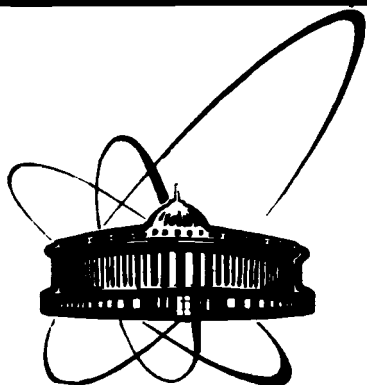


89-733



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

К 44

P13-89-733

**Ю.Ф.Киселев, А.М.Сирунян\*, С.С.Степанян\***

**Q-МЕТР С ЦИФРОВЫМ РЕГИСТРАТОРОМ**

Направлено в журнал "Приборы и техника  
эксперимента"

\*Ереванский физический институт

**1989**

В работе описан Q-метр с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) приемного контура для измерения ядерной поляризации мишеней, приведены результаты теоретического анализа и эксперимента. Прибор позволяет с минимально возможными для данного метода искажениями получить форму линии ЯМР и измерить интегральную интенсивность сигнала поглощения ядер мишени. Сбор и обработка информации осуществляются ЭВМ типа Правец-16 или Э-100/25, связанных с Q-метром через регистратор, выполненный в стандарте КАМАК. В регистраторе аналоговый сигнал преобразуется в цифровую форму и записывается в собственной памяти последовательного доступа синхронно с прохождением сигнала ЯМР. В промежутке между сигналами ЯМР информация с регистратора через магистраль КАМАК передается для накопления в ЭВМ. При использовании промежуточной памяти отпадает необходимость в подключении к каналу прямого доступа в память ЭВМ, вследствие чего система обработки приобретает функции универсального цифрового осциллографа. На заключительном этапе обработки ЭВМ корректирует наблюдаемый спектр ЯМР по формулам, полученным из анализа работы прибора.

### 1. Блок-схема Q-метра

На рис.1 приведена блок-схема Q-метра с ФАПЧ приемного гибридного контура, который состоит из катушки L, связанной с поляризованной мишенью M, частично охлажденного коаксиального кабеля длиной l, сопротивления потерь  $R_0$  и подстраиваемого конденсатора C. ВЧ-генератор через сопротивление R и амплитудный ограничитель возбуждает контуре стабильный по амплитуде и линейно изменяющийся по частоте ток. Напряжение на контуре усиливается широкополосным ВЧ-усилителем и поступает на фазовый детектор, который подстраивает приемный контур под частоту ВЧ-генератора. Как показывает расчет линейной модели ФАПЧ/1/, наиболее точная подстройка получается, когда фазово-частотные характеристики приемного контура и опорного канала фазовращателя  $\Theta_2(\omega)$  имеют противоположные знаки угловых коэффициентов. Например, последовательному приемному контуру должен соответствовать фазовращатель с частотной характеристикой  $\Theta_2(\omega)$ , как у параллельного контура. ФАПЧ подавляет вклад мнимой части в модуль импеданса приемного контура, в результате чего уменьшаются искажения формы линии ЯМР и значительно упрощается окончательная коррекция нелинейных искажений. После детектирования и усиления по низкой частоте выходное напряжение представляет собой смесь полезного сигнала ЯМР с частично

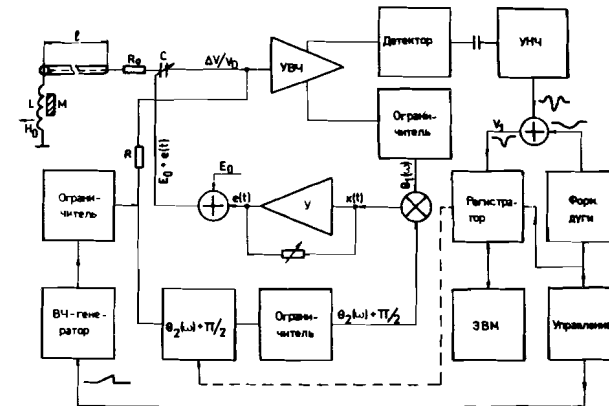
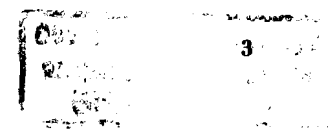


Рис.1. Блок-схема Q-метра с ФАПЧ.

