

Управляемое стохастическое усиление слабого сигнала в сверхпроводящем квантовом интерферометре

О.Г. Турутанов, В.Ю. Ляно

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

М.Е. Пивовар

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина*

В.И. Шнырков

Киевский академический университет, бул. Вернадского, 36, г. Киев, 03142, Украина

Статья поступила в редакцию 26 июня 2018 г., опубликована онлайн 26 ноября 2018 г.

В одноконтрактном ниобиевом сверхпроводящем квантовом интерферометре (кольце ВЧ СКВИДа) наблюдается усиление слабого низкочастотного гармонического сигнала благодаря эффекту стохастического резонанса (СР) при внесении в кольцо квазибелого гауссова шумового потока. Экспериментально показано, что при неоптимальной интенсивности шумового потока, недостаточной для реализации условия СР, можно управлять средней частотой переходов кольца между его метастабильными состояниями и тем самым усилением слабого сигнала, получая максимально возможное усиление с помощью дополнительного детерминированного переменного магнитного потока с частотой, значительно превышающей частоту усиливаемого полезного сигнала. Сравниваются частотные характеристики усиления композитного многочастотного сигнала в режимах управляемого стохастического усиления и «чистого» СР.

Ключевые слова: ВЧ СКВИД, стохастический резонанс, управляемый стохастический резонанс, ScS-контакт, контакт Джозефсона.

1. Введение

Сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики (СКВИДы) на основе низко- и высокотемпературных сверхпроводников являются ключевым элементом в конструкции самых чувствительных магнитометров, широко используемых в лабораторных установках, промышленном оборудовании, биомедицинских приложениях, геофизике и т.п. Энергетическая чувствительность СКВИДов, достигшая квантовомеханического ограничения согласно соотношению неопределенности, ухудшается в шумном окружении, но может быть увеличена [1–6] благодаря тем же термодинамическим флуктуациям и внешнему шуму с использованием эффекта стохастического резонанса (СР).

Концепция СР была предложена в начале 1980-х [7,8]. СР имеет различные проявления, самое очевидное — немонотонное повышение отклика нелинейной системы на слабый информационный (часто периодический) сигнал. В результате сигнал усиливается и достигает максимума при определенной интенсивности шума. Другие «качественные характеристики» сигнала (например, отношение сигнал/шум) также улучшаются на выходе системы. Чтобы СР был возможен в конкретной системе, время пребывания системы в одном из ее метастабильных состояний (МС) должно быть функцией интенсивности шума. Эффект СР, как классический, так и квантовый, был обнаружен во многих природных и искусственных системах. К настоящему времени выполнено большое число подробных анали-

тических и экспериментальных исследований СР, разработаны критерии в различных подходах для оценки вызванного шумом упорядочения [9,10]. В аperiodических (неколебательных) системах с сильным затуханием (которые более других исследованы как теоретически, так и экспериментально) описываемое явление следовало бы правильнее называть «стохастической фильтрацией» (СФ), а не широко распространенным термином «стохастический резонанс» [11].

Хотя опубликовано заметное количество теоретических и модельных исследований СР в сверхпроводящем кольце, все еще мало экспериментов по изучению стохастической динамики в СКВИДах [12] (например, [1–3]). Поэтому в этой области остаются нерешенные задачи, включая возможные практические применения. Одна из таких проблем — получение максимального усиления сигнала при неоптимальном и изменяющемся уровне шума.

Если высота барьера фиксирована, максимальное стохастическое усиление может быть достигнуто изменением интенсивности шума [9,10], но во многих практических случаях интенсивность шума может оказаться ниже оптимальной, а изменение температуры устройства нежелательным. Коэффициентом СР усиления можно управлять путем изменения параметров интерферометра (в основном критического тока джозефсоновского контакта, т.к. индуктивность кольца трудно менять), но это изменит «рабочую точку» устройства, в которое входит интерферометр. Поэтому следует искать более удобные механизмы управления стохастическим усилением сигнала в СКВИДе при шуме ниже оптимального. Предложен ряд методов управления стохастическим усилением в различных системах, в том числе со СКВИДах, таких как подавление потенциального барьера в одноконтактном интерферометре СВЧ полем [13] (этот эффект позже [14] использовался для параметрического усиления слабого информационного сигнала в СКВИДе с СВЧ накачкой), динамичное нарушение симметрии потенциала смешиванием двух гармоник с различными амплитудами и начальными фазовыми сдвигами [15], изменение порога триггера Шмитта с частотой входного сигнала [16] и переключение системы в определенное время импульсным сигналом [17] и т.п. Отметим теоретическую работу [18], в которой предложен подход к управлению СР, подобный тому, который мы реализовали экспериментально; существенные отличия обсудим ниже.

