

## РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СПИНОВОГО ГЕНЕРАТОРА

In article the device called as a spin oscillator is considered. The device is intended for filing a signal of nuclear magnetic resonance. The scheme and model of the generator are reduced.

Для измерения магнитных полей с высокой степенью точности, а также для количественного и качественного анализа состава веществ можно использовать специализированный спектрометр ядерного магнитного резонанса (ЯМР), называемый спиновым генератором [1].

Спиновый генератор — это маломощный высокочастотный генератор, принцип действия которого основан на возникновении колебаний в системе ядерные спины — усилитель. Данное устройство состоит из приемной катушки, подключенной к входу высокочастотного усилителя, и передающей — к выходу этого усилителя. Катушки ориентированы таким образом, чтобы их оси были ортогональны к направлению постоянного магнитного поля. Приемная катушка содержит вещество с резонирующими ядрами [2]. Усилитель с большим коэффициентом усиления (обычно порядка  $10^5$ ) должен быть широкополосным и, следовательно, не может содержать резонансных цепей. Структурная схема спинового генератора приведена на рис. 1.

Принцип работы спинового генератора состоит в следующем. Пусть в начальный момент времени система ядерных спинов, помещенная в постоянное магнитное поле с напряженностью  $H_z$ , находится в покое. Тогда отдельные ядерные моменты прецессируют с резонансной частотой, определяемой соотношением:

$$\omega_0 = \gamma H_z, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — гиромангнитное отношение.

Фазы их прецессии распределены статистически, поэтому макроскопически измеримая проекция суммарной намагниченности на плоскость, ортогональную полю ( $M_{\perp}$ ), отсутствует. Через передающую катушку протекает лишь шумовой ток усилителя. В составе спектра шумов содержится также и частота  $\omega_0$ , таким образом на спиновую систему воздействует поле  $H_1$  резонансной частоты  $\omega_0$ . Оно оказывает некоторое ориентирующее действие на прецессирующие ядра, вследствие чего в приемной катушке индуцируется переменное напряжение, которое после соответствующего усиления оказывает дальнейшее влияние на ориентацию ядерных моментов через передающую катушку. Таким образом, в системе «ядерные спины — усилитель» возникают ко-

лебания, амплитуда которых ограничивается явлением насыщения. Частота этого спинового генератора зависит от  $\omega_0$ , т. е. от гиромангнитного отношения резонирующих ядер и величины магнитного поля в месте расположения образца.

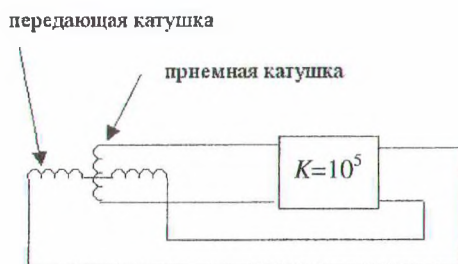


Рис. 1. Структурная схема спинового генератора

В качестве усилительного каскада используются дифференциальные усилители, выполненные на биполярных транзисторах VT1 — VT4 (рис. 2). Значения сопротивлений резисторов выбирались из условия, чтобы общий коэффициент усиления сигнала составлял величину, приблизительно равную  $10^5$ . Все расчеты получены при условии, что значениями сопротивлений конденсаторов C2, C3 на частоте генерации можно пренебречь [3]. Общий коэффициент усиления можно определить как произведение передаточных функций всех последовательно стоящих каскадов. Для каждого каскада коэффициент определяется из условия, что входной сигнал оказывается дважды приложенным к переходу эмиттер — база любого транзистора. В результате получим, что выходное напряжение всего каскада примет вид

$$U_{out} = R_4 R_2 \left( \frac{R_2 (U_{in} + E - U_{be}) U_{in}}{4 \varphi_t R_8} + E - U_{be} \right) (U_{in} + E - U_{be}) (16 \varphi_t^2 R_7 R_8)^{-1}, \quad (2)$$

где  $U_{in}$  — напряжение, наводимое на входе первого дифференциального усилителя;  $E$  — напряжение питания;  $U_{be}$  — падение напряжения на эмиттерном переходе,  $\varphi_t$  — термодинамический потенциал. После простых преобразований с учетом того, что сопротивления эмиттерных и коллекторных ветвей каждого из каскадов равны друг другу, получаем выражение, связывающее входное и выходное напряжения усилителя:

