

# СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ

Турутанов О. Г.<sup>1</sup>, Шнырков В. И.<sup>1</sup>, Мельник С. И.<sup>2</sup>, Слипченко Н. И.<sup>2</sup>, Ларкин С. Ю.<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины

просп. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
тел.: +38-057-3410907, e-mail: turutano@ift.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники МОНУ  
просп. Ленина, 14, г. Харьков, 61166, Украина  
тел.: +38-057-7401010

<sup>3</sup>Научно-производственный концерн НАУКА  
пр. 50-летия Октября, 26; г. Киев, 03148, Украина  
тел. +38-044-4820511

**Аннотация** — Разработаны принципы управляемого усиления слабых информационных сигналов в сверхпроводящих квантовых интерферометрических датчиках (СКВИДах) за счет эффекта стохастического резонанса (СР) при произвольно низкой температуре и в матрицах одинаковых СР-осцилляторов с помощью электромагнитного поля. Численным моделированием показано, что чувствительность СКВИД-приемников к слабому низкочастотному сигналу повышается на 30 дБ при отношении сигнал/шум (10...20) дБ.

## I. Введение

Необычное явление стохастического резонанса (СР) [1], наблюдаемое в нелинейных динамических системах, приводит к усилению слабых информационных сигналов за счет энергии флуктуаций, то есть к нетривиальному увеличению степени порядка в системе под действием шума. К таким системам относятся и сверхпроводящие квантовые интерференционные детекторы (СКВИДы), основой работы которых является квантование магнитного потока в сверхпроводящем кольце, замкнутом контактом Джозефсона, и в которых ранее был получен эффект СР усиления [2]. СКВИДы применяются для измерения очень слабых магнитных полей ( $10^{-12}$ ... $10^{-15}$  Тл) в экспериментальной физике, геофизике, биомедицинских исследованиях, для дефектоскопии, в т.ч. тестирования микроэлектронных устройств (СКВИД-микроскопы) и т. д. В работе рассматривается управляемое усиление слабого квазигармонического сигнала в кольце одноконтактного сверхпроводящего квантового интерферометра (СКИ), основного элемента СКВИДа, благодаря эффекту стохастико-параметрического усиления (СПР).

## II. Основная часть

При наличии теплового шума с интенсивностью  $D_0 = 2k_B T$  в системе с двумя метастабильными состояниями, разделенными достаточно высоким потенциальным барьером  $\Delta U > D_0$ , средняя частота  $r_K$  спонтанных (термоактивированных) переходов дается формулой Крамерса [3]

$$r_K = (\omega_0 / 2\pi) \exp(-2\Delta U / D_0),$$

где  $\omega_0$  — средняя частота попыток.

Периодическое нарушение симметрии 2-х явного потенциала системы информационным сигналом с частотой  $f_s$  периодически увеличивает вероятность спонтанных переходов системы в нужном направлении. При выполнении условия  $r_K \approx 2f_s$  наблюдается «стохастическая синхронизация» и максимальная величина отклика системы на сигнал. Для оптимизации усиления и отношения сигнал/шум надо иметь

возможность управлять характерными временами переходов. Управление изменением температуры представляется практически неудобным. Для сложных многоканальных систем на основе СКВИДов температура должна быть достаточно мала и оставаться постоянной в процессе измерений.

Ранее мы показали [4], что при добавлении в систему, описываемую двухъямным потенциалом, помимо шума, ВЧ электромагнитного поля возникает похожий на СР эффект усиления слабого квазигармонического сигнала, названный нами стохастико-параметрическим резонансом (СПР). Чрезвычайно важно то, что этот эффект позволяет управлять усилением дистанционно и получать максимальное его значение при произвольно малом шуме.

