

ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО ЯДЕРНОГО МАГНИТОМЕТРА

*А. Г. Гордиенко, В. И. Леонидов, Е. Г. Сухотин,
А. П. Тимошенко*

Харьков

Современная метрология стремится свести измерения электрических и неэлектрических величин к измерению частоты. При методе ядерного магнитного резонанса (я. м. р.), измерения напряженности магнитного поля (H) сводятся к измерению частоты

электромагнитных колебаний. Метод я. м. р. обеспечивает абсолютное, однозначное и мгновенное измерение H с точностью, приближающейся к точности измерения ядерной физической константы — гиромангнитного отношения (γ), для протонов это составляет $\gamma = 2 \cdot 10^{-5}$. Работа ядерного магнитометра (я. м.) Е11-2 основана на использовании явления я. м. р.

Физические основы я. м. р. на основании квантовой теории [1]. Многие ядра обладают магнитным μ и механическим I моментами. Если такие ядра поместить в постоянное магнитное поле H , ядро атома может принять лишь вполне определенные ориентации, число которых равно $2I + 1$. Каждой ориентации соответствует вполне определенная энергия (энергетический уровень). Для атома водорода (протона) механический момент $I = \frac{1}{2}$, а число энергетических уровней в магнитном поле равно двум: E_1 и E_2 . Одна ориентация магнитного момента является параллельной, другая — антипараллельной относительно постоянного магнитного поля H_0 . Разность энергий ΔE , соответствующих этим двум состояниям ядра водорода, равна μH , а энергия, необходимая для реориентации магнитного момента из одного состояния E_1 в другое — E_2 (из параллельной в антипараллельную), — энергия кванта $h\nu_0$, где h — постоянная Планка; ν_0 — частота электромагнитного излучения. Условие я. м. р. выполняется тогда, когда квант высокочастотной энергии равен разности энергий E_1 и E_2 . Это условие записывается следующим образом:

$$\Delta E = \frac{\mu H_0}{I} = h\nu_0. \quad (1)$$

Величины μ и I являются физическими постоянными, характеризующими свойства ядер элементов и изотопов. Если ввести в выражение ядерное гиромангнитное отношение $\gamma = \mu/\hbar I$, где $\hbar = h/2\pi$, условие я. м. р. можно выразить следующей зависимостью:

$$2\pi\nu_0 = H\gamma. \quad (2)$$

Чтобы вызывать переходы между энергетическими уровнями, магнитная составляющая H_1 высокочастотного излучения должна быть перпендикулярна к постоянному магнитному полю H_0 , в котором располагается образец. При этом магнитное поле H_1 должно вращаться вокруг H_0 синхронно с процессией магнитного диполя исследуемого вещества.

При соблюдении условия (2) происходит поглощение высокочастотной энергии магнитного поля веществом датчика, добротность катушки при этом уменьшается, а следовательно, уменьшается и напряжение в ней. Для удобства регистрации я. м. р. исследуемое поле модулируется синусоидальным низкочастотным полем. Таким образом, резонансные условия соблюдаются в моменты, когда модулирующее поле имеет нулевые значения и с

катушки снимаются сигналы поглощения с удвоенной частотой подмагничивающего поля. Сигналы поглощения регистрируются осциллографом или измерительным прибором.

Рассмотрим основные характеристики я. м. Е11-2. Диапазон измеряемых магнитных полей $H=0,25$ кэ, пределы изменения частоты автогенератора составляют $1,05 + 16,5$ Мгц, предельная неоднородность поля, при которой возможны измерения 0,2% на сантиметр длины. Для перекрытия указанного диапазона в я. м. применяются три типа датчиков: протонные, литиевый и дейтериевый. Применение трех типов датчиков объясняется тем, что при максимальной частоте автогенератора $f_{\max} = 16,5$ Мгц для измерения $H_{\max} \approx 25$ кэ необходимо использовать вещества с меньшими значениями γ , чем у протонов. Это следует из равенства (2). Данным требованиям удовлетворяют химически устойчивые вещества литий и дейтерий.

