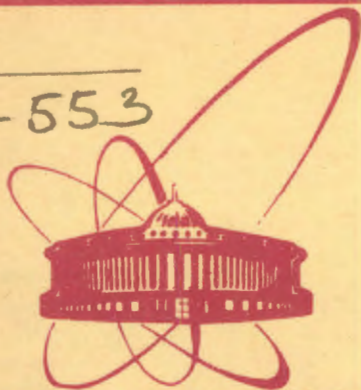


1-553



объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

4666/  
2-81

14/9-81

P13-81-365

+

М.Ю.Либург, В.Н.Матафонов

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ  
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
ПРОТОННЫХ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МИШЕНЕЙ  
МЕТОДОМ Q -МЕТРА

*Направлено в ПТЭ*

1981

## ВВЕДЕНИЕ

В мишенях с ориентированными динамическим методом ядрами величина поляризации обычно измеряется по интегральной интенсивности спектра поглощения ядерного магнитного резонанса /ЯМР/ <sup>1/</sup>. В качестве детектора сигналов ЯМР используется Q-метр - прибор, регистрирующий изменение модуля импеданса настроенного контура, в катушке индуктивности которого помещена мишень. Обычно предполагается, что при выполнении условий ЯМР изменение индуктивной части комплексного сопротивления контура описывается формулой

$$i\omega L = i\omega L_0 [1 + 4\pi\eta\chi(\omega)], \quad /1/$$

где  $L_0$  - собственная индуктивность катушки;  $\eta$  - фактор заполнения катушки парамагнетиком;  $\chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$  - комплексная ядерная восприимчивость вещества мишени;  $\omega$  - циклическая частота. Действительную и мнимую части восприимчивости называют соответственно дисперсией и поглощением. Связь между функциями  $\chi'(\omega)$  и  $\chi''(\omega)$  устанавливается соотношениями Крамерса-Кронига <sup>1/</sup>. Если дисперсия определяет приращение реактивной части полного импеданса катушки, то изменение его активной части обусловлено поглощением. С последним связана величина ядерной поляризации <sup>1/</sup>:

$$P \sim \int_0^{\infty} \chi''(\omega) d\omega. \quad /2/$$

При включении катушки в цепь колебательного контура можно ожидать, что изменение полного импеданса последнего будет в значительной мере зависеть от поглощения, поскольку, как известно, проводимость настроенного в резонанс контура носит активный характер <sup>2/</sup>.

Сигнал ЯМР наблюдается в виде амплитудной модуляции высокочастотного напряжения, пропорционального изменению модуля импеданса контура, при линейной девиации частоты питающего генератора в диапазоне от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , выбранном так, что  $(\omega_2 - \omega_1) > 4\Delta\omega$ , где  $\Delta\omega$  - полуширина линии спектра поглощения. Мерой ядерной поляризации служит интеграл:

$$I = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|Z(\omega)| - |Z_0(\omega)|}{|Z_0(\omega)|} d\omega. \quad /3/$$

СОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

Здесь  $Z(\omega)$  - полный импеданс входного контура;  $Z_0(\omega)$  - импеданс контура в отсутствие парамагнитного поглощения, т.е.  $Z_0(\omega) = Z(\omega)|_{\chi' = \chi'' = 0}$ . Величина поляризации определяется через коэффициент усиления:

$$E_m = I/I_0. \quad /4/$$

где  $I_0$  - значение  $I$ , полученное в соответствии с /3/, в состоянии термического равновесия системы ядерных спинов с решеткой, когда поляризация  $P_0$  может быть вычислена как функция температуры решетки и напряженности магнитного поля. В силу того, что подынтегральное выражение в формуле /3/ не только зависит от поглощения, но и содержит вклад, обусловленный дисперсией, "измеренное" значение коэффициента усиления  $E_m$  в общем случае отличается от "истинного":

$$E = E_m(1 - \epsilon). \quad /5/$$

Поправка на нелинейность  $\epsilon$  по абсолютной величине составляет обычно несколько процентов и тем больше, чем выше чувствительность приемного контура по парамагнитному поглощению.

Если  $E$  найдено, то искомое значение поляризации рассчитывается по формуле

$$P = P_0 E. \quad /6/$$

Таким образом, при измерении степени поляризации мишеней необходимо вычислить или специальными мерами уменьшить вклад систематических ошибок, связанных с нелинейностью Q-метра по парамагнитному поглощению.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О Q-МЕТРАХ

Основным элементом Q-метра является настроенный в резонанс колебательный радиоконтур, питаемый генератором тока<sup>/2/</sup>. При этом амплитуда высокочастотного напряжения, снимаемого с контура, прямо пропорциональна его модулю импеданса.