Для изучения эффекта СПР в кольце СКИ численно решались уравнения движения приведенного магнитного потока  $x = \Phi / \Phi_0$  (где  $\Phi_0 = h / 2e$  — квант магнитного потока) в сверхпроводящем кольце с одним контактом Джозефсона, описываемым моделью RSJ (см., напр., [5]). В правую часть уравнения вносился слабый гармонический сигнал  $x_s = a \sin 2\pi f_s t$ , высокочастотное поле  $x_p = A \sin 2\pi f_p t$  относительно большой амплитуды и шумовой поток  $x_N = \Phi_N / \Phi_0 = \xi(t)$  с гауссовым распределением,  $\langle \xi(t) \cdot \xi(t') \rangle = 2D\delta(t - t')$ ,  $D = \langle \Phi_N^2 \rangle / \Phi_0 = k_B T L$  — интенсивность шума. С учетом реалистичных значений параметров (емкость SNS контакта  $\sim 10^{-15}$  Ф, его нормальное сопротивление  $R_N \sim 1$  Ом, индуктивность кольца  $L \sim (10^{-10} \dots 10^{-9})$  Гн, критический ток контакта  $I_C \sim (1 \dots 10)$  мкА) рассматривался передемпфированный случай. Уравнение после перехода к безразмерным переменным приобретало вид:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{t_L} \left( x_e - x + \frac{b_L}{2p} \sin 2px \right),$$

где  $x_e = \Phi_e / \Phi_0 = x_s + x_p + x_N$  — внешний поток. Подробности численных расчетов можно найти в [4,6-8]. На рис. 1 показаны зависимости коэффициента усиления  $\eta$  слабого НЧ сигнала в СКИ от амплитуды  $A$  высокочастотного поля при различных уровнях шума  $s = D^{1/2}$  и фурье-спектр выходного сигнала в указанной точке; значения параметров  $\beta_L = 1,5$ ,  $a = 0,01$ ,  $f_s = 2$  Гц,  $f_p = 256$  Гц. Коэффициент усиления  $\eta$  определялся через спектры входного (внешнего) потока  $S_{\Phi}^{out}(f)$  и выходного (внутри кольца)  $S_{\Phi}^{in}(f)$ :  $\eta = [S_{\Phi}^{out}(f_s) / S_{\Phi}^{in}(f_s)]^{1/2}$ . Видно, что при выбранных параметрах усиление слабого сигнала может дости-

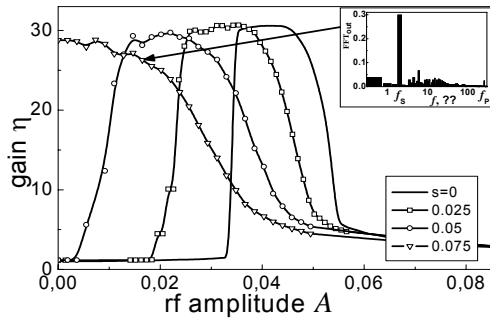


Рис. 1. СПР-усиление магнитного потока в кольце СКВИ. На вставке — спектр выходного сигнала.

Fig. 1. Stochastic-parametric amplification of magnetic flux in SQUID ring. Inset shows output signal spectrum

гать 30 раз при любых значения теплового шума. Детальный расчет [8] схемы СКВИД-микроскопа с СР-антенной размером  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$  показывает, что его чувствительность может достигать 30 фТл при отношении сигнал/шум 10-20.

В приемных антеннах большого размера ( $\sim 1 \text{ см}$ ) можно получить дополнительное усиление, заполняя их площадь одинаковыми СР-контурами, управляемых ВЧ полем. Изготовление матриц СКВИ с SNS-контактом не является сложной технологической задачей — воспроизводимость критических токов SNS-контактов в настоящее время составляет 0,1%. Схема такой СР-антенны [8] показана на рис. 2.

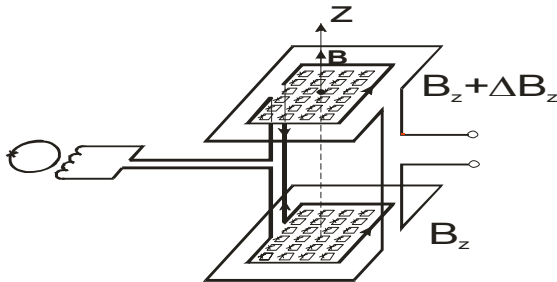


Рис. 2. СКВИД-градиентометр магнитного поля  $dB_z / dz(z)$ .

Fig. 2. SQUID gradiometer of  $dB_z / dz(z)$  magnetic field.

### III. Заключение

Показано, что использование эффектов СР и СПР для создания новых управляемых СР-антенн СКВИДов позволяет поднять чувствительность СКВИД-приемников, используемых в СКВИД-микроскопах, геофизических, медицинских и прочих применениях, более чем на порядок величины, что переводит такие исследования на качественно новый уровень. Кроме того, благодаря эффекту СПР усиление возможно при произвольно низкой температуре. Это дает возможность работы при сверхнизких (милликельвиновых) температурах в схемах считывания состояния квантовых битов (кубитов).