В предлагаемой работе сообщается об экспериментальных результатах, демонстрирующих возможность управления стохастическим усилением слабого сигнала в кольце ВЧ СКВИДа путем добавления переменного магнитного потока с частотой, значительно превышающей частоту сигнала, и достаточно большой амплитудой, чтобы обеспечить увеличение средней частоты переходов кольца между его метастабильными токовыми

выми (магнитными) состояниями. Ранее мы обнаружили [19] этот эффект численным моделированием динамики магнитного потока в кольце ВЧ СКВИДа и назвали его «стохастико-параметрическим резонансом». Также приведены предварительные результаты расчетов усиления широкополосного составного (4-тонового) сигнала в режимах управляемого стохастического усиления и «чистого» стохастического резонанса.

2. Динамика ВЧ СКВИДа и техника эксперимента

Кольцо ВЧ СКВИДа является «сердцем» ВЧ СКВИД-магнитометров. Оно представляет собой сверхпроводящий контур с индуктивностью L , замкнутый джозефсоновским контактом с критическим током I_c , нормальным сопротивлением R и емкостью C (вставка на рис. 1). Предполагая синусоидальное соотношение ток-фаза $I_s(\varphi) = I_c \sin \varphi$ для джозефсоновского контакта, потенциальную энергию ВЧ СКВИДа, которая является суммой магнитной энергии кольца и энергии связи джозефсоновского контакта, можно записать в безразмерных единицах следующим образом:

$$u(x, x_e) = \frac{(x - x_e)^2}{2} - \frac{\beta_L}{4\pi^2} \cos(2\pi x), \quad (1)$$

где $x = \Phi / \Phi_0$ и $x_e = \Phi_e / \Phi_0$ — безразмерные внутренний (в кольце) и внешний (приложенный снаружи) магнитные потоки соответственно, $\Phi_0 \approx 2,07 \cdot 10^{-15}$ Вб — квант магнитного потока, $\beta_L = 2\pi L I_c / \Phi_0$ — безразмерный параметр нелинейности; энергия нормирована на $\Phi_0^2 / 2L$. Параметр β_L определяет число и глубину локальных минимумов потенциальной энергии СКВИДа,

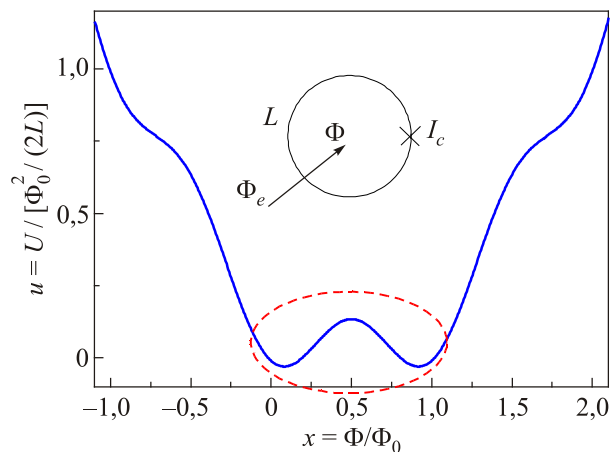


Рис. 1. Нормированная потенциальная энергия сверхпроводящего кольца с джозефсоновским контактом в зависимости от нормированного магнитного потока в кольце. Параметр $\beta_L = 5,3$, внешний постоянный магнитный поток $x_e = 0,5$. Штриховой линией выделена область с двумя эквивалентными метастабильными состояниями. На вставке — схематическое изображение кольца ВЧ СКВИДа; параметры объясняются в тексте.

потенциал становится двух- или многоямным при $\beta_L > 1$.

Реальное устройство с топологией кольца обычно представляет собой намного более сложный узел, чем схематически показано на рис. 1. Испытуемый интерферометр изготовлен как самоэкранированная тороидальная объемная (3D) конструкция из ниобия с подстраиваемым точечным контактом (рис. 2), что позволяло менять критический ток контакта и параметр β_L во время эксперимента.

