

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Р. М. УМАРХОДЖАЕВ

СПИНОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

Наиболее перспективным устройством, непрерывно и точно измеряющим величину магнитного поля и следящим за ней, является спиновый генератор. Спиновый генератор представляет собой автоколебательную систему, содержащую в качестве избирательного элемента систему ядерных спинов, помещенных в магнитное поле. Устройство, генерирующее напряжение с частотой, близкой к частоте ларморовской прецессии, описано в [1, 2, 3]: В генератор входят: усилитель с коэффициентом усиления $K=10^5-10^6$, приемная и передающая катушки, необходимые для замыкания петли обратной связи; катушки «скрещены» и между ними нет никакой связи, напряжение на приемной катушке появляется лишь при наличии в ней ядер и выполнении резонансных условий. В работе [3] вместо «скрещенных» катушек использована мостиковая схема компенсации [4]. В обоих случаях степень компенсации порядка 100 дБл. Отсутствие стабильной и широкополосной схемы компенсации приводит к неустойчивой работе и к невозможности большой частотной перестройки такого устройства.

Применение низкочастотной модуляции [5] позволило отказаться от схемы компенсации и создать надежно работающий спиновый генератор [6, 7]. Однако генерируемая схемой частота Ω равна разности частот ω_r и ω_l , где ω_l — ларморовская частота прецессии, ω_r — близкая к ω_l частота задающего генератора. Зная значения частот Ω и ω_r , можно найти величину измеряемого магнитного поля H_0 . Стабильность ω_r определяет точность измерения H_0 . Широкодиапазонные измерения величины с высокой точностью требуют перестраиваемых генераторов с высокой стабильностью.

Рассмотрим спиновый генератор, генерирующий напряжение с частотой, равной частоте ларморовской прецессии ω_0 , и не имеющий схемы компенсации. Блок-схема этого генератора представлена на рис. 1: 1 — постоянный магнит, создающий поле

$H_0 = \frac{\omega_0}{\gamma}$, γ — гиромагнитное отношение; 2 — катушка модуляции, создающие пере-

менное поле с частотой p ; 3 — независимый генератор частоты p ; 4 — контур с об-
разцом, настроенный на частоту $\omega_0 + p$; 5 — усилитель частоты $\omega_0 + p$; 6 — смеситель;
7 — усилитель частоты ω_0 . Работа схемы основана на использовании свойств цент-
ральной «боковой» полосы, возникающей при модуляции магнитного поля. Величина
сигнала поглощения этого компонента во вращающейся системе координат равна [5]

$$v = \frac{\gamma H_1 I_0 I_1 T_2 M_0}{1 + \Delta\omega_0^2 T_2^2 + \gamma^2 H_1^2 T_1 T_2 I_0^2} \left(\frac{\Delta\omega}{T_2} \cos pt + \sin pt \right),$$

где H_1 — амплитуда высокочастотного поля, действующего на ядра (частота ω_r);
 T_1, T_2 — времена релаксации, I_0, I_1 — функции Бесселя, $\Delta\omega_0 = \omega_0 - \omega_r$. Появление
этой гармоники объясняется нелинейными свойствами системы ядерных спинов.

Наводимая э.д.с. ЯМР сигнала принимается на частоте $\omega_r + p$ и имеет макси-
мум при $\Delta\omega_0 = 0$. Принятый сигнал в смесителе смешивается с частотой p и усилен-
ный на частоте $\omega_0 = \omega_r$ подается на ядра. Без ядер и дополнительной частоты p
в схеме нет колебаний. Практически спиновый генератор выполнен по следующей
блок-схеме (рис. 2):

1 — магнит, поле $H_0 \sim 5000$ эрст, $f = \frac{\omega}{2\pi} = 21 \cdot 10^6$ гц; 2 — катушки модуляции,
создающие переменное поле с амплитудой 50 эрст и частотой 100 кГц; 3 — кварцевый

генератор 100 кГц; 4 — контур с образцом, настроенный на частоту $(2,1 \pm 0,1) \cdot 10^6$ гц; 5 — усилитель УВЧ, частота $(21 \pm 0,1) \cdot 10^6$ гц; 6 — смеситель; 7 — гетеродин; 8 — усилитель УПЧ ($455 \cdot 10^3$ гц); 9 — полукольцевой смеситель; 10 — усилитель УПЧ (555 кГц); 11 — смеситель; 12 — ограничитель; 13 — усилитель УВЧ ($21 \cdot 10^6$ гц).