Таблица 1

Элемент	Символ	$\gamma \cdot 10^4 \text{сек}^{-1} \text{г}^{-1}$	Спин
Протоны	H	1,675	1/2
Литий	Li	0,98	3/2
Дейтерий	D	0,43	1

В табл. 1 приводятся величины гиромангнитных отношений, механических моментов, максимальное значение H , которое можно измерить с помощью соответствующих датчиков при $f_{\max} = 16,5$ Мгц.

При наблюдении я. м. р. существенную роль играет величина ядерного сигнала поглощения (отношения сигнал/шум). Ядерные сигналы поглощения относятся к пороговым сигналам, поэтому весьма важно применять для датчиков вещество с максимальным удельным коэффициентом поглощения высокочастотной энергии. Величина сигнала поглощения зависит от физических и ядерных констант, а также от параметров аппаратуры.

Амплитуду сигнала поглощения определяем из выражения [1]

$$U = \frac{\gamma h N_0 \alpha I (I + 1) (V_{\kappa} T_2 f^3 R_s)^{1/2}}{k T T_1^{1/2} 10^{3/2}}, \quad (3)$$

где I — спин ядер; N_0 — количество ядер в единице объема датчика; γ — гиромангнитное отношение; h — постоянная Планка; V_{κ} — объем В. Ч. катушки; α — коэффициент заполнения ампулы; R_s — эквивалентное сопротивление катушки; f — частота; k — постоянная Больцмана; T — температура; T_1, T_2 — время продольной и поперечной релаксаций.

Максимальную амплитуду поглощения имеют протонные датчики при одних и тех же аппаратурных параметрах $f, V_{\kappa}, \alpha, R_s, T$ и одинаковом времени релаксации T_1 и T_2 . С литиевыми датчиками чувствительности я. м. меньше в 12 раз, с дейтериновыми — в

50 раз по сравнению с чувствительностью я. м. при использовании протонных датчиков [2]. Таким образом, использование я. м. Е11-2 для измерения H выше 3,8 кэ вызывает большие затруднения и возможно только при высокой однородности поля.

Предлагаемая модернизация я. м. Е11-2 при минимальной переделке прибора заключается в повышении чувствительности за счет повышения частоты генератора до 50 Мгц. Это позволяет использовать более чувствительные протонные датчики в более широком диапазоне $H = 0,25 \div 11,7$ кэ поля с напряженностью $11,7 \div 25,0$ кэ измеряются литиевыми датчиками; наименее чувствительные дейтериевые датчики исключаются.

Ниже описываются два варианта модернизации я. м. Е11-2. В первом случае использован протонно-литиевый датчик № 3, который придается к прибору. Резонансная частота колебательного контура повышается до 50 мгц путем включения дополнительных

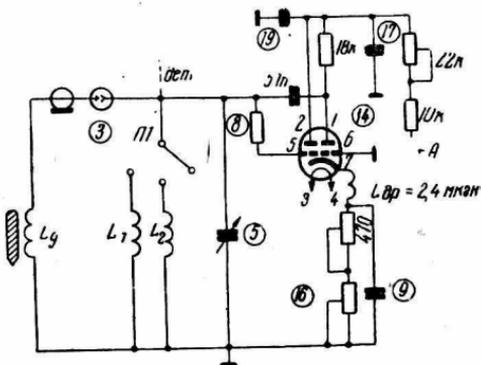


Рис. 1. Принципиальная схема модернизированного автогенератора ядерного магнитометра.

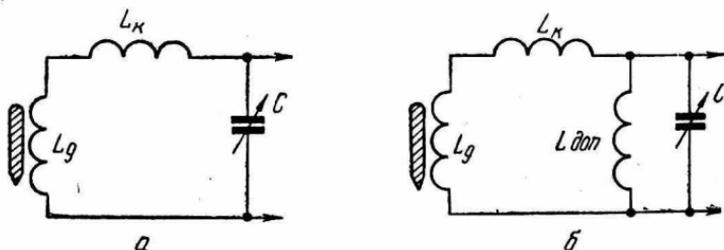


Рис. 2. Эквивалентная схема сложного колебательного контура:

а — без дополнительной индуктивности; б — с дополнительной индуктивностью.