Конструкция устройства подробно описана в [20]. В наших экспериментах исследованы интерферометры с джозефсоновскими контактами типа ScS (сверхпроводник–сужение–сверхпроводник) с $\beta_L \approx 4, 7-5, 4$, низким импедансом ($R \sim 1$ Ом) и относительно малой емкостью ($C \approx 3-200$ фФ); индуктивность тороидального контура $L \approx 0,3$ нГн. Такой набор значений параметров (малые C и R) определяет передемпфированный режим СКВИДа как стохастического осциллятора и позволяет пренебречь членом со второй производной в уравнении движения потока [21], приведя его к форме, удобной для вычислений и компьютерного моделирования [4–6]:

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

где $\tau_L = L/R$ — время затухания потока в кольце. Как видно, это уравнение описывает апериодическую систему. Внешний поток x_e представляет собой сумму постоянного потока смещения ($x_{dc} = 0,5$), симметризирующего потенциал, слабого низкочастотного сигнала

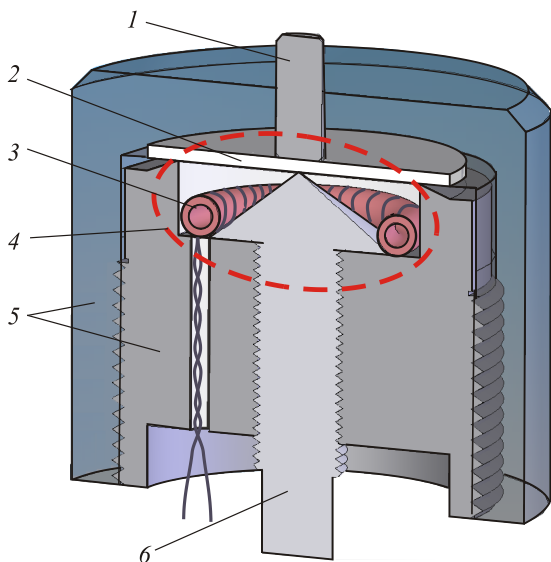


Рис. 2. Тороидальная конструкция интерферометра в разрезе: 1 — толкатель, 2 — ниобиевая мембрана, 3 — катушка связи, 4 — контур квантования, 5 — корпус, 6 — окисленная ниобиевая игла. Все детали, кроме 3, выполнены из ниобия.

$x_s = a \sin(2\pi f_s t)$ ($a \ll 1$), некоррелированного белого гауссова шума $x_N = \xi(t)$, $\langle \xi(t)\xi(t') \rangle = 2D\delta(t-t')$, где D — интенсивность (дисперсия) шума, и высокочастотного управляющего сигнала $x_{ctrl} = A \sin(2\pi f_{ctrl} t)$ с $f_{ctrl} \gg f_s$ и амплитудой A , сравнимой со среднеквадратичным отклонением шума $s = D^{1/2}$. Как в расчетах, так и в экспериментах шум является квазибелым, его полоса ограничена сверху частотой среза f_{cut} . Чтобы считать его практически некоррелированным в контексте обсуждаемой модели СР, частота среза должна значительно превышать частоту сигнала, $f_{cut} \gg f_s$. В наших расчетах и экспериментах выбраны $f_s = 37$ Гц, $f_{cut} = 50$ кГц и $f_{ctrl} = 50$ кГц. Гауссов квазибелый шум в расчетах моделировался датчиком случайных чисел с нормальным распределением и цифровым фильтром нижних частот, а в эксперименте генерировался реальным физическим источником (диодом) с последующей обработкой и прохождением через фильтр нижних частот.

Экспериментальная установка идеологически подобна установке в статье [2]. Блок-схема электрической части экспериментальной установки показана на рис. 3.