подавленной огибающей амплитудно-частотной характеристики приемного контура - "дуги" и некоторой постоянной составляющей, уровень которой может заметно изменяться, особенно по отношению к уровню неусиленного сигнала ЯМР при тепловом равновесии спинов с решеткой. Этот дрейф возникает вследствие нерегулярных помех, переходных процессов в УНЧ с участием разделительных конденсаторов, температурного изменения фазы в опорном канале и небольшой расстройки приемного контура. Опыт показывает, что при точном измерении поляризации мишени перед цифровым накоплением необходимо выполнить аналоговое подавление остаточной "дуги" и принять меры по предварительному устранению влияния дрейфа постоянной составляющей. Остаточная "дуга", уровень которой обычно только в 2-5 раз превосходит уровень шума, подавляется вычитанием из напряжения УНЧ компенсирующего напряжения параболической формы, которое создается в блоке формирования "дуги". Дрейф постоянной составляющей устраняется в регистраторе. Последний выполняет также дискретизацию ЯМР-сигнала в 1024 точках и запись в собственную память. В промежутках между записью сигналов ЯМР информация от регистратора через магистраль КАМАК передается в ОЗУ ЭВМ. ЭВМ выполняет окончательный расчет базовой линии сигнала ЯМР по методу наименьшего среднеквадратичного отклонения, осуществляет накопление сигналов, коррекцию спектров на нелинейность и вычисление поляризации мишени по их интегральной интенсивности.

### 11. Расчет гибридных колебательных контуров

Колебательный контур, включающий элемент цепи с распределенными параметрами (гибридный контур), вблизи резонанса можно рассчитывать как



простой эквивалентный резонансный контур из сосредоточенных элементов, если учесть распределение тока в кабеле введением дополнительного параметра распределенности<sup>2/</sup> -  $\delta$ . Этот параметр определяет влияние волнового сопротивления  $\rho$ , постоянных затухания -  $\alpha$ , распространения -  $\beta$  кабеля на добротность  $Q_h$ , на чувствительность к сигналу ЯМР и на эквивалентное сопротивление гибридного контура  $R_{sp}$ , где индексы означают соответственно последовательный и параллельный контуры. Параметры эквивалентного контура рассчитаны в работах<sup>1+3/</sup>:

$$R_s = \delta \cdot \omega L_e / Q_h, \quad R_p = Q_h \cdot \omega L_e / \delta, \quad Q_h = \frac{\omega L}{R_o} \cdot \frac{A}{B}, \quad (1)$$

$$\text{где } \delta = A \cdot ((1+k_2 \rho / \omega L) (1 - k_2 \omega L / \rho))^{-1}, \quad (2)$$

$$A = 1 + \frac{\beta l}{2} \cdot (1+k_2^2) \left( \frac{\omega L}{\rho} + \frac{\rho}{\omega L} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\rho}{\omega L} - \frac{\omega L}{\rho} \right) k_2, \quad (3)$$

$$B = (1 - k_2 \frac{\omega L}{\rho})^2 + \frac{\omega L}{R_o} \left( \frac{\omega L}{\rho} + \frac{\rho}{\omega L} \right) k_1, \quad (4)$$

$$\omega L_e = (\omega c)^{-1} = (\omega L + k_2 \rho) (1 - k_2 \frac{\omega L}{\rho})^{-1}, \quad (5)$$

$$\text{th}(\alpha l + j\beta l) = k_1 + jk_2 \approx \alpha l \cos^{-2}(\beta l) + j \text{tg}(\beta l), \quad (6)$$