В УПЧ- $455 \cdot 10^3$ гц применена простая АРУ. Генерируемая частота $21 \cdot 10^6$ гц. Сигнал/шум ~ 20 . Область слежения за магнитным полем (~ 2 кГц) определяется полосой пропускания УПЧ- $555 \cdot 10^3$ гц.

Возможны ограничения амплитуды колебаний как со стороны ядер (за счет насыщения), так и со стороны радиосхемы. Уровень ограничения регулируем. Рабочее

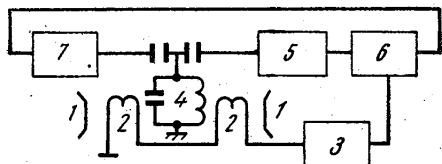


Рис. 1

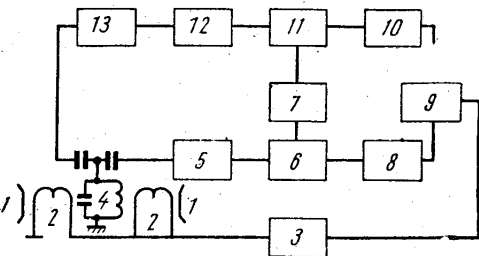


Рис. 2

вещество — протонсодержащая жидкость. Схема устойчиво работает при T_1, T_2 от 10^{-1} до 10^{-4} сек. Коэффициент усиления $K \sim 10^6$; при $K > 10^6$ схема входит в режим паразитной генерации на частоте 455 кГц. Максимальная неоднородность H_0 , при которой возможна устойчивая работа $\sim 10^{-3}$.

Расчет, проведенный с использованием уравнений Блоха и колебательного уравнения при отсутствии насыщения, дает стационарную частоту

$$\omega = \frac{\omega_0 + \omega_K \frac{Q_p}{Q_y} + p \frac{Q_p}{Q_y}}{1 + \frac{Q_p}{Q_y}} \quad (1)$$

где ω_0 — ларморовская частота процессии, ω_K — резонансная частота радиосхемы,

p — частота модуляции магнитного поля, Q_p — добротность радиосхемы, $Q_y = \frac{1}{2} \omega_0 T_2$, добротность системы ядерных спинов.

Экспериментальная оценка показывает, что нестабильность генератора меньше, чем 10^{-7} . Эта величина обусловлена нестабильностью гетеродина (см. (1)), так как величина ω_K определяется частотой гетеродина. Используя явление «затягивания» (1) и применяя низкочастотную модуляцию (2 гц), можно получить сигнал ошибки, управляющий частотой гетеродина. В этом случае область слежения спинового генератора определяется полосой пропускания входного контура и в нашем случае равна 200 кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schmelzer C. H. Lectures on the theory and design of an alternating gradient proton-synchrotron. Geneva, 1953.
2. Fechner, Storek. Hochfrequenzspektroskopie. Leipzig, 1961.
3. Веселзго В. Г. «Радиотехника и электроника», 5, 849, 1961.
4. Лёше А. Ядерная индукция. ИЛ, М., 1963.
5. Anderson W. A. EPR and NMR spectroscopy, NY, 1961.
6. Проспект спектрометра фирмы Varcan A-60, NY, 1960.
7. Владимирский К. В., Лабзов Б. А. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 1961.

Поступила в редакцию
27. I 1964 г.

Кафедра
общей и химической физики