Переменный магнитный поток вводится в кольцо испытуемого интерферометра I с помощью катушки связи L_a , ток в которой определяется суммой напряжений с генераторов низкочастотного сигнала 3, шума 4, высокочастотного управляющего сигнала 5 и источника постоянного смещения 6. Испытуемый интерферометр I связан с ВЧ СКВИД-магнитометром 2, измеряющим результирующий поток внутри кольца I , через сверхпроводящий трансформатор потока $L_{tr1} L_{tr2}$ с коэффициентом связи $k = 0,05$. Резистор $r = 0,3$ Ом, шунтирующий трансформатор, образует с ним фильтр нижних частот с частотой среза $r/L_{tr} \approx 300$ кГц. Он исключает заметное влияние колебаний ВЧ накачки (30 МГц) в колебательном контуре измерительного СКВИДа на испытуемый интерферометр. Спектральная плотность магнитного шумового потока (чувствительность) магнитометра $S_\Phi^{1/2} \approx 2 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \text{Гц}^{1/2}$ в рабочей полосе частот от 2 до 200 Гц. Сигнал, измеренный СКВИД-магнитометром, подавался на один из каналов двухлучевого осциллографа и низкочастотный спектроанализатор Briel&Kjaer типа 2033. Число аппаратно усредняемых спектров составляло 16. Измерения проводились под управлением персонального компьютера. Коэффициенты связи, потоки и ВЧ токи в катушках определялись по измерениям амплитудно-частотной и вольт-полевой (сигнальной) характеристик испытуемого интерферометра при изменении потока в кольце в пределах $\pm 5\Phi_0$. Во время настройки осциллограф использовался в двухкоординатном (X - Y) режиме. В канале настройки испытуемого интерферометра использовался низкотемпературный малошумящий микро мощный усилитель [22] на транзисторах типа НЕМТ с полосой 10–100 МГц и регулируемым усилением 10–80 дБ, помещенный в сверхпроводящий экран рядом со СКВИДаами. В свою

