

*Краткие сообщения*

## Экспериментальное наблюдение вынужденных стохастических переходов в многоямном потенциале кольца ВЧ СКВИДа

О.Г. Турутанов, В.Ю. Ляхно, В.И. Шнырков

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: turutanov@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 4 июля 2014 г., опубликована онлайн 22 сентября 2014 г.

Экспериментально наблюдалось усиление слабого гармонического сигнала низкой частоты в одноконтактном сверхпроводящем квантовом интерферометре (кольце ВЧ СКВИДа), обусловленное стохастическими переходами между двумя и более метастабильными состояниями кольца под действием приложенного шумового потока различной интенсивности (эффект стохастического резонанса, СР). Помимо обычной картины СР, в бистабильной системе с гауссовым шумом наблюдались переходы между несколькими метастабильными состояниями многоямного потенциала кольца СКВИДа под действием бинарного шума, которые можно трактовать как своеобразную шумовую «спектроскопию» метастабильных состояний кольца с различными значениями захваченного магнитного потока.

Експериментально спостерігалось посилення слабого гармонічного сигналу низької частоти в одноконтактному надпровідному квантовому інтерферометрі (кільці ВЧ НКВІДу), яке обумовлено стохастичними переходами між двома і більш метастабільними станами кільця під дією прикладеного шумового потоку різної інтенсивності (ефект стохастичного резонансу, СР). Крім звичайної картини СР, в бистабільній системі з гауссовим шумом спостерігалися переходи між декількома метастабільними станами багатоямного потенціалу кільця НКВІДу під дією бінарного шуму, які можна трактувати як своєрідну шумову «спектроскопію» метастабільних станів кільця з різними значеннями захопленого магнітного потоку.

PACS: **74.40.+k** Флуктуации (шумы, хаос, неравновесная сверхпроводимость, локализация и т.д.);  
74.40.De Шум и хаос;  
85.25.Dq Сверхпроводящие устройства квантовой интерференции (СКВИДы);  
85.25.Cp Джозефсоновские устройства.

Ключевые слова: ВЧ СКВИД, стохастический резонанс, метастабильные состояния, многоямный потенциал, бинарный шум.

### 1. Введение

Сверхпроводящие квантовые интерферометрические датчики (СКВИДы) являются основой наиболее чувствительных на сегодняшний день магнитометров, которые широко используются и в физических экспериментах, и в прикладных областях — медицине, геофизике, промышленности. Чувствительность низкотемпературных СКВИДов и их квантовых аналогов СКУБИДов (SQUBIDs, сверхпроводящих кубит-детекторов) практически достигла квантового предела [1–3].

Однако с увеличением температуры  $T$  и индуктивности контура квантования  $L$  происходит увеличение неопределенности шумового потока, ухудшая разрешение по энергии (чувствительность) магнитометров. Особенно остро эта проблема стоит для ВТСП СКВИДов азотного уровня охлаждения, в которых приходится значительно уменьшать индуктивность контура квантования и, соответственно, чувствительность по магнитному полю. Тем не менее, как показано в работах [4–9], благодаря тем же термодинамическим флуктуациям и внешнему шуму чувствительность магнитомет-

ров может быть существенно улучшена за счет использования эффекта стохастического резонанса (СР).

Явление СР, открытое в 1980-х годах [10,11], проявляется в немонотонном увеличении отклика нелинейной, часто бистабильной, системы на слабый информационный периодический сигнал, характеристики которого на выходе системы существенно улучшаются при некотором оптимальном уровне шума. На самом деле для существования СР в конкретной системе достаточно, чтобы времена пребывания этой системы в ее метастабильных состояниях (МС) так или иначе зависели от интенсивности шума. Эффект СР обнаружен во многих естественных и искусственных системах, классических и квантовых, разработаны аналитические подходы и критерии оценки повышения степени упорядочения при воздействии шума [12,13]. Для аperiodических систем с сильным затуханием (которые чаще всего рассматриваются теоретически и исследуются экспериментально) устоявшийся термин «стохастический резонанс» не вполне корректен, скорее, следует говорить о «стохастической фильтрации» (СФ) [14]. Практически все ВТСП СКВИДы относятся именно к таким системам.

