

# Роль поляризации гармонического нерезонансного внешнего поля в динамике неавтономного спинового генератора

Ю. В. Павлов, А. Н. Пивкин<sup>a</sup>, Р. М. Умарходжаев

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobelевцына  
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

*E-mail: <sup>a</sup>setproperty@mail.ru*

Статья поступила 24.06.2010, подписана в печать 17.11.2010

Приводятся краткие результаты анализа воздействия нерезонансного гармонического внешнего электромагнитного поля на квантовый генератор, активной средой которого является двухуровневая спиновая система — спиновый генератор. Показана роль поляризации внешнего поля в динамике неавтономного спинового генератора. При круговой поляризации нерезонансного внешнего поля наблюдается лишь сдвиг частоты генерации спинового генератора. При линейной поляризации нерезонансного внешнего поля помимо сдвига частоты генерации наблюдается особенность синхронизации спинового генератора на третьем обертона частоты внешнего поля.

**Ключевые слова:** спиновый генератор, синхронизация, поляризация внешнего поля.

УДК: 621.373.8, 539.186:537. PACS: 76.70.-г, 05.45.Xt.

## Введение

Спиновые генераторы (СГ) широко используются в квантовой магнитометрии [1–3], инерциальной навигации [4, 5], фундаментальных физических исследованиях [6–8]. Рекордные чувствительности, демонстрируемые в лабораторных условиях приборами, созданными с использованием СГ (вариационная чувствительность квантовых магнитометров  $(3\text{--}5) \cdot 10^{-15}$  Тл), значительно поникаются при наличии внешних переменных электромагнитных полей. Для реализации истинных возможностей таких приборов в реальных условиях необходимо полное представление о механизме воздействия внешних электромагнитных полей на СГ. Получить такое представление удобнее, рассмотрев на первом этапе воздействие на СГ нерезонансного гармонического внешнего поля, поляризация которого лежит в плоскости, перпендикулярной направлению измеряемого поля. Эта задача является целью настоящей работы. Полученные результаты позволят в дальнейшем рассмотреть воздействие на СГ случайных (неstationарных) внешних электромагнитных полей.

Если внешнее поле является резонансным и его частота  $\omega_1 \approx \omega_0$ , где  $\omega_0$  — частота генерации автономного СГ, то происходит захват частоты (синхронизация) СГ [9] — прибор перестает реагировать на изменение измеряемой величины. Если внешнее поле нерезонансное, то его присутствие приводит к сдвигу частоты генерации СГ. Величина такого сдвига может значительно превышать вариационную чувствительность магнитометра. Сдвиг частоты сигнала магнитного резонанса от спиновой системы под действием внешних резонансных и нерезонансных гармонических полей круговой поляризации детально изучен [10]. Работы по сдвигу частоты генерации СГ и других квантовых генераторов под действием нерезонансных полей различной поляризации авторам не известны. Как было недавно установлено, воздействие внешнего гармонического поля линейной поляризации приводит не только к сдвигу частоты СГ, но и к его синхронизации на

нечетных обертонах внешней силы [11, 12]. Детали этого процесса до сих пор не описывались.

В настоящем сообщении рассматриваются следующие две задачи.

1. Зависимость сдвига частоты генерации СГ от амплитуды внешнего гармонического поля линейной и круговой поляризации, если частота этого поля больше или меньше частоты автономного изохронного СГ.

2. Особенности синхронизации спинового генератора на обертонах частоты внешнего гармонического поля, реализуемые при линейной поляризации этого поля.