катушек индуктивности ($L_{доп}$) L_1 и L_2 . На рис. 1 представлена видоизмененная схема автогенератора. В схеме вместо резистора R 15, включенного в катодную цепь, установлен дроссель. Добавленные и измененные элементы приведены с указанием их данных.

На рис 2, а приведена эквивалентная схема колебательного контура автогенератора я. м. Е 11-2, в состав которого входит индуктивность датчика L_g и отрезок В.Ч кабеля, который соединяет катушку датчика со схемой автогенератора. Рассмотрев работу сложного контура, индуктивность датчика L_g можно

заменить эквивалентной к. з. длиной линией. Если выполняется условие, при котором суммарная длина соединительного кабеля и эквивалентной к. з. длиной линии не превышает $\lambda_k/4$, входное сопротивление цепи кабель — датчик имеет индуктивный характер и определяется величиной $L_{\Sigma} = L_g + L_k$. Резонансная частота сложного колебательного контура определяется суммарной индуктивностью и емкостью. Учитывая конструктивные параметры колебательного контура (индуктивность катушки датчика $L_g = 2,3 \text{ мкГн}$ длину соединительного кабеля, равную 100 см) максимальная частота автогенератора м. Е11-2 не превышает 16,5 МГц.

Предлагается повысить максимальную частоту автогенератора уменьшением суммарной индуктивности контура и путем включения дополнительной катушки индуктивности $L_{\text{доп}}$ параллельно L_{Σ} (см. рис. 2, б).

Рассмотрим, как изменяется входное сопротивление короткозамкнутой электрической цепи, состоящей из сосредоточенной индуктивности датчика L_g и отрезка длиной линии, обладающего распределенными параметрами индуктивности и емкости. Длину к. з. длиной линии, эквивалентной индуктивности датчика, можно определить по формуле

$$l_{\Sigma} = \frac{\lambda_k}{2\pi} \arctg \frac{Z_{\text{вх}}}{\rho}, \quad (4)$$

где $Z_{\text{вх}}$ — входное сопротивление к. з. длиной линии, эквивалентной L_g , т. е. $L_{\text{вх}} = 2\pi f L_g$; ρ — волновое сопротивление кабеля; λ_k — длина волны в кабеле; $\lambda_k = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon}$. Как видно из формулы (4), длина эквивалентной к. з. длиной линии зависит от частоты. Это означает, что суммарная длина соединительного кабеля и эквивалентной к. з. длиной линии l_{Σ} не остается постоянной в диапазоне частот. Характер входного сопротивления суммарного кабеля (к.з) рассматривается графически на рис. 3. На рисунке уже также приведена экспериментальная кривая $l_{\Sigma}(f)$. Из графика видно, что изменение входного сопротивления происходит в точке В, что соответствует частоте 20,5 МГц. Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что до частоты 20,5 МГц электрическая цепь датчик—кабель имеет эквивалентную длину

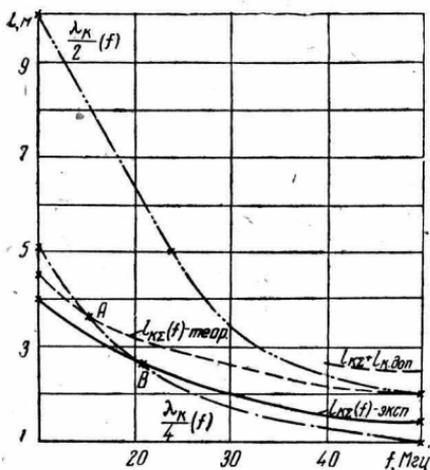


Рис. 3. График для выбора длин высокочастотного кабеля в зависимости от генерируемой частоты ($l_{\text{кз}}$ — длина суммарного кабеля). Для случая $l_k = 1 \text{ м}$, $l_g = 2,32 \text{ мкГн}$ при $l_{\text{кз}} < \lambda_k/4$ входное сопротивление имеет индуктивный характер, при $l_{\text{кз}} > \lambda_k/4$ — емкостный характер.