Несмотря на заметное число теоретических и модельных исследований СР в сверхпроводящем кольце, экспериментальных исследований стохастической динамики в СКВИДах (например, [4–6]), немного [15]. Поэтому в этой области остаются интересные, в том числе с практической точки зрения, вопросы. Например, можно ли в области интенсивных флуктуаций  $L \geq L_F = \Phi_0^2 / (4\pi^2 k_B T)$  существенно увеличить чувствительность ВТСП СКВИДов за счет СФ при определенном выборе их параметров? Здесь  $L_F$  — флуктуационная индуктивность,  $L_F \sim 10^{-10}$  Гн при  $T = 77$  К,  $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15}$  Вб — сверхпроводящий квант магнитного потока,  $k_B$  — постоянная Больцмана. Кроме того, отметим, что даже если система имеет много состояний, практически всегда в контексте СР и СФ рассматриваются только переходы между двумя МС. Свою специфику в стохастическую динамику интерферометров могут вносить также вид и статистика шума.

В настоящей работе мы экспериментально наблюдали усиление слабого гармонического сигнала низкой частоты в кольце ВЧ СКВИДа, обусловленное стохастическими переходами между двумя и более МС кольца под действием гауссова и бинарного шума различной интенсивности (эффект стохастической фильтрации).

## 2. Постановка задачи и методика эксперимента

В отсутствие флуктуаций число локальных минимумов потенциальной энергии контура квантования

$$u(x, x_e) = (x - x_e)^2 / 2 - \frac{\beta_L}{4\pi^2} \cos(2\pi x)$$

(число МС кольца) определяется безразмерным параметром нелинейности  $\beta_L = 2\pi L I_c / \Phi_0$ :  $n \approx 2\beta_L / \pi$ . Здесь  $x = \Phi / \Phi_0$  и  $x_e = \Phi_e / \Phi_0$  — безразмерные внутренний и внешний потоки, соответственно, энергия нормирована на  $\Phi_0^2 / 2L$ , а  $I_c$  — критический ток контакта.

Наши эксперименты были проведены на интерферометрах с низкоомными ( $R \sim 1$  Ом) джозефсоновскими контактами типа ScS (сверхпроводник–сужение–сверхпроводник), обладающими малой собственной емкостью ( $C \approx 3 \cdot 10^{-15}$  Ф) при больших  $\beta_L \approx 7-10$ . При таких параметрах реализуется случай большого затухания, характерный и для большинства ВТСП СКВИДов.

Учитывая малость  $C$  и  $R$ , можно пренебречь второй производной в уравнении движения потока [16] и привести его к виду, удобному для расчетов [7–9]:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\tau_L} \left[ x_e(t) - x + \frac{\beta_L}{2\pi} \sin(2\pi x) \right], \quad (1)$$

где  $\tau_L = L/R$  — время затухания потока в кольце. Как видно, уравнение описывает аperiodическую систему. Внешний поток  $x_e$  представляет собой сумму постоянного потока смещения ( $x_{dc} = 0,5$ ) для симметризации потенциала, слабого низкочастотного сигнала  $x_s = a \sin 2\pi f_s t$  ( $a \ll 1$ ) и некоррелированного (белого) гауссова шума  $x_N = \xi(t)$ ,  $\langle \xi(t) \cdot \xi(t') \rangle = 2D\delta(t-t')$ , где  $D$  — интенсивность шума. Однако и в расчетах, и в эксперименте шум имеет ограничение по частоте сверху. Чтобы считать его практически некоррелированным, частота среза  $f_c$  должна значительно превышать частоту сигнала:  $f_c \gg f_s$ . В наших экспериментах мы выбрали  $f_s = 37$  Гц и  $f_c = 50$  кГц. Генератор позволял получать шум как с гауссовым распределением, так и телеграфный шум от первичного реального источника (диода).

Исследуемый интерферометр (1 на рис. 1) был выполнен из ниобия в виде объемной (3D) самоэкраниро-

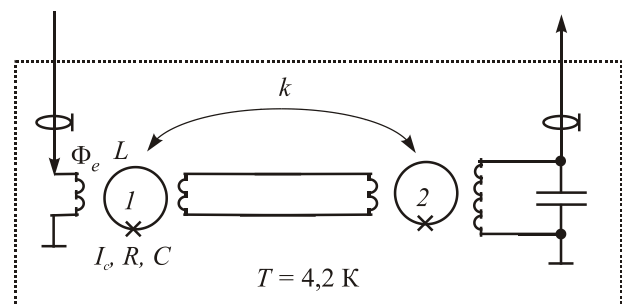


Рис. 1. Упрощенная схема измерений. На кольцо исследуемого интерферометра 1 действует создаваемый катушкой внешний магнитный поток  $\Phi_e$ . Поток в кольце измеряется ВЧ СКВИД магнитометром, обозначенным цифрой 2, через сверхпроводящий трансформатор магнитного потока. Коэффициент связи по потоку между кольцами обозначен  $k$ . Пунктирной линией показан сверхпроводящий свинцовый экран.