Приемный колебательный контур существующих измерительных систем всегда содержит в себе кабель, связывающий катушку индуктивности, расположенную внутри криостата, с остальной частью измерительной аппаратуры. Длина этого кабеля подбирается кратной половине длины волны  $l_0 = n\lambda/2$  /  $n$  - целое/, соответствующей частоте наблюдения ЯМР. В зависимости от способа подключения конденсатора к концу кабеля, противоположного катуш-

ке, реализуется схема параллельного или последовательного распределенных контуров\*. Далее будем для краткости называть PQ-метром или SQ-метром устройства с параллельным или последовательным входными контурами соответственно, а индексы  $p$  и  $s$  будут означать, что данная величина или параметр относятся к PQ-метру или SQ-метру.

Выражения для полных импедансов распределенных колебательных контуров могут быть записаны в следующем виде:

$$Z_s = \rho \frac{1 + ke^{-2\gamma l}}{1 - ke^{-2\gamma l}} + \frac{1}{i\omega C_s + G_s}, \quad /7/$$

$$Z_p = \left( \frac{1}{\rho} \frac{1 - ke^{-2\gamma l}}{1 + ke^{-2\gamma l}} + i\omega C_p + G_p \right)^{-1}. \quad /8/$$

В формулах /7/ и /8/ приняты обозначения:  $\rho$  - волновое сопротивление кабеля;  $l$  - его длина;  $\gamma = \alpha + i\beta$  - постоянная распространения;  $\alpha$  - коэффициент затухания;  $\beta$  - коэффициент фазы;  $C$  - емкости конденсаторов;  $G$  - активные проводимости конденсаторов;  $k$  - коэффициент отражения по напряжению:

$$k = \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}; \quad \lambda = (i\omega L + R) / \rho,$$

где  $R$  - активное сопротивление катушки, а полная индуктивность  $L$  вычисляется согласно формуле /1/.

Амплитудный спектр ЯМР, наблюдаемый на выходе Q-метра, представим в виде функций  $m_s(\omega)$  и  $m_p(\omega)$ , вычисленных как подынтегральное выражение в формуле /3/:

$$m_s(\omega) = \frac{|Z_s(\omega)| - |Z_{s0}(\omega)|}{|Z_{s0}(\omega)|}, \quad /9/$$

$$m_p(\omega) = \frac{|Z_p(\omega)| - |Z_{p0}(\omega)|}{|Z_{p0}(\omega)|}. \quad /10/$$

Величины  $m_s$  и  $m_p$  при одинаковой восприимчивости и на фиксированной частоте тем больше по абсолютной величине, чем выше значение добротности\*\* и фактора заполнения  $\eta$  из формулы /1/. Однако с увеличением чувствительности, в общем случае, растет нелинейность прибора по парамагнитному поглощению, что выдвигает проблему оптимального Q-метра. Этот последний должен, с одной стороны, обеспечить достаточно надежную регистрацию

\* Другие возможные схемы не получили большого распространения и в работе не рассматриваются.

\*\* Под добротностью распределенного колебательного контура, как обычно, понимается величина, равная отношению частоты точного резонанса к полуширине резонансной кривой.

сигнала термического равновесия при калибровке и, с другой - осуществить ее без существенного увеличения систематических погрешностей при регистрации сигналов, соответствующих высокой поляризации.

Аналитические выражения для  $m_s$  и  $m_p$  чрезвычайно громоздки<sup>5,6/</sup>, что затрудняет их использование для исследования свойств конкретных систем. Поэтому для выяснения характера зависимости систематических погрешностей Q-метра того или иного типа от параметров измерительного контура наибольший практический интерес представляют работы, в которых приводятся результаты численных расчетов на ЭВМ. Впервые такие расчеты проводились Одеггалом и Петричком<sup>3/</sup> для PQ-метра. Позднее аналогичный расчет, проведенный Петричком<sup>4/</sup>, показал перспективность использования SQ-метра, который обеспечит меньшие систематические ошибки при измерении поляризации без снижения чувствительности измерительного устройства. Расчеты Одеггала и Петричка сделаны для гауссовой функции формы линии спектра поглощения ЯМР. Однако позднее<sup>5/</sup> была обнаружена довольно сильная зависимость величины систематической погрешности Q-метра от формы линии, и данные, полученные для функций Гаусса и Лоренца, определяют, по-видимому, соответственно верхний и нижний пределы возможных систематических ошибок при одинаковых параметрах Q-метра.

