

В. В. ЗУБЕНКО, Н. М. ИЕВСКАЯ, Р. М. УМАРХОДЖАЕВ

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ НА СПИНОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

Рассмотрено воздействие внешней силы на спиновый генератор, инерционным элементом которого является компонент продольной намагниченности M_z . Проведен анализ поведения регенерированной системы ядерных спинов. Рассмотрено поведение спинового генератора внутри области захватывания и вне ее. Для области захватывания найдены стационарные решения и исследована их устойчивость. Проанализирована форма возникающих сигналов. Показано, что внутри области захватывания фаза может изменяться на угол, превышающий $\pm\pi/2$. Теоретические результаты сравниваются с экспериментом.

Действие внешних сил на автоколебательные системы с идеальной инерционной нелинейностью рассмотрено в [1]. В настоящем сообщении изучается воздействие внешней силы на спиновый генератор, инерционным элементом которого является продольный компонент намагниченности M_z [2, 3]. Рассматриваемая задача представляет как самостоятельный интерес при изучении двухуровневых квантовых колебательных систем, так и позволяет перейти к изучению взаимной синхронизации спиновых генераторов. Результаты исследования оказываются полезными при расшифровке спектров ЯМР высокого разрешения в спектрометрах со спиновым генератором в канале стабилизации при наличии помехи [4] и позволяют объяснить форму сигналов ЯМР высокого разрешения, наблюдаемых при работе спинового генератора на многокомпонентном образце [5].

Проведем рассмотрение в предположении однородного постоянного магнитного поля H_0 и широкополосного усилителя в цепи обратной связи с коэффициентом усиления k . Уравнения спинового генератора имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{m} + m[(\delta_2 - k\gamma\mu_z) + j\omega_0] &= j\gamma h M_z, \\ \dot{M}_z + M_z\delta_1 + Jm[\gamma m(h^* + jkm)] &= \delta_1 M_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$m = M_x + jM_y, \quad h = H_1 e^{-j\omega_1 t},$$

$$\delta_1 = \frac{1}{T_1}; \quad \delta_2 = \frac{1}{T_2}.$$

Остальные обозначения обычные. Согласно общей теории [1], при $|\omega_0 - \omega_1| \gg \delta_1$, пренебрегая поправкой Блоха — Зигерта [2], решение системы (1) можно записать в виде

$$m = M_1 e^{-j\omega_0 t} + M_2 e^{-j\omega_1 t},$$

где

$$M_2 = U - jV. \quad (2)$$

Если при $H_1 = 0$ амплитуда автоколебаний $M_1 = M_{10}$, то в присутствии внешней силы из (1) следует

$$M_1^2 = M_{10}^2 - (U^2 + V^2) + \frac{VH_1}{k},$$

т. е. при $U^2 + V^2 - \frac{VH_1}{k} < M_{10}^2$ в системе имеет место режим биений, при $U^2 + V^2 - \frac{VH_1}{k} = M_{10}^2$ в системе наступает захватывание — синхронизация гашением.

Согласно [1], внутри области захватывания внешняя сила действует на регенерированную систему. Ищем решение в виде

$$m = (U - jV) e^{-j\omega_1 t}. \quad (3)$$

Тогда из (1) имеем

$$\begin{aligned} \dot{U} + U(\delta_2 - k\gamma M_2) + V(\omega_0 - \omega_1) &= 0, \\ \dot{V} + V(\delta_2 - k\gamma M_2) - U(\omega_0 - \omega_1) &= -\gamma H_1 M_2, \\ \dot{M}_2 + M_2 \delta_1 + k\gamma(U^2 + V^2) - \gamma H_1 V &= M_0 \delta_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Следует отметить, что система уравнений (4) с точностью до знака при коэффициенте обратной связи k аналогична уравнениям, полученным при учете радиационного затухания, т. е. при внесении в ядерную спин-систему дополнительных потерь [6]. При наличии регенерации в спин-системе изменяется знак коэффициента обратной связи k , а система уравнений (4) описывает поведение автоколебательных или потенциально-колебательных систем. В этом случае форма возникающих сигналов существенно зависит от величины k .