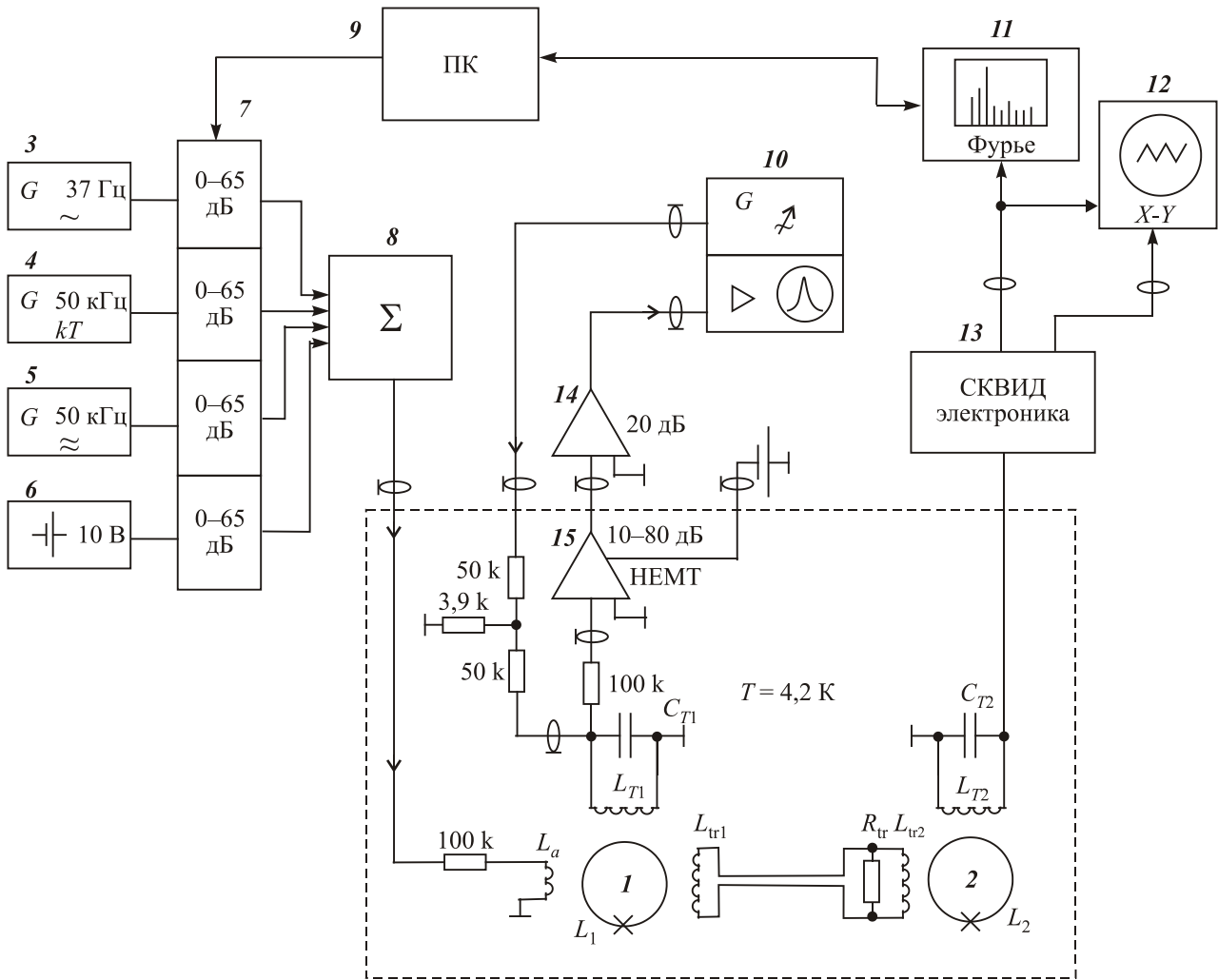


Рис. 3. Блок-схема электрической части экспериментальной установки. Штриховой линией ограничена низкотемпературная зона криостата со сверхпроводящим и трехслойным пермаллоевым экранами. Обозначения: 1 — исследуемое кольцо интерферометра, 2 — кольцо ВЧ СКВИД-магнитометра, 3 — генератор низкочастотного сигнала ГЗ-34, 4 — генератор квазибелого шума Г2-52, 5 — генератор высокочастотного сигнала ГЗ-48, 6 — источник постоянного смещения, 7 — блок управляемых аттенуаторов, 8 — сумматор сигналов, 9 — персональный компьютер, 10 — прибор для измерения амплитудно-частотных характеристик Х1-48, 11 — спектроанализатор Bruel&Kjaer 2033, 12 — осциллограф С1-83, 13 — электроника ВЧ СКВИДа, 14 — «теплый» усилитель ВЧ, 15 — микромощный охлаждаемый усилитель ВЧ на транзисторах НЕМТ. Фильтры вводов в криостат для упрощения не показаны.

очередь, криостат с жидким гелием (температура 4,2 К) находился в трехслойном пермаллоевом экране. Все вводы в криостат были зафильтрованы от СВЧ и ВЧ помех, для постоянного смещения и питания ВЧ усилителей использовались малогабаритные батареи.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 4 приведена фотография с экрана двухлучевого осциллографа (см. схему на рис. 3) с осциллограммами тока в катушке L_a , создающей внешний входной магнитный поток в исследуемом интерферометре 1 (верхний луч), и результирующего магнитного потока в нем, измеренного магнитометром 2 через сверхпроводящий трансформатор $L_{tr1}-L_{tr2}$.

Интерферометр демонстрирует поведение, типичное для сценария СР (или СФ) в бистабильной системе. Видно, что входной поток представляет собой сумму синусоидального сигнала и квазибелого шума, а результирующий поток в кольце интерферометра определяется его переключениями между двумя ближайшими магнитными метастабильными состояниями. Поскольку мы не использовали фильтр двух состояний (компаратор), дающий на выходе телеграфный сигнал, на нижней осциллограмме виден эффект внутриямных колебаний.

Численные расчеты [1,2,4–6] показали, что спектральная плотность внутреннего потока в кольце СКВИДа на частоте полезного сигнала быстро растет, достигает максимума, а затем медленно падает с уве-

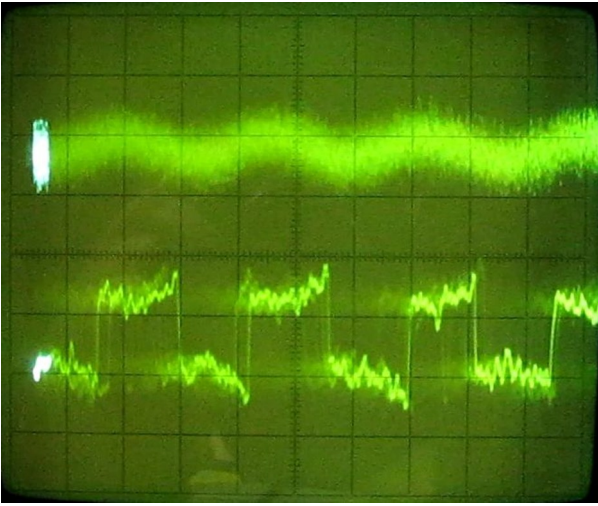


Рис. 4. Осциллограммы внешнего магнитного потока, приложенного к кольцу интерферометра (вверху) и измеренного в кольце результирующего магнитного потока (внизу).

