

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: [mathmod.esrae.ru/38-138](http://mathmod.esrae.ru/38-138)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Чалков В.В. Анализ неустойчивости масштабного коэффициента ядерного магнитного гироскопа // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2022. №2

УДК 539.184.5

DOI: 10.24412/2541-9269-2022-2-11-15

## АНАЛИЗ НЕУСТОЙЧИВОСТИ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО ГИРОСКОПА

Чалков В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия, Санкт-Петербург

### NUCLEAR MAGNETIC GYROSCOPE SCALE FACTOR INSTABILITY ANALYSIS

Chalkov V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Concern CSRI Elektropribor, JSC, Russia, Saint Petersburg

**Аннотация.** Описывается влияние «взаимной синхронизации» на работу автогенераторной системы ядерного магнитного гироскопа. Предлагается аналитическая зависимость масштабного коэффициента ядерного магнитного гироскопа от качества настройки контура обратной связи. Приводится аналитическая зависимость амплитуды сигнала обратной связи ядерного магнитного гироскопа от коэффициента усиления автоматического регулятора контура обратной связи гироскопа. Представлены результаты моделирования, демонстрирующие влияние «взаимной синхронизации» на масштабный коэффициент гироскопа.

Ключевые слова: ядерный магнитный гироскоп, взаимная синхронизация

**Abstract.** The influence of mutual synchronization on the nuclear magnetic gyroscope self-oscillating system is described. The analytical dependence of the oscillator signal amplitude is shown. Simulation results are presented that demonstrate the effect of mutual synchronization on the observed xenon isotope precession frequency and the gyroscope scale factor.

Keywords: nuclear magnetic gyroscope, mutual synchronization

**Введение.** Объектом исследования является ядерный магнитный гироскоп (ЯМГ), работающий в режиме датчика угловой скорости. Принцип действия такого гироскопа заключается в определении частоты вращения основания  $\Omega$ , по измеренному значению наблюдаемой ларморовской частоты прецессии атомов ксенона (Xe)  $\omega$ , контролируемому значению индукции магнитного поля, действующего на атомы Xe  $B$ , а также известному значению гиромагнитного отношения  $\gamma$ , полученному из выражения [1, 2]:

$$\omega = B \cdot \gamma + \Omega, \quad (1)$$

Конструкция ЯМГ подробно описана в [1 - 4]. В настоящей работе рассматривается одна из основных компонент ЯМГ — контур обратной связи, использующий значение угла поворота поляризации света в ячейке ЯМГ для поддержания частоты прецессии атомов Хе на частоте  $\omega$ . В этом контуре сигнал, сформированный на основе значения угла поворота плоскости поляризации света, проходящего через ячейку ЯМГ [1], подается на магнитную катушку, расположенную на оси чувствительности гироскопа с амплитудой и фазой, позволяющими атомам Хе прецессировать с незатухающей амплитудой, то есть находиться в режиме автогенерации с частотой  $\omega$ .

Полагая  $B$  и  $\gamma$  в выражении (1) неизменными, можно определить масштабный коэффициент ЯМГ следующим соотношением [5]:

$$M_{\text{ЯМГ}} = \frac{1+d(\omega_{t1}-\omega_{t2})}{1+d(\Omega_{t1}-\Omega_{t2})}, \quad (2)$$

в котором  $d$  — нормирующий коэффициент;  $\Delta\Omega = \Omega_{t1} - \Omega_{t2}$  — приращение частоты вращения основания между моментами съема данных на интервале времени  $\Delta t = t2 - t1$ ;  $\Delta\omega = \omega_{t1} - \omega_{t2}$  — приращение наблюдаемой ларморовской частоты прецессии на том же интервале времени, которое зависит от частоты съема данных (обычно 500-5000 Гц).

В таком представлении масштабного коэффициента ошибки, связанные с некорректным поддержанием автогенерации атомов Хе на частоте  $\omega$ , приводят к нестабильности  $\Delta\omega$ , что, в свою очередь, приводит к нестабильности масштабного коэффициента ЯМГ. Стабильность автогенерации атомов Хе зависит от качества настройки контура обратной связи ЯМГ. Коэффициент качества настройки обратной связи ЯМГ, нулевое значение которого соответствует оптимальной настройке контура обратной связи согласно [4], можно описать следующим выражением:

$$K = c_1 \cdot \Delta\varphi + c_2 \cdot |\Delta A|, \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi$  — разность между текущей фазой прецессии атомов Хе и фазой прецессии атомов Хе, соответствующей балансу фаз, описанному в [4, 7];  $\Delta A$  — разность между текущей амплитудой прецессии атомов Хе и амплитудой прецессии атомов Хе, соответствующей балансу амплитуд, описанному в [4, 7];  $c_1, c_2$ , — нормирующие коэффициенты.