В работе Петричка<sup>4/</sup> предложен также способ улучшения линейности SQ-метра. С помощью сигнала обратной связи, подаваемого на варикап в цепи приемного контура, компенсируется расстройка последнего, связанная с резонансным парамагнитным поглощением. Напряжение в цепи обратной связи вырабатывается в фазовом детекторе, на входы которого подаются напряжение питающего генератора и напряжение, снимаемое с контура. В целом система, по существу, уменьшает фазовый сдвиг высокочастотных колебаний напряжения на контуре в условиях ЯМР. В процедуре расчета в качестве критерия настройки контура на резонансную частоту выбрано условие минимума модуля импеданса. Более точным условием резонанса, для рассматриваемого случая, должно быть равенство нулю фазового сдвига между колебаниями высокочастотного напряжения на контуре и тока генератора<sup>2/</sup>. Это означает, что при оценке "остаточной" систематической погрешности SQ-метра с обратной связью в указанной работе содержатся неточности.

В силу сказанного нам представлялась актуальной задача в следующей постановке:

1. Произвести расчеты возможных систематических погрешностей параллельного и последовательного Q-метров, в которых не использована обратная связь, для гауссовой и лоренцевой функций форм-линий.

2. Произвести расчеты возможных систематических ошибок для SQ-метра с обратной связью, предложенного в работе Петричка<sup>4/</sup>.

Подчеркивая, что такие системы уменьшают сдвиг фазы высокочастотного напряжения на контуре, и следуя терминологии работы<sup>7/</sup>, где удачно реализована эта идея, будем в дальнейшем называть их Q-метрами с фазовой автоподстройкой /ФАП/.

## 2. ПРОГРАММЫ РАСЧЕТОВ НА ЭВМ

Общая организация программ для ЭВМ позволяла произвести расчеты величин  $m_s(\omega_i)$  и  $m_p(\omega_i)$  по формулам /6/, /8/ и /7/, /9/ для каждого значения текущей частоты  $\omega_i$ , при выбранной совокупности параметров измерительных контуров, и заданном коэффициенте усиления E. Дискретный набор  $\omega_i$  охватывал диапазон изменения частоты от  $\omega_a$  до  $\omega_b$  длиной в 240 кГц или 360 кГц, разбитый на 60 равных интервалов. Центральная частота диапазона, частота собственного резонанса контура,  $\omega_r = \frac{\omega_b - \omega_a}{2}$  составляла около 90 мГц. По вычисленным значениям  $m_s$  и  $m_p$  могли быть построены графики, показанные на рис.1, что позволяло проверить их соответствие реально наблюдаемому спектру ЯМР.

В процессе расчетов параметры R, L, G, l, y и p варьировались в определенных пределах, а емкость C подбиралась в специальной подпрограмме так, чтобы приемный контур был настроен в резонанс. При расчетах, соответствующих режиму рабо-

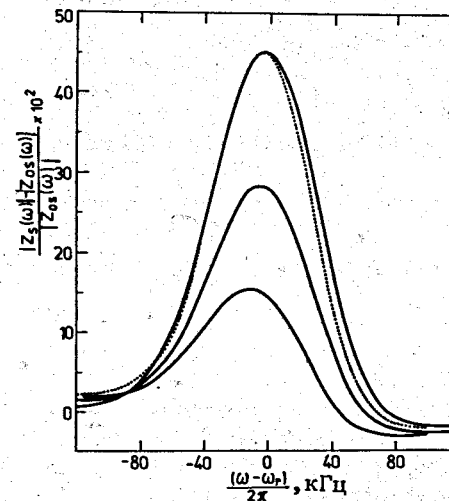


Рис.1. Расчетные спектры поглощения ЯМР, получаемые на выходе SQ-метра. Сплошные кривые проведены для разных значений затухания в кабеле: a, 2a, 3a; пунктирная кривая - спектр на выходе SQ-метра с ФАП: S = 10<sup>6</sup>, параметры контура те же, что для верхней сплошной кривой.