где  $[\alpha]$  в Нп/м - коэффициент затухания кабеля,  $\beta = \epsilon^{1/2} \omega / c$  - постоянная распространения в рад/м,  $[L]$  - индуктивность катушки в Гн,  $[\omega]$  в рад  $\cdot$   $c^{-1}$  - угловая частота,  $[l]$  - длина кабеля в м,  $c = 3 \cdot 10^8$  м  $\cdot$   $c^{-1}$  - скорость света в вакууме,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость изолятора,  $\rho$  - волновое сопротивление кабеля. Приведем несколько практически полезных формул для определения параметров приемного контура Q-метра. Добротность из (1) при  $l = n \lambda / 2$ , где  $\lambda$  - длина волны в кабеле,  $n=0,1,2...$  равна

$$Q_h = \frac{\omega L}{R_o} \left[ 1 + \frac{\pi n}{2} \left( \frac{\rho}{\omega L} + \frac{\omega L}{\rho} \right) \right] \left[ 1 + \frac{\omega L}{R_o} \left( \frac{\rho}{\omega L} + \frac{\omega L}{\rho} \right) k_1 \right]^{-1}, \quad (7)$$

откуда по измерению  $Q_h$  короткозамкнутого или разомкнутого на конце кабеля, неоднородно охлажденного по длине, при произвольном  $n$  определяется усредненный коэффициент затухания  $\alpha = 0,01 \epsilon^{1/2} (2\Delta\nu)$ , где  $(2\Delta\nu)$  - полоса пропускания в МГц. Комплексный импеданс гибридного контура и фазово-частотная характеристика вычисляются по формулам:

$$Z_s = R_s \cdot (1 + j\zeta), \quad Z_p = R_p \cdot (1 + j\zeta)^{-1}, \quad \varphi_s = \arctg \zeta, \quad \varphi_p = -\arctg \zeta, \quad \zeta = 2Q_h \cdot (\omega - \omega_o) / \omega_o, \quad (8)$$

где  $\omega_o$  - резонансная частота контура.

Кабель оказывает сильное влияние на чувствительность Q-метра к высокочастотной ядерной восприимчивости мишени  $\chi = \chi' - j\chi''$ . Так, относительное изменение модуля импеданса контура за счет ЯМР поглощения -  $\kappa$  в линейном приближении по  $\chi''$  равно<sup>3/</sup>

$$\kappa_{sp} = 4\pi\eta Q_h \chi'' \cdot (1 + k_2^2) / A. \quad (9)$$

Относительная расстройка контура сигналом дисперсии -  $\chi'$  равна<sup>3/</sup>

$$(2\Delta\omega) / \omega_o = -4\pi\eta \chi' \cdot (1 + k_2^2) / A. \quad (10)$$

Формула (9) обобщает известное выражение Робинсона<sup>4/</sup>  $\kappa = 4\pi\eta Q\chi''$ , справедливое для контура без кабеля.

### 111. Описание принципиальных схем

#### 111-1. УВЧ, линейный детектор, ограничитель амплитуды, фазовый детектор

На рис.2 представлена схема усилителя высокой частоты (УВЧ) протонного Q-метра. Полоса пропускания усилителя  $100 \div 120$  МГц на уровне 0,9, коэффициент усиления 160. Нижний спад амплитудно-частотной ха-

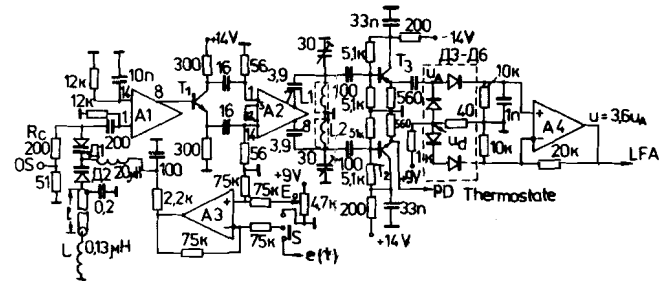


Рис.2. усилитель высокой частоты протонного Q-метра.

A1,2-  $\mu$ A-733, A3,4- 140УД6, Д3+Д6 - ГД-508.