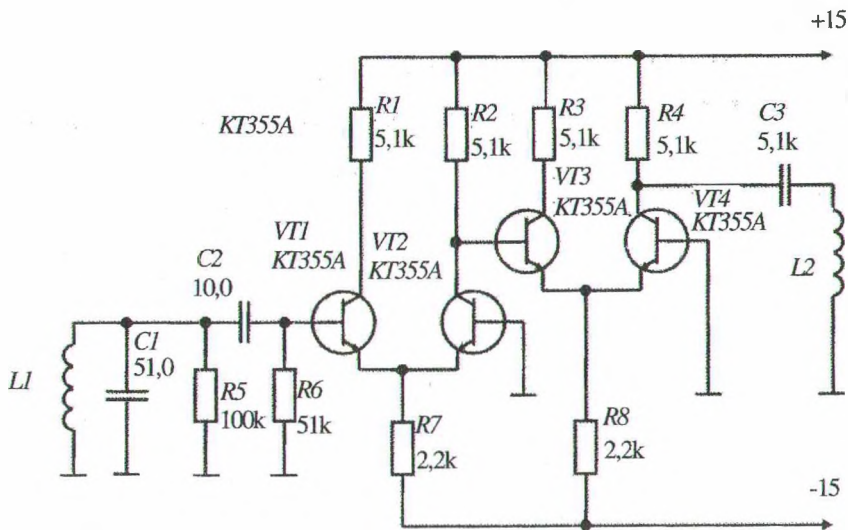


Рис. 2. Схема усилительного каскада

$$U_{out} = R_1^2 U_{in} (R_1 U_{in}^3 + 2R_1 U_{in}^2 (E - U_{be}) + R_1 U_{in} (E - U_{be})^2 + 4U_{in} (E - U_{be}) \varphi_1 R_8 + 4(E - U_{be})^2 \varphi_1 R_8. \quad (3)$$

При построении модели спинового генератора ставится задача нахождения зависимости между параметрами, которые характеризуют спиновые взаимодействия атомов вещества, обусловленные влиянием внешнего магнитного поля, с параметрами, которые уже можно фиксировать с помощью электротехнических методов. Небольшой избыток моментов, ориентированных по направлению внешнего поля, обуславливает появление магнитного момента единицы объема (ядерной намагниченности). Переход от напряженности поля к величине намагниченности вещества в направлении поля реализуется через статическую магнитную восприимчивость  $\chi$  вещества:

$$M_z = \chi H_z. \quad (4)$$

Спиновый генератор позволяет преобразовать колебания вектора ядерной намагниченности в электрический сигнал. Под действием переменного магнитного поля спиновая система начинает поглощать энергию, которая поступает от передающей катушки. За счет этой энергии осуществляется поворот макроскопической ядерной намагниченности, ориентированной по направлению постоянного поля, задаваемой (4). Для такого поворота необходимо, чтобы поле  $H_1$  резонансной частоты  $\omega_0$ , создаваемое передающей катушкой, вращалось в сторону вращения прецессирующих ядерных моментов.

Поскольку передающая катушка выполнена в виде цилиндрического соленоида, то она создает колеблющееся по оси линейно поляризованное поле. Однако оно представляется как сумма двух вращающихся в противоположных направлениях полей, причем направление вращения одного из них совпадает с направлением вращения ядерных моментов, что заставляет ядерные моменты синхронно отклоняться от первоначального намагничивающего поля. При этом возникает ненулевая макроскопически измеримая проекция суммарной намагниченности на плоскость, ортогональную намагничивающему полю, т. е.  $M_{\perp}$  становится не равной нулю. Поскольку  $M_{\perp}$  вращается с частотой  $\omega_0$  и расфазировка моментов происходит мгновенно, а с временем спин-спиновой или поперечной релаксации  $T_2$ , то появившаяся компонента намагниченности  $M_{\perp}$  приводит в приемной катушке электродвижущую силу, т. е. под действием прецессии ядерных моментов в окружающей обмотке приемной катушке индуцируется напряжение.

В качестве рабочего тела для изучения работы данного устройства были использованы протоны в воде при комнатной температуре в постоянном магнитном поле с индукцией  $B=0,2$  Тл. Намагничивающее поле создавалось в рабочем зазоре магнитной системы броневого типа, построенной на основе постоянных магнитов из феррита стронция 28СА250.