ванной тороидальной конструкции с регулируемым точечным контактом и связывался с измерительным ВЧ СКВИД магнитометром (2 на рис. 1) через сверхпроводящий трансформатор магнитного потока (коэффициент связи по потоку между кольцами интерферометров  $k = 0,05$ ). Конструкция датчика подробно описана в [2]. Спектральная плотность шума магнитного потока (чувствительность) магнитометра составляла  $S_{\Phi}^{1/2} \approx 2 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \Gamma \text{ц}^{1/2}$  в измеряемой полосе частот 2–200 Гц. Калибровка коэффициентов связи, потоков и токов катушек производилась по измерению амплитудно-частотных и сигнальных характеристик исследуемого интерферометра при изменении потока на  $\pm 5\Phi_0$ . Экспериментальная установка идеологически близка к опубликованной в [5] и будет описана в другой работе. Измерения проводились при температуре 4,2 К внутри трехслойного пермаллового и сверхпроводящего экранов. Выходной сигнал магнитометра подавался на спектроанализатор. Число аппаратно усредняемых фурье-спектров в каждом измерении составляло 16. Измерения проводили дважды, с информационным сигналом и без него, а в качестве результата бралась разность двух полученных спектров.

### 3. Результаты и обсуждение

Численные расчеты [4,5,7–9] показывают, что при увеличении интенсивности  $D$  гауссова шума спектральная плотность потока в кольце СКВИДа на частоте полезного сигнала быстро возрастает, достигает максимума и затем медленно спадает в полном соответствии с теорией [12,13].

На рис. 2(а) приведена рассчитанная численно по уравнению (1) зависимость спектральной плотности (амплитуды) потока внутри кольца интерферометра на частоте информационного сигнала  $S_{\Phi}^{1/2}(f_s)$  от среднеквадратичной амплитуды гауссова шума  $D^{1/2}$  (сплошная линия) и экспериментально полученные точки. Амплитуда информационного гармонического сигнала внутри исследуемого интерферометра составляла  $a = 0,015$  в единицах  $\Phi_0$ . Поведение интерферометра типично для картины СР (точнее, СФ) в бистабильной системе. На вставке рис. 2(а) показан спектр магнитного потока внутри кольца, соответствующий максимальному усилению сигнала. В этой точке средняя частота вызванных шумом переходов между МС (частота Крамерса [17])  $r_K \approx 2f_s$ , а спектр потока в кольце приобретает характер  $1/f$ . Для выбранного довольно большого  $\beta_L$  максимальное усиление, полученное в этом эксперименте, составляло около 10 дБ.

Иное поведение система демонстрирует при наличии бинарного (телеграфного) шума, амплитуда которого фиксирована, а случайной является фаза. Время пребывания системы в одном из ее МС в случае гауссова шума плавно меняется с увеличением интенсив-