Если допустить наличие в системе стационарного режима, то решение уравнений (4) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{V}{M_0} &= \frac{-\delta_1}{\gamma H_1} \left(1 - \frac{M_2}{M_0}\right) \left(1 - \frac{k\gamma M_2}{\delta_2}\right), \\ \frac{U}{M_0} &= \frac{\delta_1}{\gamma H_1} \left(1 - \frac{M_2}{M_0}\right) \frac{\Delta\omega}{\delta_2}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\left(1 - \frac{M_2}{M_0}\right) \left[\left(1 - \frac{k\gamma M_2}{\delta_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\omega}{\delta_2}\right)^2 \right] - \frac{\gamma^2 H_1^2 M_2}{\delta_1 \delta_2 M_0} = 0,$$

где

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1.$$

Исследование стационарных решений на устойчивость показывает, что при $\frac{k\gamma M_0}{\delta_2} \ll 1$ решения всегда устойчивы, при $\frac{k\gamma M_0}{\delta_2} > 1$ реше-

ния устойчивы в некоторой области расстройек $\Delta\omega$. Устойчивость системы определялась по методу Гурвица.

Первый случай соответствует воздействию внешней силы на регенерированную систему ядерных спинов, в которой в отсутствие внешней силы автоколебания не возникают. Второй случай соответствует воздействию внешней силы на спиновый генератор.

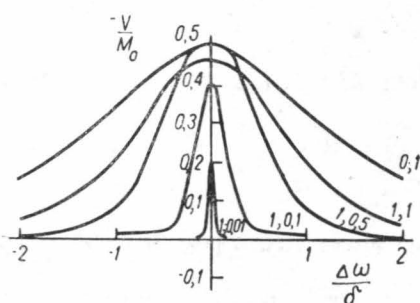


Рис. 1. Форма сигналов поглощения V в зависимости от расстройки $\Delta\omega$ при условиях $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, $\frac{k\gamma M_0}{\delta} \leq 1$.

Первые индексы у кривых соответствуют значениям $\frac{k\gamma M_0}{\delta}$, вторые —

$$\frac{\gamma H_1}{\delta}$$

при $\Delta\omega = 0$ и $\frac{\gamma H_1}{\delta} = 0,5$. В этом случае ширина сигнала \sim в 2,4 раза меньше ширины сигнала V_0 .

Анализ показывает, что при $\frac{\gamma H_1}{\delta} < 0,1$ для регенерированной системы ядер амплитуда $\left. \frac{V_0}{M_0} \right|_{\Delta\omega=0} \approx \sqrt{\frac{\gamma H_1}{\delta}}$ (как и в схеме регенератора с кубической нелинейностью [8]), а полуширина на полувисоте $\frac{\Delta\omega_{1/2}}{\delta} \approx$

$$\approx \sqrt[3]{\left(\frac{\gamma H_1^2}{\delta}\right)}, \text{ тогда как в отсутствие регенерации при } \frac{\gamma H_1}{\delta} < 1,$$

$\left. \frac{V_0}{M_0} \right|_{\Delta\omega=0} \approx \frac{\gamma H_1}{\delta}$, а $\frac{\Delta\omega_{1/2}}{\delta} \approx 1$ [2], т. е. при наличии в схеме регенерации при уменьшении H_1 ширина сигналов уменьшается быстрее, чем их амплитуда.

Для второго случая графики сигналов U и V приведены на рис. 2 при $\frac{k\gamma M_0}{\delta} = 2$ и $\frac{k\gamma M_0}{\delta} = 4$ (для различных значений $\frac{\gamma H_1}{\delta}$). Сплошными линиями показаны устойчивые части сигналов, пунктирными — неустойчивые.

Значения $\Delta\omega_{кр}$, при которых возникает неустойчивость, определяют область захватывания спинового генератора. Ширина области захватывания при фиксированном коэффициенте усиления в цепи обратной связи k тем меньше, чем меньше амплитуда H_1 .

Использование регенерированных спин-систем в ЯМР-спектроскопии высокого разрешения рассмотрено в [7]¹.

Для первого случая графики сигнала V приведены на рис. 1. Для сравнения на том же рисунке приведен сигнал V_0 , наблюдаемый в отсутствие регенерации ($k=0$) и имеющий максимальное значение

$$\frac{V_0}{M_0} = 0,5 \text{ при } \Delta\omega = 0,$$

$$\frac{\gamma H_1}{\delta} = 1 \text{ [2].}$$

Максимальное значение амплитуды сигнала $\frac{V}{M_0} = 0,5$ при наличии регенерации ($\frac{k\gamma M_0}{\delta} = 1$) достигается

¹ Сообщения Ю. С. Константинова, А. М. Смирнова и А. Н. Любимова на Всесоюзной юбилейной конференции по парамагнитному резонансу. Казань, июнь 1969 г.