ты Q-метра без ФАП, значение емкости  $C_0$  подбиралось один раз для данной совокупности параметров; при этом осуществлялась настройка контура на центральную частоту  $\omega_r$ . Критерием настройки было равенство нулю величины  $\phi_0 = \arctg \left\{ \frac{\text{Im}[Z_0(\omega_r)]}{\text{Re}[Z_0(\omega_r)]} \right\}$  /практически достаточно  $\phi_0 \leq 10^{-6}$  /, ответственной за фазовый сдвиг вынужденных колебаний того или иного контура. При имитации работы ФАП текущее значение емкости  $C_1$  определялось для каждой частоты  $\omega_i$ , причем  $C_1$  должны отвечать таким значениям текущей фазы  $\Psi_i$ , что

$$\Psi_i = \phi_i / S,$$

где  $\phi_i$  - фаза, полученная при  $C=C_0$ , но на частоте  $\omega_i$ , а  $S$  - коэффициент уменьшения фазового сдвига, характеризующий качество ФАП. Таким образом, при вычислении элементов каждого из массивов  $m_s(\omega_i)$  или  $m_p(\omega_i)$  в режиме ФАП с заданным  $S$  использовались по два набора  $C_i$ :  $C_i^s$  и  $C_i^{s0}$  для расчета  $Z_s(\omega_i)$  и  $Z_{s0}(\omega_i)$  или  $C_i^p$  и  $C_i^{p0}$  для расчета  $Z_p(\omega_i)$  и  $Z_{p0}(\omega_i)$ .

По вычисленным значениям полных импедансов можно было снова получать величины фазовых сдвигов /их графики подобны приведенным в работе /4/ /, что позволило судить о том, что мы правильно моделируем режим работы Q-метра с ФАП.

Форма линии спектра поглощения задавалась в виде либо функции Гаусса:

$$\chi''(\omega) = K_G \exp \left[ -\left( \frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega_G} \right)^2 \right],$$

либо функции Лоренца:

$$\chi''(\omega) = K_L \frac{1}{1 + \frac{4}{3} \left( \frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega_L} \right)^2},$$

где  $\Delta\omega$  - полуширина, величина которой устанавливалась:

$$\Delta\omega_G \leq \frac{\omega_b - \omega_a}{6} \quad \text{и} \quad \Delta\omega_L \leq \frac{\omega_b - \omega_a}{9}; \quad K_G, K_L - \text{нормировочные множители; } \omega_0 = \omega_r.$$

Для вычисления дисперсии использовалось одно из соотношений Крамерса-Кронига /1/:

$$\chi'(\omega_i) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\chi''(\omega) \cdot \omega}{\omega^2 - \omega_i^2} d\omega,$$

где интеграл  $\int$  понимается в смысле его главного значения.

Величины  $E_m$  и  $\epsilon$  находились в соответствии с формулами /4/ и /5/. Интегрирование функций  $m_s$  и  $m_p$  выполнялось по методу Симпсона, что обеспечивало достаточную для наших целей точность.

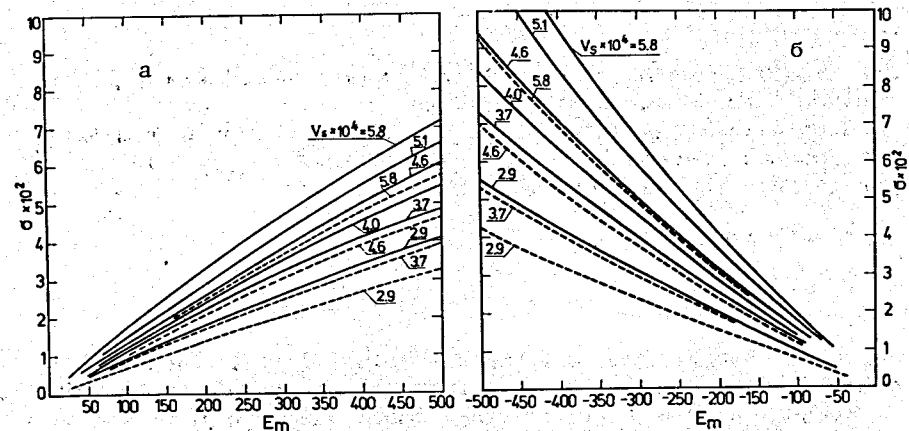


Рис.2. Систематические ошибки при измерении степени поляризации с помощью SQ-метра: а - положительная поляризация, б - отрицательная.