рактеристики (АЧХ) формируется переходными конденсаторами, верхний - настройкой корректирующих контуров  $L_1$  и  $L_2$  на спад АЧХ усилителя. Выход повторителя  $T_2$  подключается к сигнальному входу ( $u_s$ ) фазового детектора (рис.4), выход повторителя  $T_3$  - к линейному детектору. Последний состоит из двух пар диодов  $D_3 + D_6$  с одинаковыми вольт-амперными характеристиками. Диоды подключены к симметричным входам усилителя А4 и смещены опорным напряжением  $u_d \approx 370$  мВ. в такой схеме компенсируется нелинейность начального участка вольт-амперной характеристики диодов, в результате чего выходное напряжение А4 в пределах  $0,08 \text{ В} \leq u \leq 8 \text{ В}$  имеет простую связь с амплитудой  $u_A$  вч-напряжения на входе детектора

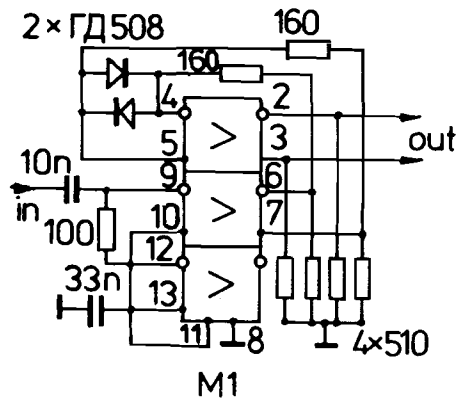


Рис.3. Высокочастотный амплитудный ограничитель M1 - 500ЛП116.

$u = 3,6 \cdot u_A$ . Диоды вместе с терморезистором и нагревателем (последние два элемента не показаны на схеме) вклеены эпоксидной смолой в медный блок размерами  $0,5 \times 1,2 \times 1,2 \text{ см}^3$ . Температура блока поддерживается с точностью  $\pm 0,1^\circ$ , чтобы при многосуточных измерениях колебания внешней температуры не влияли на коэффициент передачи детектора. К входу усилителя подключается последовательный гибридный контур с емкостью настройки (варикапы D1, D2), управляемой сумматором A3. При настройке приемного контура сначала в верхнем по схеме положении переключателя S подбирается смещение  $E_0$ , затем в нижнем положении S добавляется напряжение  $e(t)$ . При развертке частоты ВЧ-генератора возникает паразитная амплитудная модуляция. Для подавления этого нежелательного явления используется амплитудный ограничитель (рис.3). Такие же ограничители включены в сигнальном и опорном трактах фазового детектора (рис. 1,4).

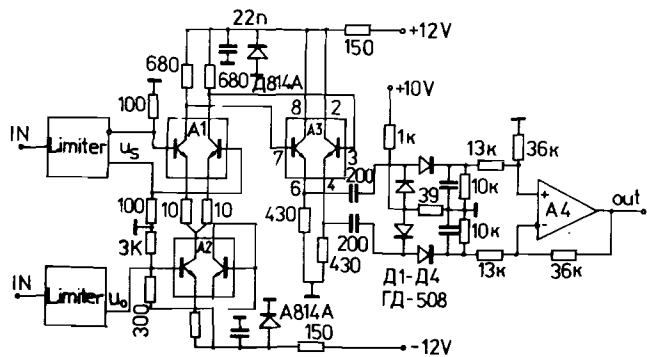


Рис.4. ВЧ-фазовый детектор. A1÷A3 - 159НТ1Д. A4 - 140УД6.

Схема состоит из двух последовательно включенных ВЧ-усилителей, в межкаскадную связь которых включен диодный ограничитель. Вторая и более высокие гармоники не оказывают влияния на работу Q-метра, так как они не являются резонансными для приемного контура и эффективно подавляются усилителем. на рис.4 приведена схема фазового детектора с балансным диодным детектором на выходе (D1÷D4). Здесь использованы три микросхемы с парами ВЧ транзисторов. Наиболее линейный вид фазовой характеристики детектора получается, когда напряжение сигнального входа  $u_s$  создает на выходе A3 вдвое большее напряжение, чем сигнал от напряжения  $u_0$  опорного канала.