### IV. Список литературы

- [1] Gammaitoni L., Hänggi P., Jung P., Marchesoni F. Stochastic resonance. Rev. Mod. Phys., 1998, 70, p. 223.
- [2] Hibbs A. D. and Singsaas A. L. Stochastic resonance in a superconducting loop with a Josephson junction. J. Appl. Phys., 1995, 77, p.2582.

- [3] Kramers H. A. Brownian motion in a field of force and the diffusion model of chemical reactions. Physica, 1940, 7, p. 284.
- [4] Турутанов О. Г., Шнырков В. И., Глухов А. М. Стохастико-параметрическое усиление узкополосных сигналов в одноконтактном интерферометре СКВИДа. ФНТ, 2008, 34, с. 45.
- [5] Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона.-М.: Мир, 1984.-640 с., гл. 12.
- [6] Turutanov O. G., Omelyanchouk A. N., Shnyrkov V. I., Bliokh Yu. P. Stochastic resonance-based input circuits for SQUIDs. Physica C, 2002, 372-376, Part 1, p. 239—241.
- [7] Глухов А. М., Турутанов О. Г., Шнырков В. И., Омелянчук А. Н. Стохастический резонанс в сверхпроводящих контурах с контактами Джозефсона. Численный эксперимент. ФНТ, 2006, 32, с. 1477.
- [8] Турутанов О. Г. Метастабильные токовые состояния и управляемый стохастический резонанс в сверхпроводящих пленках и квантовых интерферометрах. Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.22.-Харьков, 2009.—149 с.

## SUPERCONDUCTING QUANTUM ELECTRONICS BASED ON STOCHASTIC RESONANCE SYSTEMS

Turutanov O. G.<sup>1</sup>, Shnyrkov V. I.<sup>1</sup>, Melnik S. I.<sup>2</sup>, Slipchenko N. I.<sup>2</sup>, Larkin S. J.<sup>3</sup>

- <sup>1</sup>Institute for Low Temperature Physics and Engineering by B. I. Verkin, NAS Ukraine  
47 Lenina ave., Kharkov, 61103, Ukraine  
Ph.: +38-057-3410907, e-mail: turutano@it.kharkov.ua
- <sup>2</sup>Kharkov National University of Radioelectronics, MES Ukraine  
14 Lenina ave., Kharkov, 61166, Ukraine  
Ph.: +38-057-7401010
- <sup>3</sup>Scientific and industrial concern NAUKA  
2-B, 50-richya Zhovtnya Av., Kyiv, 03148, Ukraine  
Ph.: +380-044-236-10-85

**Abstract** — The principles are developed for amplification of weak informational signals in superconductive quantum interferometers (SQUIDs) based on the effect of stochastic resonance (SR) at arbitrary low temperature and in arrays of SR-SQUIDs. Numerically calculated gain is 30 dB under signal-to-noise ratio approaching to (10...20) dB. New rf field-controlled SR-antennas for SQUIDs are suggested.

### I. Introduction

Unusual phenomenon of stochastic resonance (SR) observed in non-linear dynamic systems leads to the amplification of weak informational signals at the expense of energy of thermal noise. Applying this effect to SQUIDs and controlling their stochastic dynamics due to the effect of stochastic-parametric resonance, one can obtain reasonable additional amplification in a wide temperature range.

### II. Main Part

Solving numerically the motion equation for magnetic flux in a superconducting ring of an rf SQUID with weak sine signal, noise flux and additional rf field in the right-hand part, we obtain gain as a function of amplitude of rf field and show that it is possible to have its maximal value at any (low) temperature. An additional amplification might be achieved by filling the area of a SQUID antenna with an array of identical SR-rings and controlling the gain by external rf field. The gain demonstrated in a single ring is about 30 dB. The signal-to noise ratio obtained in the previous works at this gain was 10 to 20 dB.

### III. Conclusion

It is shown that the use of SR and SPR effects for designing of new types of SR antennas for SQUIDs results in additional amplification of weak informational signals by one order of magnitude and higher, under arbitrary low temperatures. This shifts SQUID measurements and applications including experimental physics, electronics, geophysics, biomedicine, quantum informatics etc., to a principally higher level.