Основываясь на теоретически рассчитанной зависимости масштабного коэффициента от скорости вращения основания, описанной в работе [6] и учитывая зависимости (2) и (3), можно предложить следующее выражение для масштабного коэффициента ЯМГ:

$$M_{\text{ЯМГ}} = \left( \frac{M_{\text{ЯМГ},0}}{1+K} \right), \quad (4)$$

где  $M_{\text{ЯМГ},0}$  — базовое значение масштабного коэффициента ЯМГ, полученное теоретически [6].

Очевидно, что изменение параметров  $\Delta\varphi$  и  $\Delta A$  выражения (3) будет определять стабильность масштабного коэффициента ЯМГ. В этой связи, целью настоящей работы является исследование влияния качества настройки

контура обратной связи, поддерживающей генерацию атомов Хе, на масштабный коэффициент ЯМГ.

**Режим работы контура обратной связи.** Автогенерация атомов Хе с помощью контура обратной связи при реализации ЯМГ происходит при малом, но достаточном количестве задействованных атомов Хе. Анализ данных, полученных в ходе экспериментов, позволяет предложить следующую зависимость амплитуды сигнала обратной связи ЯМГ:

$$U_{APY} = K_n(N \cdot M \cdot + K_{APY} \cdot A_{Tc}), \quad (5)$$

где  $U_{APY}$  — значение напряжения на входе автоматического регулятора усиления (APY), входящего в состав контура обратной связи ЯМГ, соответствующее значению амплитуды сигнала обратной связи ЯМГ;  $K_n$ , — коэффициент передачи магнитометрической детектирующей схемы;  $N$  — число атомов Хе, которые вовлечены в процесс спиновой генерации [6, 8];  $M$  — значение магнитного момента атома Хе [1];  $K_{APY}$  — коэффициент усиления APY;  $A_{Tc}$  — амплитуда сигнала в тракте обратной связи ЯМГ на частоте, отличной от частоты  $\omega$ .  $K_{APY}$  выбирается таким образом, чтобы  $U_{APY} = U_{задан}$ , где  $U_{задан}$  — значение напряжения, задаваемое в APY

В тракте обратной связи ЯМГ, функционирующего в вышеописанном режиме, будет существовать некоторый сигнал на частоте, отличной от частоты  $\omega$ . Присутствие этого сигнала приводит к смещению частоты  $\omega$ . Механизм влияния такого сигнала на собственную частоту автогенератора  $\omega$  обычно называют «взаимной синхронизацией» [9 - 11].

**Результаты моделирования.** Для демонстрации влияния эффекта «взаимной синхронизации» на частоту генерации атомов Хе в ЯМГ было проведено моделирование в среде Matlab Simulink, в рамках которого реализована модель ЯМГ с синхронизирующим генератором, настроенным на частоту 118 Гц и встроенным в обратную связь ЯМГ. Эксперимент проводился следующим образом: первые 20 секунд, до точки «А» на рисунке, ЯМГ работал в режиме замкнутой обратной связи без применения внешнего синхронизирующего генератора; далее, начиная со значения времени, соответствующего точке «А», сигнал от синхронизирующего генератора подавался в канал обратной связи ЯМГ, амплитуда которого медленно увеличивалась во времени. Результаты моделирования приведены на рисунке.