## 1. Расчет влияния поляризации нерезонансного гармонического электромагнитного поля на динамику неавтономного СГ

Если активной средой в СГ является двухуровневая система магнитных моментов ядер или атомов, то динамика изохронного СГ в присутствии гармонического нерезонансного внешнего поля произвольной поляризации с амплитудой  $H_1$  и частотой  $\omega_1$ , (которое обозначим как  $H_1(\omega_1 t)$ ), описывается уравнениями

$$\dot{m} + m(\delta + j\omega_0) = j\gamma M_z[-j\kappa m + H_1(\omega_1 t)], \quad (1)$$

$$\dot{M}_z + M_z \delta + \text{Im}\{\gamma m[j\kappa m^* + H_1^*(\omega_1 t)]\} = \delta M_0. \quad (2)$$

Система (1) получена из уравнений Блоха–Белла–Блюма — системы линейных уравнений с периодическими коэффициентами, являющихся точным следствием квантово-механического анализа движения спина 1/2 в скрещенных магнитных полях  $\{H_x, H_y, H_z\}$  [13]. Уравнения (1) — нелинейные уравнения с периодическими коэффициентами.

В (1) использованы следующие обозначения:  $m = M_x + jM_y$  — поперечная компонента вектора намагниченности  $\mathbf{M}$  (в оптическом случае — поляризация),  $M_z$  — продольная компонента вектора  $\mathbf{M}$  — разность населенностей,  $M_0$  — стационарное значение намагниченности,  $\delta = 1/T_1 = 1/T_2$  — обратные времена

продольной и поперечной релаксации,  $j$  — мнимая единица,  $\kappa$  — коэффициент усиления широкополосной цепи обратной связи,  $-j\kappa t$  — поле цепи обратной связи круговой поляризации,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $\omega_0 = \gamma H_z$  — частота квантового перехода — частота Лармора.

При круговой поляризации внешнего поля  $H_1(\omega_1 t) = H_x + jH_y = H_1 \cos(\omega_1 t) - jH_1 \sin(\omega_1 t)$ ; при линейной поляризации  $H_1(\omega_1 t) = 2H_x = 2H_1 \cos(\omega_1 t)$ ,  $H_y = 0$ .

Аналитический расчет, проведенный при выполнении условия нерезонансности внешнего поля,  $|\omega_0 - \omega_1| \gg \delta$ , показывает, что частота  $\omega$  колебаний СГ дается следующими выражениями:

при круговой поляризации внешнего поля

$$\omega = \omega_0 + \frac{1}{2} \gamma^2 H_1^2 \frac{1}{\omega_0 - \omega_1}; \quad (3)$$

при линейной поляризации внешнего поля

$$\omega = \omega_0 + \frac{1}{2} \gamma^2 H_1^2 \frac{\omega_0}{\omega_0^2 - \omega_1^2}; \quad (4)$$

при  $\gamma H_1 = 0$  частота колебаний СГ равна частоте Лармора  $\omega_0$ .

Зависимости частоты колебаний СГ от величины амплитуды нерезонансного внешнего поля круговой и линейной поляризации даны на рис. 1. По оси абсцисс отложено  $\gamma H_1 / \omega_0$ , по оси ординат —  $\omega / \omega_0$ . Линии с точками обозначают зависимости, полученные численным решением уравнений (1), а без точек — полученные аналитически. Расхождение результатов аналитического и численного расчетов при величинах амплитуд внешнего нерезонансного поля  $\gamma H_1 / \omega_0$ , меньших  $\sim 0.35$ , составляет не более 1%. И аналитический, и численный расчеты выполнены для случаев  $\omega_0 = 100$ ,  $\omega_1 = 20$  и  $\omega_1 = 180$ . Кривые 2 и 4 соответствуют

