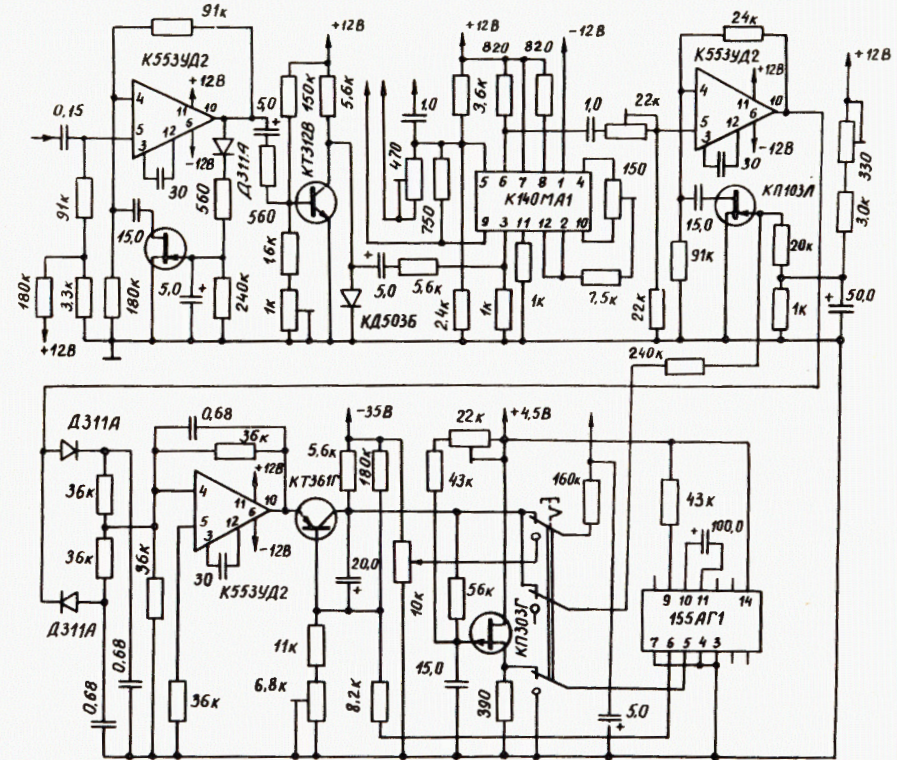


Рис. 4

Надо заметить, что в широкодиапазонных магнитометрах, в которых приходится изменять не только емкость колебательного контура автогенератора, но и заменять индуктивность в контуре, следует учитывать еще зависимость коэффициента k_0 от L . В этом случае можно предусмотреть вместе с заменой L ступенчатое изменение коэффициента K .

Полная принципиальная схема автоматического поиска резонанса и настройки на него представлена на рис.4. В ней в качестве перемножителя используется микросхема K140MA1. На один вход перемножителя подается синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц - частотой модуляции. Напряжение подается через фазовращатель,

позволяющий при первоначальной настройке прибора устранить рас-
согласование фаз перемножаемых напряжений, если оно будет
чрезмерным. Небольшие рассогласования фаз допустимы, что, кста-
ти, является достоинством схемы по сравнению, скажем, с фазовы-
ми детекторами. На другой вход перемножителя поступает импульс-
ный сигнал ЯМР, прошедший две схемы. Одна схема - это усилитель
с автоматической регулировкой усиления /на операционном усили-
теле/, другая /на транзисторе КТ312В/ - усилитель-ограничитель.
В последней путем двустороннего ограничения формируются пря-
моугольные импульсы. Такая предварительная обработка сигнала
защищает перемножитель от перегрузок, полезна при наличии помех.

За перемножителем следует схема с регулируемым коэффициентом
передачи. Далее сигнал проходит диодную схему, где преобразу-
ется в напряжение постоянного тока, суммируется на инвертирую-
щем входе операционного усилителя и с выхода последнего посту-
пает на эмиттер транзисторного каскада /КТ361Г/.

Выходное напряжение каскада /напряжение U / подается: через
резисторный делитель - на затвор транзистора в схеме с регулируе-
мым коэффициентом передачи; через истоковый повторитель
/КП303Г/ - на вход одновибратора /микросхема 155АГ1/ и через
RC-фильтр /160 кОм, 5 мкФ/ - на варикапы.

Исходное состояние транзистора КТ361Г - нормально-открытое.
Когда напряжение U становится меньше 2 В, возбуждается одно-
вибратор и своим выходным потенциалом переводит транзистор в
закрытое состояние. После возвращения одновибратора в исход-
ное состояние начинается медленное /за счет емкости в цепи
коллектор-база транзистора/ уменьшение U . Так идет поиск резонанса.
С появлением сигнала ЯМР напряжение U /теперь уже
зависящее и от напряжения, поступающего на вход каскада/ по-
средством варикапов удерживает частоту автогенератора вблизи
резонансного значения, соответствующего измеряемому магнитному
полю.

Переключатель в схеме служит для перехода в режим ручной
настройки. В этом режиме напряжение на варикапы поступает с мно-
гооборотного резистора /10 кОм/.

Чтобы убедиться в практической ценности разработанной схемы,
сравнивались характеристики магнитометра в следующих режимах:
ручной настройки и автоматической с регулируемым и постоянным
коэффициентами K_2 . Сравнения велись во всем перестраиваемом ва-
рикапами диапазоне частот, в магнитных полях с повышенной неод-
нородностью, т.е. в неблагоприятных условиях. Было установлено,
что в режиме автоматической настройки на резонанс при заданной
погрешности измерения 0,01% допустимая неоднородность измеряемо-
го поля в случае с постоянным коэффициентом K_2 приблизительно
в 2 раза меньше, а с регулируемым коэффициентом не меньше, чем
при ручной настройке. Кроме того, испытания прибора показали,
что с регулируемым K_2 повышается надежность захвата в режим

слежения за резонансом при его поиске. Таким образом видно,
что меры, принятые для улучшения технических и эксплуатационных
характеристик ядерного магнитометра, были эффективными.

В заключение автор искренне благодарит В.В.Калиниченко
и П.Т.Шишлянникова, прочитавших рукопись данной работы и сделав-
ших полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лёше А. Ядерная индукция. ИЛ, М., 1963.
2. Афанасьев Ю.В. и др. Средства измерений параметров магнитно-
го поля. "Энергия", Л., 1979.
3. Ивашкевич С.А. ОИЯИ, 13-80-130, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 августа 1984 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Ивашкевич С.А.

13-84-566

Схема автоматической настройки на резонанс в ядерном магнитометре

Описана схема автоматического поиска ядерного магнитного резонанса и точной настройки на него в ядерном магнитометре. Особенность схемы заключается в том, что в ней предусмотрена автоматическая регулировка коэффициента передачи цепи автоматической частоты вызывающего резонанс высокочастотного поля. Такая регулировка компенсирует изменения коэффициента передачи, связанные с изменением частоты, и тем самым способствует улучшению технических характеристик магнитометра в режиме автоматической настройки на резонанс. Приводятся характеристики схемы и магнитометра с ее использованием.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод автора

Ivashkevich S.A.

13-84-566

An Automatic Search-Lock-Track Circuit of a Nuclear Magnetometer

An automatic search-lock-track circuit of a nuclear magnetometer is described. The peculiarity of this circuit consists in that it is provided with automatic control of the coefficient of amplification of the automatic frequency tuning circuit of the rf field. As a result the technical characteristics of the magnetometer are improved. The characteristics of the above-described circuit as well as of the magnetometer, using this circuit, are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984