### 111-2. Регистратор аналогового сигнала ЯМР

Регистратор<sup>5,1/</sup> (рис.5) подавляет дрейф постоянной составляющей выходного напряжения УНЧ, осуществляет дискретизацию и запоминание сигнала ЯМР в собственную память, по команде ЭВМ через магистраль КАМАК передает содержимое памяти в машину. Для устранения дрейфа служат две схемы выборки-хранения (СВХ1,2) и усилитель A1. Временные диаграммы импульсов на рис.5 иллюстрируют работу схемы по отношению к пилообразному напряжению развертки частоты ВЧ-генератора. На сигнальный вход СВХ1,2 подается напряжение с сумматора V1 (рис.1,5). Импульсы запуска -(a,b) соответствуют переднему и заднему фронтам импульса развертки частоты ВЧ-генератора Q-метра. СВХ1,2 запоминают напряжения  $V_a$  и  $V_b$ , соответствующие мгновенным значениям  $V_1$ . Затем в A1 полусумма напряжений  $(V_a + V_b)/2$  вычитается из входного сигнала  $V_1$ , вследствие че-

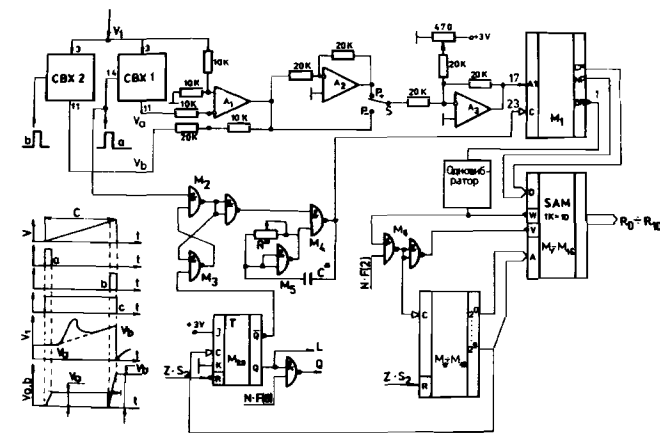


Рис.5. Регистратор. СВХ1,2 - КР1100СК2, A1÷A3 - 140УД6, M1 - К1108ПВ1, M2÷M6 - 155ЛА3, M7÷M16 - 155РУ7, M17÷M19 - 155ИЕ5, M20 - 155ТВ1.

го выходное напряжение  $A_1$  оказывается привязанным к нулевому пьедесталу. Происходит устранение дрейфа и восстановление постоянной составляющей сигнала  $v_1^{1/2}$ . Разность  $(v_a - v_b)$  зависит от расстройки приемного контура относительно центральной частоты развертки ВЧ-генератора. При накоплении неусиленных сигналов ЯМР эту разность напряжений полезно использовать для коррекции фазы  $\theta_2$  в опорном канале<sup>1/2</sup>, как это показано пунктиром на рис.1. В этом случае происходит дополнительное подавление пилообразного изменения пьедестала под ЯМР сигналом. Окончательная процедура вычисления базовой линии сигнала ЯМР выполняется компьютером по методу наименьшего среднеквадратичного отклонения.

Дискретизация ЯМР сигнала осуществляется 10-разрядным АЦП ( $M_1$ ). Передний фронт импульса (а) запускает через RS-триггер ( $M_2, M_3$ ) ждущий генератор ( $M_4, M_5$ ), период которого задает время преобразования АЦП. Импульс DR конца преобразования ( $M_1$ ) формируется одновибратором и иницирует запись в память ( $M_7 \div 16$ ) и сдвиг адреса ( $M_{17 \div 19}$ ). После достижения адреса 1024 устанавливается триггер готовности ( $M_{20}$ ), который прекращает процесс дискретизации. Далее через магистраль КАМАК информация поступает в ОЗУ ЭВМ. При считывании импульсы NF(2) определяют адреса считывания. Работа регистратора начинается по команде сброса "z", которая устанавливает в исходное состояние ( $M_{17 \div 20}$ ).