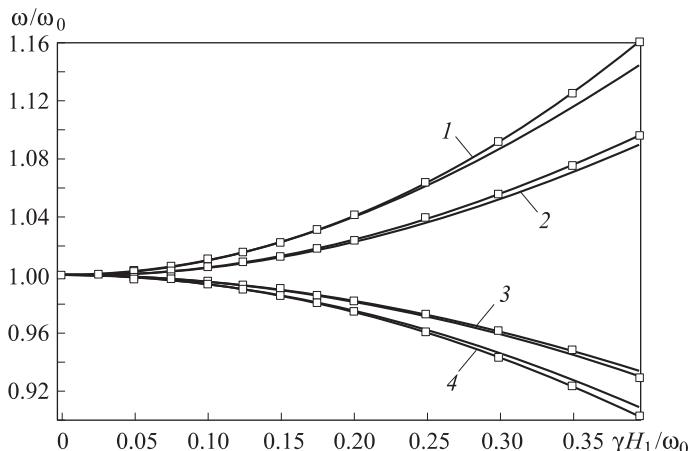


Рис. 1. Зависимости частоты колебаний СГ от величины амплитуды нерезонансного внешнего поля круговой и линейной поляризации. Линии, проходящие через точки, обозначают зависимости, полученные численным решением уравнения (1). Линии без точек обозначают зависимости, полученные аналитически. Кривые 2 и 4 соответствуют случаю внешнего поля круговой поляризации с частотами  $\omega_1 = 20$  и  $\omega_1 = 180$  соответственно. Кривые 1 и 3 соответствуют случаю внешнего поля линейной поляризации с частотами  $\omega_1 = 20$  и  $\omega_1 = 180$  соответственно

случаю внешнего поля круговой поляризации с частотами  $\omega_1 = 20$  и  $\omega_1 = 180$ . Кривые 1 и 3 соответствуют случаю внешнего поля линейной поляризации с частотами  $\omega_1 = 20$  и  $\omega_1 = 180$ . Из приведенных зависимостей следует, что действие на СГ нерезонансного поля как круговой, так и линейной поляризации при  $\omega_1 > \omega_0$  вызывает уменьшение частоты генерации СГ, а при  $\omega_1 < \omega_0$  — увеличение этой частоты.

Внешнее нерезонансное поле круговой поляризации вызывает только сдвиг частоты генерации СГ. При воздействии внешнего нерезонансного поля линейной поляризации ситуация иная. При  $\omega_1 > \omega_0$  воздействие поля линейной поляризации приводит лишь к сдвигу частоты генерации СГ. Если же  $\omega_1 < \omega_0$ , то воздействие такого поля помимо сдвига частоты генерации СГ может привести к синхронизации СГ на нечетных обертонах частоты внешнего поля [11, 12].

Численное решение системы уравнений (1) при воздействии на СГ поля линейной поляризации представлено на рис. 2. На рисунке области биений обозначены цифрой I, а область синхронизации обозначена цифрой II.

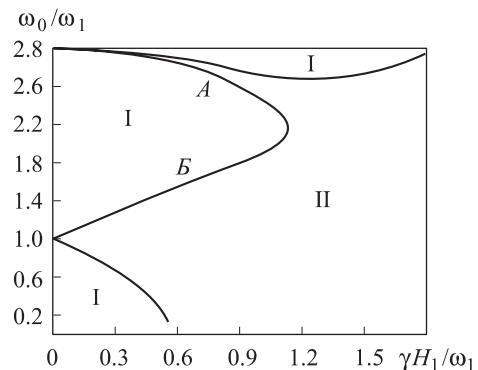


Рис. 2. Зависимость границ областей синхронизации СГ от амплитуды внешнего поля. Цифрой I обозначены области биений, цифрой II — область синхронизации; A — нижняя граница синхронизации третьего обертона, B — верхняя граница основного (первого) тона

Из рис. 2 видно, что в точке, соответствующей  $\omega_0 / \omega_1 = 2.135$ ,  $\gamma H_1 / \omega_1 = 1.128$ , граница (A) области синхронизации третьего обертона плавно переходит в границу (B) области синхронизации на основном (первом) тоне.

Экспериментальное наблюдение подтвердило результаты численного счета.

### Заключение

На примере спинового генератора показана роль поляризации нерезонансного гармонического внешнего поля в динамике неавтономного квантового генератора. Эта роль заключается в следующем.

1. Воздействие нерезонансных полей линейной и круговой поляризации приводит к сдвигу частоты генерации, величина которого может существенно превышать вариационную чувствительность спинового генератора.