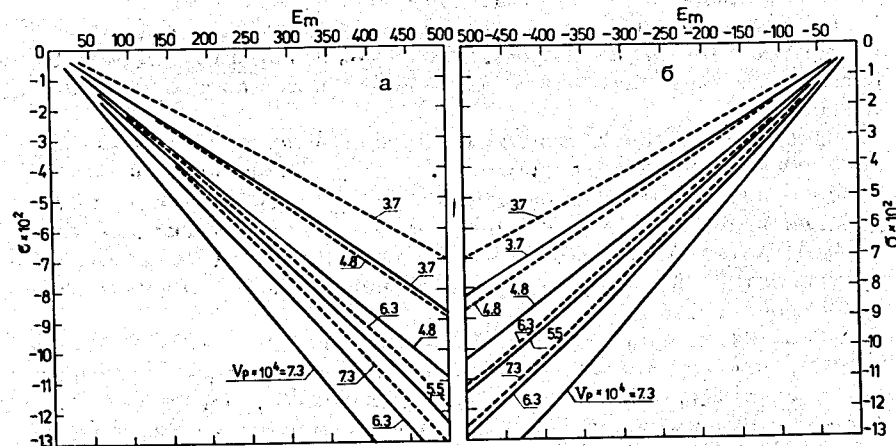


Рис.3. Систематические ошибки при измерении степени поляризации с помощью RQ-метра: а - положительная поляризация; б - отрицательная.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.2 и 3 приведены систематические ошибки, рассчитанные для SQ-метра и RQ-метра в зависимости от "измеренного" коэффициента усиления  $E_m$ . Сплошные кривые соответствуют гауссовой, а пунктирные - лоренцевой формам линий спектра поглощения ЯМР. Для удобства по оси ординат отложена величина  $\sigma$ , связанная с  $\epsilon$  из формулы /5/:

$$\epsilon = \text{sign}(P) \cdot \sigma,$$

где  $\text{sign}(P)$  равна +1 или -1 для положительной или отрицательной поляризации соответственно.

Параметрами семейства кривых рис.2 и 3 служат величины  $V_s$  и  $V_p$ , равные максимальным значениям функций  $|m_s(\omega)|$ ,  $|m_p(\omega)|$  для сигнала термического равновесия:

$$V_s = |m_s(\omega)|_{\max} |_{E=1},$$

$$V_p = |m_p(\omega)|_{\max} |_{E=1}.$$

$V_s$  и  $V_p$  определяются чувствительностью Q-метров и величиной парамагнитной восприимчивости вещества при калибровке приборов.

Кривые рис.2 и 3 представляют собой наиболее типичные результаты, полученные при различных значениях параметров контуров и отобранные по двум критериям:

а/ значения величин  $|m_s|_{\max}$  и  $|m_p|_{\max}$  при  $E=500$  должны лежать в пределах от 0,15 до 0,35<sup>3/4</sup>;

б/ величина емкости  $C_0$ , подбираемая в каждом случае для настройки контура в резонанс /зависимый параметр/, должна быть больше величины паразитной входной емкости первого каскада Q-метра.

Приведем основные результаты изучения влияния параметров приемного контура на величины  $V_s$  и  $V_p$ . Попутно отметим изменение характера зависимости  $\sigma(E_m)$  по сравнению с приведенными кривыми, в тех случаях, когда таковые имеют место.

Чувствительность обоих Q-метров растет с увеличением индуктивности L. Ограничения по L связаны только с минимально возможной величиной  $C_0$ .

Малые отклонения длины кабеля  $\Delta l$  от  $l_0 = n \cdot \lambda / 2$  / n - целое число/, изменяя характер его собственной проводимости, приводят к увеличению, при  $\Delta l < 0$ , или уменьшению, при  $\Delta l > 0$ , требуемой величины  $C_0$  и несущественно изменяют величины  $V_s$  и  $V_p$ . Так, например, для SQ-метра при удлинении кабеля на 1 и 3%  $V_s$  увеличивается на 7% и 9% соответственно, а такое же укорочение уменьшает  $V_s$  на 6% и 14%. Для PQ-метра при тех же изменениях длины кабеля  $V_p$  меняется не более чем на 2%. В случае SQ-метра при удлинении кабеля на 1%  $\sigma_s$  при  $E_m=500$  увеличивается на  $0,8 \times 10^{-2}$  по сравнению с величиной, получаемой из графика рис.2. Удлинение кабеля более чем на 1% потребует уменьшения емкости до минимально возможной величины. Укорочение кабеля вплоть до  $\Delta l / l_0 = -10\%$  приводит к уменьшению  $V_s$  и зависимости  $\sigma_s(E_m)$  в соответствии с кривыми рис.2. Систематические погрешности PQ-метра не изменяются, если длина кабеля отличается от резонансной в пределах  $\pm 6\%$ .