Из рис. 2 видно, что в рассматриваемом случае, в отличие от предыдущего, сигнал V проходит через нулевое значение. Фаза внутри области захватывания определяется выражением $\operatorname{tg} \varphi = \frac{U}{V}$. Как показывает расчет, при захвате спинового генератора, в отличие от генератора с идеальной инерционной нелинейностью [1], его фаза может изменяться на угол, превышающий $\pm \pi/2$.

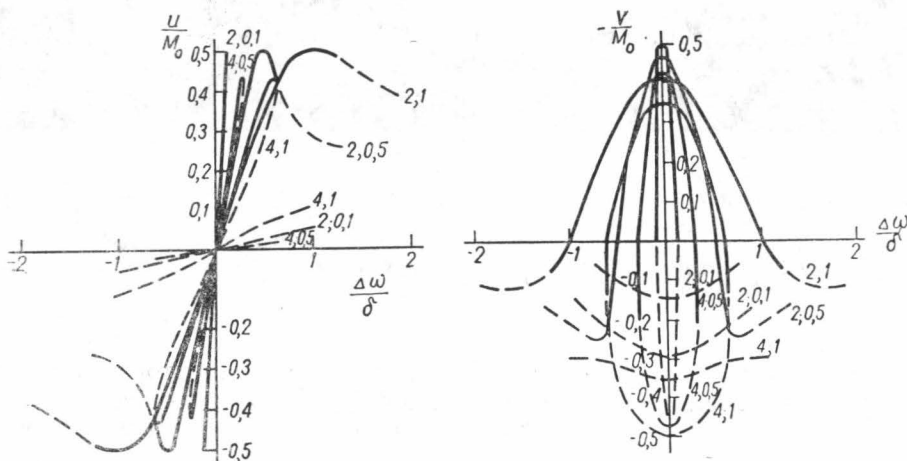


Рис. 2. Форма сигналов дисперсии U и поглощения V в зависимости от расстройки $\Delta\omega$ при условиях $\delta_1 = \delta_2 = \delta, \frac{k\gamma M_0}{\delta} > 1$. Обозначения те же, что и на рис. 1

Из расчетных кривых, приведенных на рис. 1 и 2, следует, что форма сигналов при наличии регенерации существенно отличается от лоренцевой.

Рассмотрение показывает, что при изменении параметра $\frac{k\gamma M_0}{\delta}$ в интервале $0 \ll \frac{k\gamma M_0}{\delta} < 2$ всегда можно найти значение параметра $\frac{\gamma H_1}{\delta}$, при котором амплитуда возникающего сигнала $\frac{V}{M_0} \Big|_{\Delta\omega=0}$ имеет максимально возможное значение 0,5.

В [3] было получено, что амплитуда генерации спинового генератора при $H_1 = 0$ и $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ определяется величиной

$$\frac{V_{\Gamma}}{M_0} = \sqrt{\frac{k\gamma M_0}{\delta} - 1} \cdot \left(\frac{k\gamma M_0}{\delta}\right)^{-1}$$

и имеет максимальное значение, равное 0,5 при $\frac{k\gamma M_0}{\delta} = 2$.

Как показывает анализ при $H_1 \neq 0$ и $\frac{k\gamma M_0}{\delta} \gg 2$, в системе при $\Delta\omega = 0$ устанавливается амплитуда колебаний, меньшая, чем V_{Γ}/M_0 .

Полученные теоретические результаты были проверены экспериментально. Эксперимент проводился на спиновом генераторе боковой частоты в режиме малого индекса модуляции β [4]. При $\beta \ll 1$ уравнения, описывающие спиновый генератор боковой частоты в системе

координат «постоянной расстройки $\Delta\omega$ », совпадают с системой уравнений (4) [9].

Спиновый генератор работал в магнитном поле напряженностью 5000 эрст с использованием ядер водорода, боковая частота 15,5 кГц.

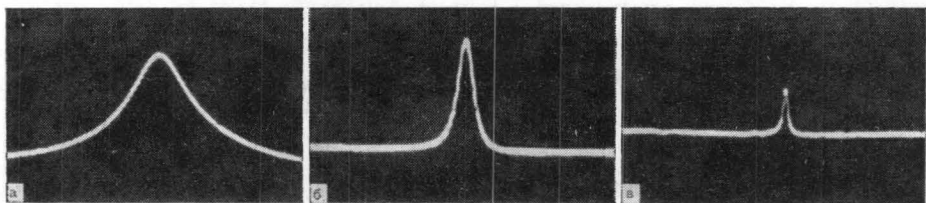


Рис. 3. Осциллограммы сигналов поглощения V , полученные при условии $\frac{k\gamma M_0}{\delta} \leq 1$.