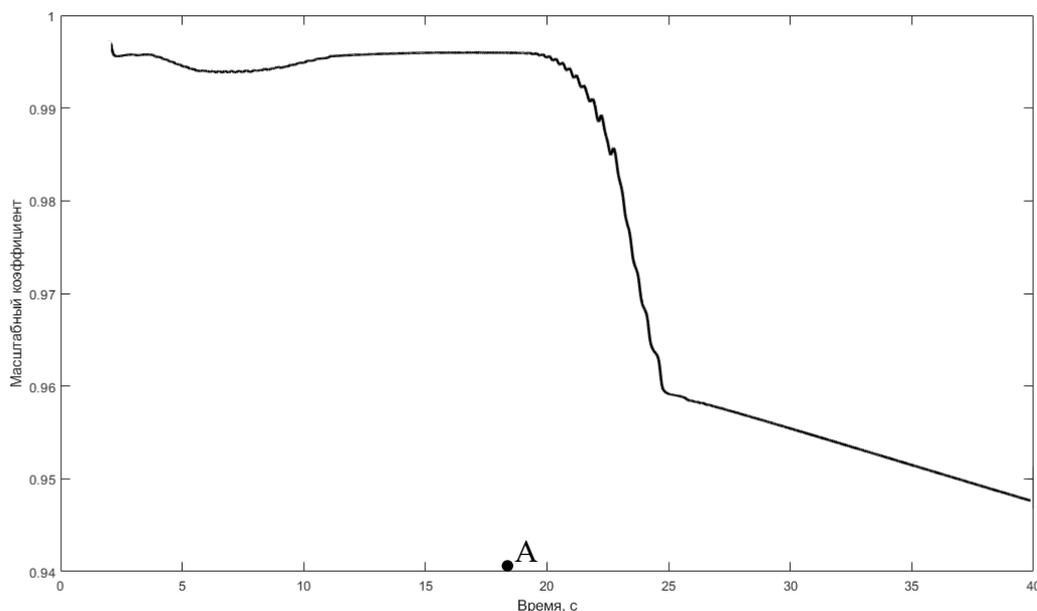


Рис.1. График зависимости масштабного коэффициента ЯМГ от амплитуды синхронизирующего генератора в контуре обратной связи

После значения времени, соответствующего точке «А» на рисунке, можно увидеть уменьшение масштабного коэффициента ЯМГ. Согласно (2) и (3), такое уменьшение вызвано подавлением синхронизирующего генератора оригинальной автогенерации атомов Хе. Важно отметить, что подобное влияние синхронизирующего генератора может привести к полному подавлению сигнала оригинальной автогенерации атомов Хе, приводящему к нечувствительности гироскопа к угловой скорости вращения основания.

Разработанная модель позволяет исследовать эффект «взаимной синхронизации», возникающий в режиме автогенерации ЯМГ. Это даёт возможность более точно описать наблюдаемое при проведении экспериментов на опытном образце гироскопа изменение масштабного коэффициента, которое не вполне корректно описывается выражением, предложенным в работе [6].

**Выводы.** В результате исследования было описано влияние «взаимной синхронизации» на работу автогенераторной системы ядерного магнитного гироскопа. Предложена аналитическая зависимость масштабного коэффициента ядерного магнитного гироскопа от качества настройки контура обратной связи. Приведена аналитическая зависимость амплитуды сигнала обратной связи ядерного магнитного гироскопа от коэффициента усиления автоматического регулятора контура обратной связи гироскопа. Представлены результаты моделирования, демонстрирующие влияние «взаимной синхронизации» на масштабный коэффициент гироскопа. В дальнейшем предполагается провести сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных данных на опытном образце гироскопа.

### Литература

1. Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалёв А.С., Пешехонов В.Г. Гироскоп на ядерно-магнитном резонансе: предельные характеристики. //Гироскопия и навигация. Том 26. №1 (100), 2018. С. 55-80.
2. Лёше А. Ядерная индукция. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 683 с.
3. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 3-10. DOI 10.17285/0869-7035.0028
4. Г. В. Безмен, А. Н. Шевченко, П. Н. Костин, А. Н. Берзейтис, В. С. Безмен, В. И. Петров. Система двухчастотной генерации в схеме датчика угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №1. С. 19-30. DOI 10.17285/0869-7035.0020
5. Ding, M. Development and prospect of quantum sensing technology // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Науч. Редактор: д.т.н. проф. О.А. Степанов / Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. 443 с.
6. Walker T.G., Larsen M.S. Spin-exchange-pumped NMR gyros // Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics. 2016. V. 65. P. 377–405.
7. Безмен Г.В. Шевченко А.Н. The choice of criteria and methods of quality assessing for the angle sensor based on the effect of nuclear magnetic resonance сборник Мультиконференции для публикации в журнал Journal of Physics: Conference Series 2021г.
8. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. Физматлит, 2009. 512 с.
9. Гурарий М. М., Русаков С. Г., Ульянов С. Л. Разработка методов анализа режима взаимной синхронизации автогенераторов в интегральных схемах //Проблемы разработки перспективных микро-и наноэлектронных систем (МЭС). 2010. №. 1. С. 138-143.
10. Карлов А. В., Сарников А. Ю., Стулов И. В. Взаимная синхронизация автогенераторов в дискретном времени //Физика и технические приложения волновых процессов. — Екатеринбург, 2012. — 2012. — №. 11. — С. 106-107.
11. Великих К. А. и др. Взаимная синхронизация двух автогенераторов: дипломная работа (проект) специалиста по направлению подготовки: 11.05. 01-Радиоэлектронные системы и комплексы. 2020.