личением интенсивности гауссова шума D в соответствии с теорией [9,10].

На рис. 5 показана экспериментально полученная амплитудная спектральная плотность $S_{\Phi}^{1/2}(f_s)$ потока Φ внутри кольца интерферометра на частоте f_s гармонического сигнала в зависимости от среднеквадратичной амплитуды $D^{1/2}$ гауссова шума.

В этом эксперименте получено максимальное усиление около 10 дБ. Интересно отметить, что точная форма этой «классической» кривой СР оказывается довольно чувствительной к конкретному потенциальному рельефу $U(\Phi)$. Сравнивая расчетные кривые с

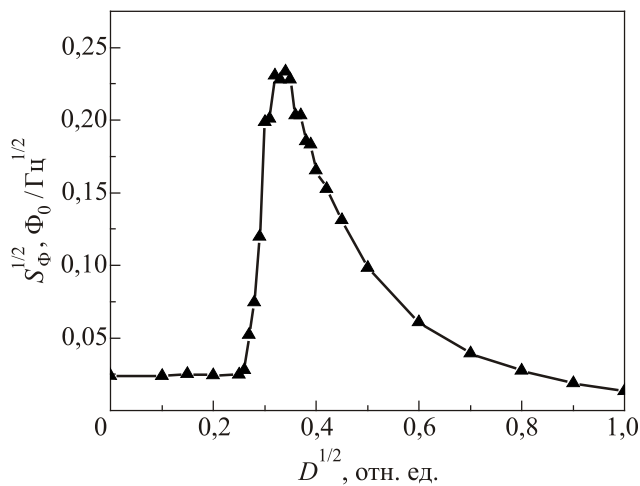


Рис. 5. Экспериментально полученная амплитудная спектральная плотность $S_{\Phi}^{1/2}(f_s)$ магнитного потока внутри кольца ВЧ СКВИДа на частоте сигнала f_s в зависимости от среднеквадратичной амплитуды $D^{1/2}$ гауссова шума. Амплитуда сигнала $a=0,05$, частота сигнала $f_s=37$ Гц, частота среза шума $f_{\text{cut}}=50$ кГц, параметр нелинейности $\beta_L=4,71$, температура $T=4,2$ К.

экспериментальной, обнаружили, что наилучшее согласие наблюдается не в традиционно используемой модели туннельного контакта (1), а в модели джозефсоновского контакта типа ScS с учетом конечной температуры [23]. Хотя ниобиевая игла (6 на рис. 2) термически окислена, и критический ток, вычисленный из выражения для β_L , достаточно мал ($I_c=5,2$ мкА), реальная структура точечного контакта может включать в себя как туннельную, так и непосредственную проводимость в различных пропорциях, затрудняя формулирование конкретной модели для адекватного ее описания. Подробное обсуждение сравнения эксперимента с различными моделями предполагается изложить в дальнейших публикациях.

Ранее [19] компьютерным моделированием было показано, что СР усиление сигнала может быть максимизировано при недостаточном уровне шума путем введения в интерферометр управляющего высокочастотного поля, которое повышает частоту спонтанных переходов между метастабильными состояниями вплоть до выполнения условия стохастической синхронизации с частотой полезного сигнала. Мы назвали этот кооперативный эффект «стохастико-параметрический резонанс» (СПР), поскольку высокочастотное управляющее поле воздействует на джозефсоновскую индуктивность как на параметр устройства.

Однако было предложено много различных комбинаций сигналов для управления коэффициентом СР усиления (см. Введение), которые тем или иным способом изменяют потенциал. В частности, разница может заключаться в частоте вспомогательного сигнала: если она выше, чем обратное время затухания потока в кольце R/L , то этот сигнал работает подобно температуре, понижая высоту барьера [24]. Чтобы подчеркнуть различия между этим и другими эффектами и обсуждаемым здесь СПР (адиабатический предел, $f_{\text{ctrl}} \ll R/L$), лучше назвать его «стохастический резонанс с детерминированной добавкой» («deterministically-assisted stochastic resonance» (DASR)). В работе [18] содержится теоретическая разработка подобной идеи. Авторы [18] добавили переменное поле достаточно большой амплитуды, но с частотой только в 2–3 раза выше частоты слабого сигнала, проанализировав случаи соизмеримых и несоизмеримых частот. Мы предложили [19] «замену шуму» в виде периодических колебаний с частотой, которая существенно превышает частоту слабого сигнала, $f_{\text{ctrl}} > 10f_s$: практически $f_{\text{ctrl}} \approx 1000f_s$.