Значения амплитуды боковой модуляции H_m , определяющие величину эффективного поля H_1 , действующего на ядра на осциллограммах, а, б и в, соответственно пропорциональны 1; 1/3; 1/10

В установке применена «привязка» частоты ВЧ генератора к частоте лармовой прецессии с помощью пассивного стабилизатора, работающего на внешнем образце, боковая частота канала стабилизации 13,2 кГц.

На рис. 3 приведены осциллограммы сигнала V , полученные при воздействии внешней силы на регенерированную спин-систему

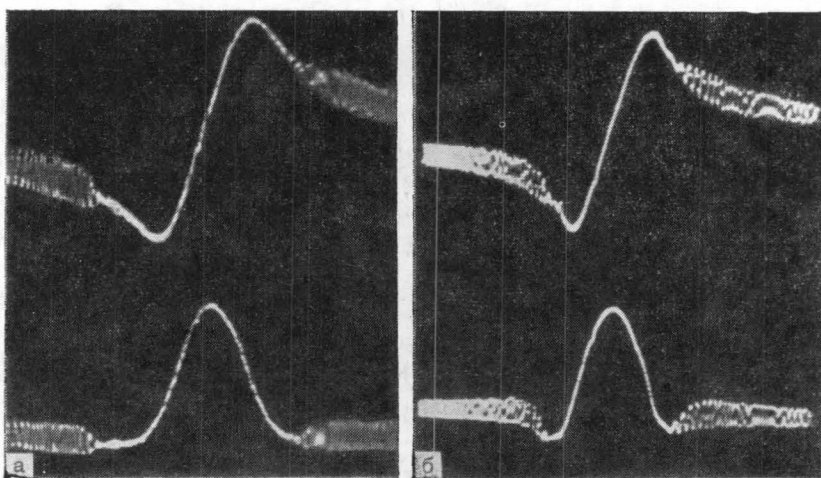


Рис. 4. Осциллограммы сигналов дисперсии U и поглощения V , полученные при условии $\frac{k\gamma M_0}{\delta} > 1$. Значения амплитуды боковой модуляции H_m на осциллограммах а и б соответственно пропорциональны 1 и 1/3

$\left(\frac{k\gamma M_0}{\delta} \leq 1\right)$ при фиксированном значении коэффициента усиления k и разных значениях H_1 в случае медленного прохождения через резонанс.

На рис. 4 приведены осциллограммы сигналов U и V , полученные при воздействии внешней силы на спиновый генератор $\left(\frac{k\gamma M_0}{\delta} > 1\right)$ при фиксированном значении k и разных значениях H_1 в случае медленного прохождения.

Экспериментальные кривые качественно согласуются с теоретическими.

Проведенное теоретическое и экспериментальное рассмотрение показывает, что захватывание спинового генератора приводит, как и в случае регенерации [7], к значительному сужению линий.

Поскольку реализация узких линий с применением захваченного спинового генератора технически надежнее — этот метод может найти применение в системах автоподстройки. Для экспериментального подтверждения подобной возможности нами была осуществлена привязка частот ларморовой прецессии и высокочастотного генератора с использованием линии захваченного спинового генератора в качестве дискриминатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теодорчик К. Ф. Автоколебательные системы. М., ГИТТЛ, 1952.
2. Леше А. Ядерная индукция. М., ИЛ, 1963.
3. Иевская Н. М., Умарходжаев Р. М. «Электричество», № 7, 57, 1965.
4. Сборник «ЯМР и ЭПР спектроскопия». М., «Мир», 1964.
5. Vladimírsky K. V., Labzov B. A. «Nucl. Instr. Methods.», 3, 94, 1961.
6. Bloom S. «Appl. Phys.», 28, 800, 1957.
7. Константинов Ю. С., Смирнов А. М. Тезисы докладов на «Ломоносовских чтениях». Изд-во МГУ, 1969.
8. Гоноровский И. С. Основы радиотехники. М., Связьиздат, 1957.
9. Умарходжаев Р. М. «Изв. вузов», радиофизика, 14, № 8, 1189, 1971.

Поступила в редакцию
25.5 1971 г.

НИИЯФ