#### IV. Коррекция экспериментального спектра

Поляризация мишени равна  $\phi \int \chi'' d\omega$ , где константа  $\phi$  определяется по измерению неусиленного ЯМР сигнала с известной поляризацией. Так как измеряемая Q-метром величина относительного изменения модуля импеданса приемного контура  $-k$  лишь в первом приближении пропорциональна  $\chi''$  (см.9), то при точном определении поляризации необходимо выполнить коррекцию наблюдаемого спектра. Практически нелинейными поправками от мнимой части импеданса приемного контура можно пренебречь, если ФАПЧ более чем в 10 раз подавляет амплитуду "дуги"<sup>1,6/</sup>. В этом случае поправка на нелинейность определяется нелинейными членами реальной части импеданса и может быть рассчитана в аналитическом виде<sup>1/</sup> путем разложения импеданса последовательного контура в комплексный ряд по  $k_1 + jk_2$

$$k_{sp} = \frac{x'' + \frac{2\omega L}{\rho} (x' + \frac{x'^2}{2Q} - \frac{x''^2}{2Q}) k_1 + \frac{2\omega L}{\rho} x'' (1 + \frac{x'}{Q}) k_2}{1 + \frac{\rho}{R_0} (1 + \omega^2 L^2 / \rho^2) k_1}, \quad (11)$$

где  $x'' = 4\pi\eta\chi''\omega L/R_0$ ,  $x' = 4\pi\eta\chi'\omega L/R_0$ .  
Для параллельного контура - в ряд по  $x' - jx''$

$$k_p = [-\frac{\xi_2}{u} x'' + (2 - \frac{\xi_2}{v} - \frac{\xi_1}{u}) x'] [\frac{\xi_1}{u} x' + \frac{\xi_2}{u} x'']^{-1}, \quad (12)$$

где предполагается  $\xi_1 \ll \xi_2$ ,  $2\xi_1 v^{-1} \ll \xi_2 u^{-1}$ ,

$$u = R_0 + \rho [1 + (\omega L/\rho)^2] [1 - k_2 \omega L/\rho]^{-2}, \quad k_2 \omega L/\rho \ll 1, \quad (13)$$

$$v = (\omega L + k_2 \rho) (1 - k_2 \omega L/\rho)^{-1}, \quad (14)$$

$$\xi_1 = 2R_0 (k_2 + \omega L/\rho) (1 - k_2 \omega L/\rho)^{-3} k_1, \quad (15)$$

$$\xi_2 = R_0 (1 + k_2^2) (1 - k_2 \omega L/\rho)^{-2}. \quad (16)$$

Формулу для  $k_p$  можно использовать также при  $l < \lambda/4$ . Таким образом наблюдаемый спектр  $-k_{sp}$  в Q-метре с ФАПЧ определяется формулами 11 и 12, из которых для точного определения поляризации необходимо определить действительную форму линии поглощения ( $\chi''$ ) и интегральную интенсивность сигнала. Величина  $\chi''$  находится из (11,12) методом итераций с использованием спектра  $k_{sp}$ , величина  $\chi'$  определяется из соотношений Кронига-Краммерса. Более подробно процедура определения поправок описана в работах 1 и 7.

#### V. Экспериментальные результаты

На рис.6 представлен неусиленный сигнал ЯМР от протонов диола  $C_3H_6(OH)_2$ , полученный накоплением по  $10^3$  циклам прохождения. Исходный сигнал с выхода Q-метра имеет отношение сигнал-шум примерно 2:1 при температуре 1,3К. В результате динамической поляризации ядер

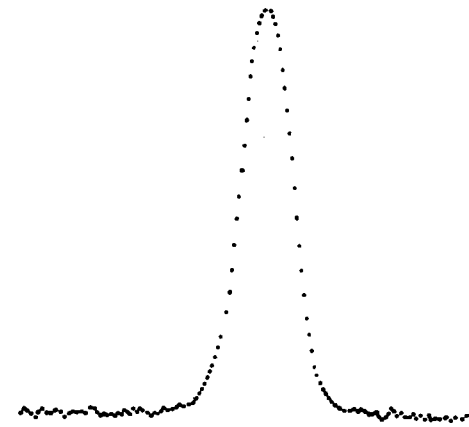


Рис.6 Спектр ЯМР протонов  $C_3H_6(OH)_2$  при  $T=1.3$  К, усредненный по  $10^3$  циклам прохождения.