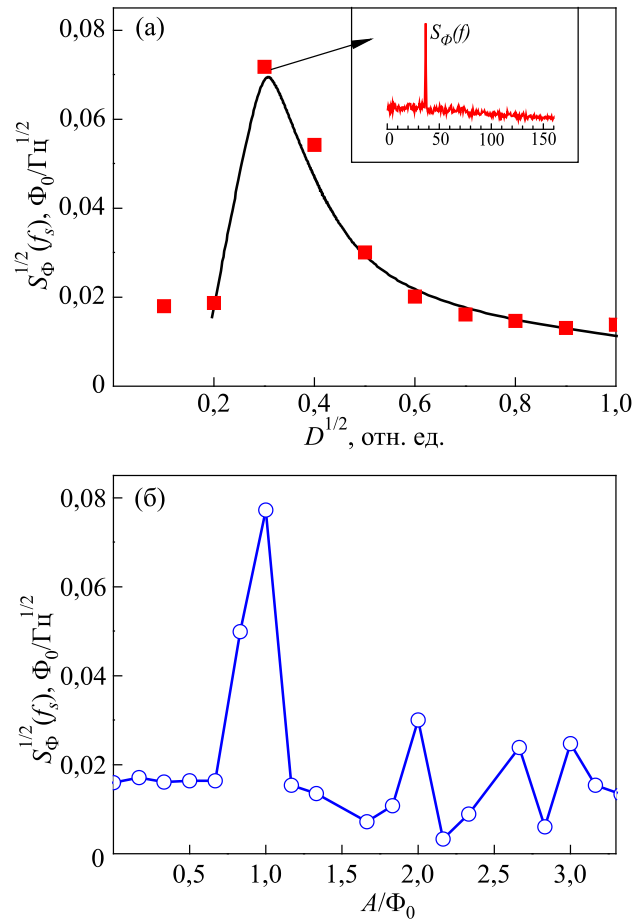


Рис. 2. (Онлайн в цвете) Амплитудная спектральная плотность  $S_{\Phi}^{1/2}$  магнитного потока в кольце ВЧ СКВИДа на частоте  $f_s$  усиляемого слабого гармонического сигнала в зависимости от среднеквадратичной амплитуды  $D^{1/2}$  гауссова шума (сплошная линия — численный расчет,  $\blacksquare$ ) — эксперимент (а) и нормированной амплитуды  $A/\Phi_0$  бинарного шума (б). Вставка на (а): экспериментальный спектр выходного сигнала в точке максимального усиления сигнала.

ности шума. В случае же бинарного шума система находится в одном определенном МС, пока амплитуда шума не станет достаточной для индуцированного перехода в другое МС. «Стохастическая синхронизация» в этой ситуации происходит между фазой полезного сигнала и случайной фазой бинарного шума.

Как было отмечено выше, явление СР обычно рассматривается в предположении о наличии двух МС, разделенных потенциальным барьером небольшой высоты для получения больших коэффициентов усиления. Для низкотемпературного СКВИДа это означает, что величина  $\beta_L$  должна быть в интервале 1–1,5. Однако ВТСП СКВИДы с азотным уровнем охлаждения, в которых использование СР может оказаться целесообразным, сохраняют поведение, характерное для безгистерезисного режима, вплоть до  $\beta_L \approx 3,5$  [18–21] из-за большой дисперсии флуктуаций магнитного по-

тока. В этой области интенсивных флуктуаций число МС может быть измерено с помощью СР.

Проведено исследование эффекта СФ в интерферометре с несколькими МС в зависимости от амплитуды внешнего телеграфного шума. На рис. 2(б) представлена амплитудная спектральная плотность  $S_{\Phi}^{1/2}$  магнитного потока внутри кольца на частоте полезного сигнала  $f_s$  в зависимости от амплитуды  $A$  бинарного шума в кольце, выраженной в единицах  $\Phi_0$ . Параметры сигнала те же, что и в предыдущем случае: частота  $f_s = 37$  Гц, амплитуда изменений потока в кольце  $a = 0,015$  ( $\Phi_0$ ). Амплитуда шумового магнитного потока внутри кольца изменялась от 0 до  $\sim 3,5 \Phi_0$ . Из приведенного на рис. 2(б) результата видно, что с увеличением амплитуды шума наблюдаются дополнительные максимумы усиления сигнала, соответствующие стохастическим переходам между несколькими МС кольца с различными значениями захваченного потока. Хорошая определенность амплитуды телеграфного шума позволила произвести своеобразную «спектроскопию» МС сверхпроводящего кольца интерферометра в пределе интенсивных флуктуаций. Оценочная величина  $\beta_L$  для этого интерферометра по измерениям АЧХ без внешнего шума составляла примерно 10.

#### 4. Выводы

Эффект СР (или, в случае аperiodической системы с сильным затуханием, СФ) позволяет получить некоторое усиление слабого периодического полезного сигнала за счет стохастической «синхронизации» вызванных шумом переходов между двумя или более метастабильными состояниями с этим полезным сигналом, что и наблюдается в эксперименте со сверхпроводящим квантовым интерферометром. Для получения достаточно большого усиления (как, например, в работе [5]), предсказываемого теорией (см. ссылки в работах [4,5,9]) и численными расчетами [8,9], необходимо оптимизировать параметры СКВИДа, в частности, использовать интерферометры с небольшими  $\beta_L \geq 1$ . Для ВТСП ВЧ СКВИДов в области интенсивных флуктуаций эффективный двухямный потенциал и максимальное улучшение характеристик слабых информационных сигналов за счет СР может наблюдаться в области  $\beta_L \approx 4$ .