меньше $\lambda_k/4$, т. е. ее входное сопротивление имеет индуктивный характер. На частоте 20,5 Мгц эта цепь ведет себя как параллельный колебательный контур. На частотах выше 20,5 Мгц входное сопротивление цепи меняется, т. е. становится емкостным. В таком случае дополнительная индуктивность совершенно необходима, иначе в состав контура не входила бы индуктивность. С увеличением частоты эквивалентная длина цепи датчик — кабель приближается к $\lambda_k/2$, т. е. входное сопротивление уменьшается и стремится к нулю.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что, начиная с частоты 40 Мгц, добротность контура быстро уменьшается и условия самовозбуждения автогенератора нарушаются, поэтому для перекрытия диапазона 40 ÷ 50 Мгц длина соединительного кабеля увеличивается на величину, при которой длина будет больше $\lambda_k/2$. В нашем случае длина дополнительного кабеля составляла 1 м, всего длина кабеля равнялась двум метрам, входное сопротивление индуктивное.

Исходя из минимальных конструктивных изменений в приборе Е 11-2 для перекрытия диапазона 16—50 Мгц используется имеющийся в нем переменный конденсатор с параметрами $C_{\min} = 40$ пф; $C_{\max} = 340$ пф (с учетом монтажных и паразитных емкостей). Суммарная индуктивность контура без дополнительной индуктивности равна или больше $L_g = 2,32$ мкгн. В этом случае максимальная частота равна 16 Мгц. Включая различные дополнительные катушки индуктивности параллельно цепи кабель-датчик, осуществляется перекрытие диапазона 16—50 Мгц.

Таблица 2

Тип датчика	$H, кэ$	$f, Мгц$	$L_{\text{доп.}} \text{ мкгн}$	$L_k \text{ доп. м}$
Протонный	3,8—6,5	16—28	0,5	—
»	6; 5—9,35	28—40	0,1	—
»	9,35—11,7	40—50	0,1	1
Литиевый	10—17,5	16—28	0,5	—
»	17,5—25,2	28—40	0,1	—

В табл. 2 приведена величина индуктивностей дополнительных катушек и длина дополнительного кабеля по поддиапазнам для протонных и литиевых датчиков, с помощью которых покрывается измеряемый диапазон $H = 3,8—25$ кэ. Таблица составлена для случая, когда применяется стандартный протонно-литиевый датчик № 3 с индуктивностью, равной 2,32 мкгн.

Второй вариант модернизации Е 11-2 предлагает уменьшение индуктивности датчика, которая, как правило, выбирается таким образом, чтобы входное сопротивление эквивалентной к. з. линии носило индуктивный характер, и составляет 0,1 мкгн. Длина соединительного кабеля остается постоянной во всем диапазоне частот и равна длине кабеля, прилагаемого к я. м. Е 11-2 один метр (табл. 3).

Таблица 3

Тип датчика	$H, \text{кэ}$	$t, \text{Мсц}$	$L_{\text{доп}}, \text{мкГн}$
Протонный	3,8 ÷ 6,5	16 ÷ 2	0,5
»	6,5 ÷ 11,7	28 ÷ 50	0,1
Литиевый	10 ÷ 17,5	16 ÷ 28	0,5
»	17,5 ÷ 25,2	28 ÷ 40	0,1

В модернизированном ядерном магнитометре Е 11-2, у которого максимальная частота повышается до 50 МГц, чувствительность повышается в диапазоне 3,8—10,4 кэ в 12 раз, в диапазоне 10,4—12,0 кэ в 50 раз, в диапазоне 12—25 кэ в пять раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Леше. Ядерная индукция. Изд-во иностр. лит-ры, 1963.
2. А. Г. Гордиенко, И. О. Антоненко, Г. А. Акопьян. «Автоматика и приборостроение», 1962, № 3.
3. А. Г. Гордиенко, Н. И. Ежов. Сб. «Приборы и системы автоматки», вып 12. Харьков, Изд-во ХГУ, 1969.