глубина модуляции вЧ-напряжения на приемном контуре возрастает в несколько сотен раз и составляет  $15 \pm 30\%$ . В отсутствие ФАПЧ при таких больших сигналах поправки на нелинейность составляют 20 и более процентов, а их точное определение представляет достаточно сложную задачу даже для современных ЭВМ. В нашем случае действие ФАПЧ приводит к снижению характерной величины поправок до  $\pm 2.5\%$  и значительному повышению точности измерения поляризации мишени. На рис.7 показано напряжение  $E_0 + e(t)$  на выходе ФАПЧ при наблюдении усиленного сигнала ЯМР. Пунктиром на графике показано напряжение в отсутствие сигнала ЯМР. Длительная эксплуатация прибора в условиях работающего ускорителя показала высокую стабильность измерений и сохранение чувствительности при многосуточных измерениях.

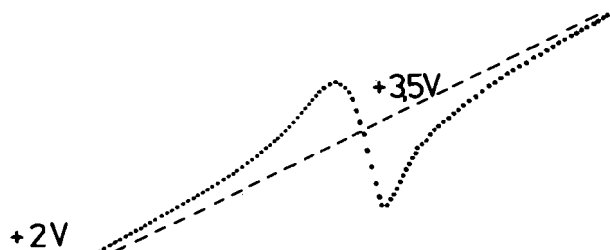


Рис.7. Выходное напряжение  $E_0 + e(t)$  ФАПЧ в режиме регистрации усиленного протонного сигнала.

В заключение хотим особо указать на возможность применения регистратора для решения широкого круга экспериментальных задач, требующих ввода аналоговых сигналов в ЭВМ.

#### Литература

1. Ю.Ф.Киселев, И.Л.Карпихин. Препринт ОИЯИ P13-89-468, Дубна, 1989.
2. М.С.Нейман. Обобщение теории цепей на волновые системы. Госэнергоиздат (1955), Гл.2, 20.
3. Ю.Ф.Киселев, А.Н.Черников. Препринт ОИЯИ 13-85-734, Дубна 1985.
4. F.N.H. Robinson, D.Phil. J. of Sci. Instr. 36, 12, (1959) 481.
5. А.Л.Голендухин, А.П.Казарян, К.К.Мкртчян, А.М.Сирунян, С.С.Степанян. Препринт ЕФИ-1074(37)-88, Ереван.
6. Ю.Ф.Киселев, А.П.Сапожников. Сообщение ОИЯИ P13-10694, Дубна 1977.
7. Yu.F.Kiselev, V.V.Polykov, A.I.Kovalev et al. Nucl. instr. and Meth. in Phys. Research 220 (1984) 399.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 октября 1989 года.

Киселев Ю.Ф., Сирунян А.М., Степанян С.С. P13-89-733  
Q-метр с цифровым регистратором

Описан прибор для измерения ядерной поляризации мишени. Устройство состоит из Q-метра с фазовой автоподстройкой приемного контура и регистратора, осуществляющего дискретизацию аналогового сигнала и передачу его через магистраль КАМАК в ЭВМ. Приведены аналитические выражения для коррекции спектров ЯМР на нелинейность и даны схемы наиболее сложных узлов прибора. Q-метр обеспечивает точность измерения  $\pm 1\%$ , при диапазоне развертки частоты 430 кГц.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод М.И.Потапова

Kiselev Yu.F., Sirunyan A.M.,  
Stepanyan S.S. P13-89-733  
Q-Meter with Digital Register

A device to measure nuclear polarisation of targets is described. The device consists of a Q-meter with the automatic phase-lock control for the receiving circuit and a register for sampling the analogue signal and transferring it to the computer through the CAMAC dataway. The analytic expressions for correction of NMR spectra to non-linearity are given and circuits of practically most complex units of the device are presented. The Q-meter ensures the  $\pm 1\%$  accuracy of measurements in the frequency sweep range of 430 kHz.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989