Вариации полного затухания в кабеле  $\alpha l$  по-разному влияют на ход кривых  $\sigma(E_m)$  для PQ-метра и SQ-метра. В первом случае возрастание  $\alpha l$  до значения  $\alpha l \approx 0,22$  Нп приводит к монотонному убыванию систематических ошибок, значения которых для  $V_p < 2,9 \cdot 10^{-4}$  можно найти экстраполяцией данных рис.3. В случае SQ-метра для  $\alpha l > 0,1$  Нп, хотя  $V_s$  уменьшается, величина  $\sigma_s$  даже для  $E_m=500$  падает незначительно, то есть соответствующие графики рис.2 будут почти сливаться. Такое поведение  $\sigma_s$  связано, по-видимому, с искажениями спектра, тенденцию к которым можно проследить по кривым рис.1.

Чувствительность Q-метра можно уменьшить введением последовательно в цепь распределенных колебательных контуров дополнительных сопротивлений, независимо от места присоединения - между кабелем и емкостью или между кабелем и индуктивностью. В наших расчетах при изменении суммарного последовательного активного сопротивления в два раза, например от 17,5 Ом до 35 Ом или от 10 Ом до 20 Ом,  $V_s$  и  $V_p$  уменьшались примерно на 20%. Тот же эффект достигался изменением активной проводимости конденсатора G от  $10^{-6}$  Ом<sup>-1</sup> до  $10^{-4}$  Ом<sup>-1</sup>.

$V_s$  и  $V_p$  растут при увеличении волнового сопротивления кабеля  $\rho$ . В наших расчетах при изменении  $\rho$  от 50 Ом до 150 Ом  $V_s$  и  $V_p$  увеличивались почти на 40%.

Данные, представленные в виде графиков на рис.2 и 3, проверялись для разных совокупностей параметров контуров. Последующие проверки проводились в условиях изменения области интегрирования функций  $m_s$  и  $m_p$ : область интегрирования увеличивалась в 1,5 раза или выбиралась так, что спектр оказывался смещенным на 1/3 от обычного диапазона изменений  $\omega_1$ . Во всех случаях, за исключением отмеченных выше, относительные отклонения вычисленных вновь  $\sigma_s$  и  $\sigma_p$  не превышали  $\pm 5\%$  по сравнению с результатами, приведенными на графиках рис.2 и 3 или полученными из них соответствующей интерполяцией.

Кривые рис.2 и 3 могут быть использованы для введения поправки на нелинейность Q-метров при измерениях поляризации протонов в поляризованных мишенях. Величины  $V_s$  и  $V_p$  можно измерить непосредственно, для чего полезно будет воспользоваться тем обстоятельством, что по крайней мере до значений  $E=20$   $|m_s|_{\max}$  и  $|m_p|_{\max}$  растут линейно с E, то есть для  $E \leq 20$ :

$$V_s = \frac{|m_s|_{\max}}{E}, \quad V_p = \frac{|m_p|_{\max}}{E}.$$

Перейдем к изложению результатов расчетов систем с ФАП. Отметим прежде всего, что с включением ФАП систематические погрешности PQ-метра увеличиваются. Это, по-видимому, является прямым следствием принципиального различия между параллельным и последовательным контурами.