Рассмотренный механизм возникновения намагниченности на плоскость, ортогональную полю, т. е.  $M_{\perp}$ , описывается дифференциальными уравнениями, называемыми уравнениями Блоха:

$$\begin{cases} \frac{dM_x}{dt} - \gamma(M_y H_z - M_z H_y) + \frac{1}{T_2} M_x = 0, \\ \frac{dM_y}{dt} - \gamma(M_z H_x - M_x H_z) + \frac{1}{T_2} M_y = 0, \\ \frac{dM_z}{dt} - \gamma(M_x H_y - M_y H_x) + \frac{1}{T_2} M_z = \frac{1}{T_1} M, \end{cases} \quad (5)$$

где  $T_1$  — время продольной релаксации;  $M$  — равновесная намагниченность;  $M_x$  — проекция вектора ядерной намагниченности на ось  $Ox$ ;  $M_y$  — проекция вектора ядерной намагниченности на ось  $Oy$ ;  $H_x$  — проекция вектора резонансного радиочастотного поля на направление оси  $Ox$ ;  $H_y$  — проекция вектора резонансного радиочастотного поля на направление оси  $Oy$ ; ось  $Oz$  совпадает с направлением внешнего постоянного магнитного поля.

Закон электромагнитной индукции позволяет связать величину напряжения, наводимого в приемной катушке, с величиной магнитной индукции:

$$\begin{aligned} U_{in} &= -n \frac{d\Phi}{dt} = -nS \frac{dB}{dt} = \\ &= -ns \frac{d(VM_{\perp})}{dt} = -nsV \frac{dM_{\perp}}{dt}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток;  $S$  — площадь сечения одного витка приемной катушки;  $n$  — количество витков в приемной катушке;  $V$  — объем образца в приемной катушке.

После определенных преобразований с учетом выражения

$$U_{out} = L \frac{di_1}{dt}, \quad (7)$$

где  $L$  — индуктивность передающей катушки,  $i_1$  — ток в передающей катушке, создаваемый напряжением  $U_{out}$ ; а также с учетом намагниченности  $M_{\perp}$ , выраженной через ее проекции на оси  $Ox$  и  $Oy$ , напряженности поля  $H_1$ , которую в свою очередь можно представить в виде проекций  $H_x$  и  $H_y$  и уравнений Блоха (5), имеем математическую модель, которая с некоторым приближением будет описывать процессы, происходящие в спиновом генераторе:

$$\begin{cases} \frac{dM_x}{dt} - \gamma(M_y H_z - M_z H_y) + \frac{1}{T_2} M_x = 0, \\ \frac{dM_y}{dt} - \gamma(M_z H_x - M_x H_z) + \frac{1}{T_2} M_y = 0, \\ \frac{dM_z}{dt} - \gamma(M_x H_y - M_y H_x) + \frac{1}{T_2} M_z = \frac{1}{T_1} M, \\ U_{out} = R_1^2 (-nsV \frac{dM_{\perp}}{dt}) (R_1 (-nsV \frac{dM_{\perp}}{dt})^3 + \\ + 2R_1 (-nsV \frac{dM_{\perp}}{dt})^2 (E - U_{be}) + R_1 (-nsV \frac{dM_{\perp}}{dt}) (E - U_{be})^2 + \\ + 4(-nsV \frac{dM_{\perp}}{dt}) (E - U_{be}) \varphi_1 R_8 + 4(E - U_{be})^2 \varphi_1 R_8, \\ M_{\perp} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}, \quad U_{out} = L \frac{di_1}{dt}, \\ H_1 = \frac{i_1 n_1}{2R}, \quad H_1 = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $n_1$  — количество витков на передающей катушке;  $R$  — радиус одного витка передающей катушки. Решая данную систему методом медленно меняющихся амплитуд, можно в результате получить выражение для параметра  $U_{out}$ , которое при некоторых дополнительных упрощающих предположениях может быть сведено к виду

$$U_{out} = (C_1 \frac{sn}{n_1 V} + C_2 \frac{R_1 R_7}{4\varphi_1}) \chi H_z \sin(\omega_0 t), \quad (9)$$

где коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  определяются начальными условиями.

В результате имеем окончательное выражение, которое связывает между собой напряжение на выходе дифференциального усилителя с напряженностью  $H_z$  постоянного магнитного поля. Таким образом, с помощью спинового генератора получена связь электрической и магнитной составляющих.

### Литература

1. Леше А. Ядерная индукция / Пер. с нем. — М.: ИИЛ, 1963. — 584 с.
2. Труды БГТУ. Сер. физ.-мат. наук и информ. — Мн. — Вып. XII. — 2004.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — Т. 1. — 598 с.