На рис. 6 показаны экспериментальные кривые амплитудной спектральной плотности $S_{\Phi}^{1/2}(f_s)$ магнитного потока Φ в кольце на частоте сигнала f_s в зависимости от амплитуды A переменного магнитного потока (управляющий сигнал) при различных уровнях шума $D^{1/2}$. Видно, что если интенсивность шума ниже оптимального значения, необходимого для получения максимального стохастического усиления (сравн. с рис. 5),

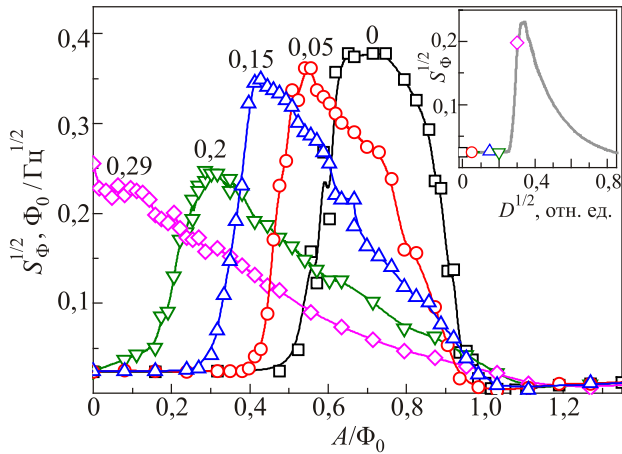


Рис. 6. (Онлайн в цвете) Экспериментально полученная амплитудная спектральная плотность $S_{\Phi}^{1/2}(f_s)$ магнитного потока внутри кольца ВЧ СКВИДа на частоте сигнала f_s в зависимости от амплитуды A высокочастотного переменного магнитного потока при различных неоптимальных среднеквадратичных амплитудах $D^{1/2}$ гауссова шума (значения возле кривых). Амплитуда сигнала $a = 0,05$, частота сигнала $f_s = 37$ Гц, частота среза шума $f_{\text{cut}} = 50$ кГц, частота управляющего переменного ВЧ потока $f_{\text{ctrl}} = 50$ кГц, параметр нелинейности $\beta_L = 4,71$, температура $T = 4,2$ К. На вставке — СР кривая с точками при интенсивностях шума $D^{1/2}$, соответствующих значениям параметра кривых на основном рисунке.

то максимальное усиление может быть достигнуто с помощью дополнительного высокочастотного сигнала управления. Так как $f_{\text{ctrl}} \gg f_s$, нет никакой экспериментальной разницы между режимами соизмеримости и несоизмеримости частот. Все нежелательные интермодуляционные составляющие находятся далеко за пределами частотной области сигнала и его первых гармоник, и могут быть легко отфильтрованы.

Для указанных под рис. 6 параметров эксперимента можно построить обобщенную зависимость нормированной амплитуды A_n управляющего ВЧ поля, необходимого для получения максимального усиления η_{max} при заданном (неоптимальном) уровне шума (рис. 7). Амплитуда ВЧ поля нормирована на ее величину A_{max} , соответствующую максимуму усиления при отсутствии шума, а среднеквадратичная амплитуда шума s — на ее величину s_{max} , соответствующую максимуму СР усиления η_{max} в отсутствие управляющего ВЧ сигнала ($A = 0$).