Стохастическое усиление слабого регулярного сигнала наблюдается при вызванных шумом переходах не только между двумя соседними, но и несколькими метастабильными токовыми состояниями кольца сверхпроводящего интерферометра, особенно четко проявляющимися в случае бинарного шума, что позволяет трактовать полученную картину как некую «шумовую спектроскопию» метастабильных состояний системы.

1. M.B. Ketchen and J.M. Jaycox, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 736 (1982).
2. V.I. Shnyrkov, A.A. Soroka, and O.G. Turutanov, *Phys. Rev. B* **85**, 224512 (2012).
3. В.И. Шнырков, А.А. Сорока, А.М. Королев, О.Г. Турутанов, *ФНТ* **38**, 382 (2012) [*Low Temp. Phys.* **38**, 301 (2012)].
4. R. Rouse, S. Han, and J.E. Lukens, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 108 (1995).
5. A.D. Hibbs, A.L. Singsaas, E.W. Jacobs, A.R. Bulsara, J.J. Bekkedahl, and F. Moss, *J. Appl. Phys.* **77**, 2582 (1995).
6. A.D. Hibbs and B.R. Whitecotton, *Appl. Supercond.* **6**, 495 (1998).
7. O.G. Turutanov, A.N. Omelyanchouk, V.I. Shnyrkov, and Yu.P. Bliokh, *Physica C* **372–376**, 237 (2002).
8. А.М. Глухов, О.Г. Турутанов, В.И. Шнырков, А.Н. Омелянчук, *ФНТ* **32** 1477 (2006) [*Low Temp. Phys.* **32**, 1123 (2006)].
9. O.G. Turutanov, V.A. Golovanevskiy, V.Yu. Lyakhno, and V.I. Shnyrkov, *Physica A* **396**, 1 (2014).
10. R. Benzi, A. Sutera, and A. Vulpiani, *J. Phys. A* **14**, L453 (1981).
11. C. Nicolis and G. Nicolis, *Tellus* **33**, 225 (1981).
12. L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, and F. Marchesoni, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 223 (1998).
13. В.С. Анищенко, А.Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шимански-Гайер, *УФН* **169**, 7 (1999) [*Phys. Usp.* **42**, 7 (1999)].
14. Ю.Л. Климонтович, *УФН* **169**, 39 (1999) [*Phys. Usp.* **42**, 37 (1999)].
15. A.R. Bulsara, *Nature* **437**, 962 (2005).
16. А. Бароне, Дж. Патерно, *Эффект Джозефсона*, Мир, Москва (1984) [*Physics and Applications of the Josephson Effect*, Wiley, New York (1982)].
17. H.A. Kramers, *Physica* **7**, 284 (1940).
18. X.H. Zeng, Y. Zhang, B. Chesca, K. Barthel, Ya.S. Greenberg, and A.I. Braginski, *J. Appl. Phys.* **88**, 6781 (2000).
19. B. Chesca, *J. Low Temp. Phys.* **110**, 963 (1998).
20. Ya.S. Greenberg, *J. Low Temp. Phys.* **114**, 297 (1999).
21. V.I. Shnyrkov, *High-Temperature RF SQUIDS*, in: *Handbook of High-Temperature Superconductor Electronics*, N. Khare (ed.), New York, Marcel-Dekker (2003).

#### Experimental observation of induced stochastic transitions in multiwell potential of RF SQUID loop

O.G. Turutanov, V.Yu. Lyakhno, and V.I. Shnyrkov

It is found experimentally that a weak low-frequency harmonic signal in a single-junction-superconducting quantum interferometer (RF SQUID loop) is amplified due to stochastic transitions between two or more metastable states of the loop under the applied noise flux of varying intensity (the effect of stochastic resonance, SR). In addition to the usual SR effect in a bistable system with Gaussian noise, one can observe transi-

tions between multiple metastable states of the multiwell SQUID loop potential under the influence of binary noise, that may be interpreted as a peculiar kind of noise “spectroscopy” of the metastable states of the SQUID loop with different values of the trapped magnetic flux.

PACS: **74.40.+k** Fluctuations (noise, chaos, non-equilibrium superconductivity, localization, etc.);  
74.40.De Noise and chaos;  
85.25.Dq Superconducting quantum interference devices (SQUIDs);  
85.25.Cp Josephson devices.

Keywords: RF SQUID, stochastic resonance, metastable states, multiwell potential, binary noise.