Из приведенных в статье формул следует, что сдвиги частоты, эквивалентные предельной вариационной чув-

ствительности квантовых магнитометров ( $\sim 10^{-15}$  Тл), возникают в присутствии внешних электромагнитных полей, напряженность которых составляет порядка  $10^{-12}$  Тл.

2. Воздействие нерезонансного внешнего поля линейной поляризации на частотах  $\omega_1 < \omega_0$  вызывает синхронизацию спинового генератора на нечетных обертонах частоты внешнего поля. Особенностью режима синхронизации является то, что при величинах  $\gamma H_1/\omega_1 = 1.128$  и  $\omega_0/\omega_1 = 2.135$  происходит слияние границ областей синхронизации СГ на третьем обертона и на основном тоне.

В заключение отметим, что приведенные результаты было бы целесообразно сравнить с результатами асинхронных воздействий на другие квантовые генераторы, в первую очередь на мазеры.

### Список литературы

1. Matsko A.B., Strelakalov D., Maliki L. // Opt. Commun. 2005. **247**. P. 141.

2. Schwindt P., Holberg L., Kitcking J. // Rev. Sci. Instr. 2005. **76**. P. 126103.
3. Higbie J., Corsiki E., Budker D. // Rev. Sci. Instr. 2006. **77**. P. 113106.
4. Kornack T.W., Ghosh R.K., Romalis M.V. // Phys. Rev. Lett. **95**. P. 230801.
5. Woodman K.F., Franks P.W., Richards M.D // J. of Navigation. 1987. **40**. P. 366.
6. Bear D., Stoner R.E., Walsworth R.L. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. **89**. P. 209902.
7. Baker C.A. et. al. // Phys. Rev. Lett. 2006. **97**. P. 131801.
8. Александров Е.Б., Ансельм А.А., Павлов Ю.В., Умарходжаев Р.М. // ЖЭТФ. 1983. **85**, № 6(12). С. 1899.
9. Зубенко В.В., Иевская Н.М., Умарходжаев Р.М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1973. № 2. С. 136.
10. Pegg D.T., Series C.W. // J. Phys. B. 1970. **3**. P. 138; Seiden J. // C. R. 1955. **240**. P. 2228.
11. Павлов Ю.В., Пивкин А.Н., Умарходжаев Р.М. // Препринт НИИЯФ МГУ. 2010. 3/860.
12. Pavlov Yu.V., Pivkin A.N., Umarkhodzhaev R.M., Lariontsev E.G. // Phys. Rev. A. 2010. **82**, N 3. P. 3802.
13. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М., 1972.

### The role of the polarization of a harmonious not resonant external field in the dynamics of a not autonomous NMR oscillator

**U. V. Pavlov, A. N. Pivkin<sup>a</sup>, R. M. Umarkhodjaev**

*D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University,  
Moscow 119991, Russia.*

*E-mail:* <sup>a</sup>setproperty@mail.ru.

Short results of the analysis of a not resonant, harmonious, external, electromagnetic field action on the quantum generator, which active medium is the two-level spin system, — the NMR oscillator are given in this paper. The role of an external field polarization in dynamics of a not autonomous NMR oscillator is shown. If the polarization of a not resonant external field is circular the shift of the generation frequency of the NMR oscillator is observed. At the linear polarization of a not resonant external field, in addition to the shift of the generation frequency, peculiarity of the NMR oscillator frequency locking on the third over tone of the frequency of an external field is observed.

*Keywords:* the NMR oscillator, frequency locking, the polarization of an external field.

PACS: 76.70.-r, 05.45.Xt.

Received 24 June 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2011).

### Сведения об авторах

1. Павлов Юрий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-25-82, e-mail: uvpavlov@yandex.ru.
2. Пивкин Александр Николаевич — мл. науч. сотр.; тел.: (495) 939-10-80, e-mail: setproperty@mail.ru.
3. Умарходжаев Рауф Муртазаевич — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., зав. лабораторией; тел.: (495) 939-10-80, e-mail: rmu@srd.sinp.msu.ru.