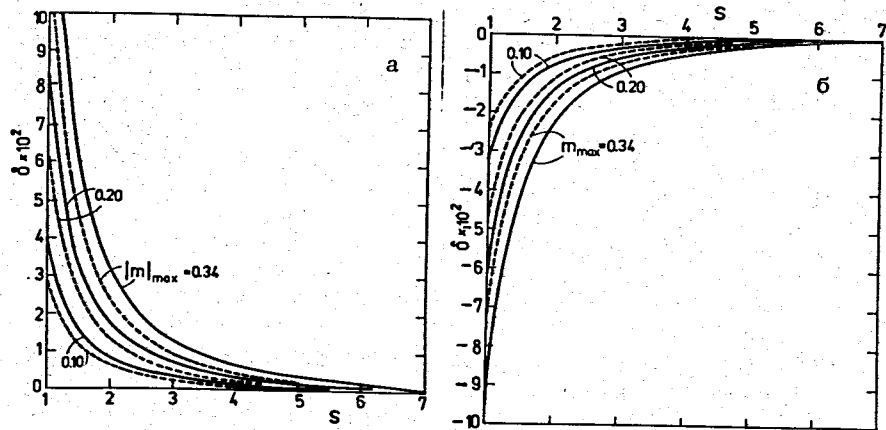


Рис. 4. Остаточные систематические ошибки при измерении степени поляризации с помощью SQ-метра с ФАП: а - отрицательная поляризация; б - положительная.

Изменения характера спектра, получаемого на выходе SQ-метра с ФАП, иллюстрирует рис. 1 /пунктирная кривая/. Интересно отметить, что асимптоты правой и левой ветвей кривой остаются с разными знаками. При увеличении глубины обратной связи ( $S \rightarrow \infty$ ) вклады обеих ветвей в интеграл по спектру взаимно уничтожаются.

На рис. 4 приведены зависимости кривых от коэффициента  $\delta$  уменьшения фазового набегу  $S$ . Величина  $\delta$  определена уравнением

$$E = E'_m(1 + \delta),$$

где  $E'_m$  - измеренное значение коэффициента усиления для системы с ФАП. Так же, как и на рис. 2 и 3, сплошные линии соответствуют гауссовой, а пунктирные - лоренцевой функциям формы линии спектра поглощения. Расчетные значения  $\delta$ , приведенные в работе [7], для  $S=3$  и примерно одинаковой чувствительности больше полученных нами на  $0,7 \cdot 10^{-2}$  и  $0,4 \cdot 10^{-2}$  для отрицательной и положительной поляризации соответственно. В отличие от результатов, изложенных в работах [4, 6], по нашим данным,  $\delta$  асимптотически стремится к нулю, и погрешности становятся пренебрежимо малыми при  $S > 6$ . Причина различия результатов кроется, вероятно, в процедуре подстройки контура, принятой в расчетах.

Кривые рис. 4 могут быть использованы для коррекции результатов измерения поляризации с помощью SQ-метра с ФАП. Начало каждой кривой лежит в точке на оси  $\delta$ , соответствующей величине поправки при  $S=1$ , то есть когда ФАП не включена. Для

пользования кривыми при малых значениях  $S$  необходимо определить  $\sigma_s$  по графикам рис. 2, чтобы правильно выбрать рабочую кривую рис. 4.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения поляризации мишеней по сигналу ЯМР лучше всего подходит Q-метр с последовательным контуром. Этот прибор обеспечит измерения с меньшими систематическими ошибками, а при включении ФАП принципиально возможно осуществить Q-метр без систематических погрешностей. Однако для последовательного Q-метра требуется тщательный подбор кабеля: полное затухание должно быть как можно меньше, во всяком случае  $\alpha l < 0,1$  Нп, а длина не должна отличаться более чем на +1% и -6% от  $l_0 = \pi \lambda / 2$ .

Для Q-метра с параллельным контуром требования к кабелю менее жесткие. Ограничения по затуханию наложены только требованием достаточной чувствительности контура для регистрации сигнала термического равновесия, а допустимая неточность в подборе длины  $\Delta l / l_0 = \pm 6\%$  при  $l_0 = \pi \lambda / 2$ .

Авторы благодарят профессора Ю.М.Казаринова и Б.С.Неганова за интерес к работе и полезные обсуждения, Н.С.Борисова и А.Б.Неганова за плодотворные дискуссии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрагам А. Ядерный магнетизм. ИЛ, М., 1963.
2. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. "Энергия", М.-Л., 1965.
3. Petříček V., Odehnal M. Nucl. Instr. and Meth., 1967, 52, p.197.
4. Petříček V. Nucl. Instr. and Meth., 1968, 58, p.111.
5. Hill J.J., Hill D.A. Nucl. Instr. and Meth., 1974, 116, p.269.
6. Киселев Ю.Ф., Сапожников А.П. ОИЯИ, Р13-10694, Дубна, 1977.
7. Киселев Ю.Ф., Матафонов В.Н. ОИЯИ, Р13-10101, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 июня 1981 года.