В первом приближении зависимость близка к линейной. Это означает некую «эквивалентность» и аддитивность шума и высокочастотного поля как его «заменителя» для получения необходимого усиления слабого сигнала благодаря эффекту DASR. Оба фактора, действуя кооперативно, вызывают спонтанные переходы между метастабильными состояниями кольца. Утверждение об аддитивности справедливо для случая

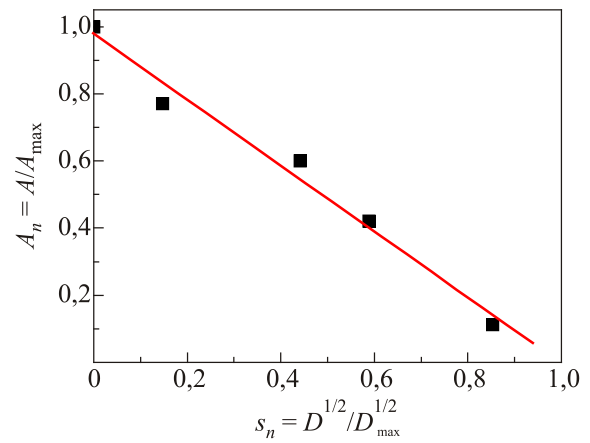


Рис. 7. Нормированная амплитуда ВЧ поля A_n , соответствующая максимальному DASR усилению η_{max} , в зависимости от нормированной интенсивности шума s_n , построенная по экспериментальным данным. Параметры эксперимента те же, что на рис. 6.

малого сигнала (линейного отклика). Для сигналов, амплитуда которых сравнима с высотой барьера, будут проявляться нелинейные эффекты.

Для оценки частотных характеристик (полоса усиления, гармонические и интермодуляционные искажения) при стохастическом и стохастико-параметрическом усилении сделан предварительный модельный расчет для сигнала, состоящего из суммы четырех гармонических составляющих различной частоты (35, 45, 120 и 330 Гц). Частоты выбирались из соображений получить как низко-, так и высокочастотные продукты смешивания сигналов при нелинейном усилении, возникающем при

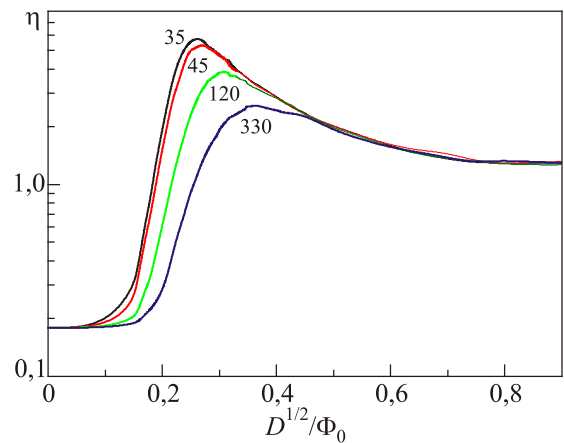


Рис. 8. (Онлайн в цвете) Стохастический резонанс для сигнала сложной формы: численный расчет зависимости коэффициентов усиления четырех частотных составляющих композитного сигнала от интенсивности шума s . Амплитуды каждой из четырех гармонических составляющих $a_{1-4} = 0,01 \Phi_0$, частоты компонент в Гц указаны возле кривых, параметр $\beta_L = 5,3$, частота среза квазиглобального шума $f_{\text{cut}} = 50$ кГц, число усредняемых спектров 300.

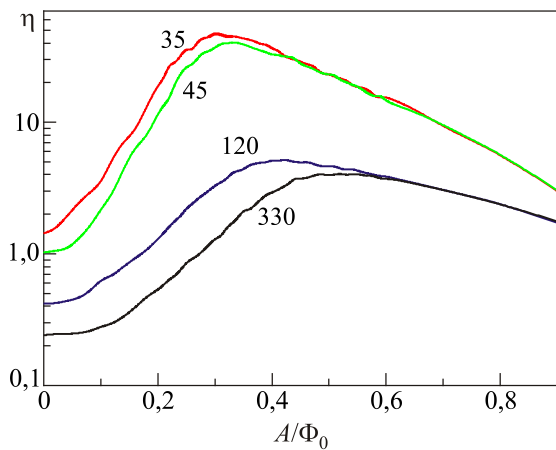


Рис. 9. (Онлайн в цвете) Стохастико-параметрический резонанс (DASR) для сигнала сложной формы: численный расчет зависимости коэффициентов усиления η четырех частотных составляющих композитного сигнала от амплитуды управляющего ВЧ поля A при фиксированном уровне шума $D^{1/2} = 0,2 \Phi_0$, меньшем оптимального. Частоты компонент в Гц указаны возле кривых. Частота управляющего поля $f_{ctrl} = 50$ кГц, остальные параметры те же, что на рис. 8.

большой амплитуде сигнала. Рассмотрим только случай малого сигнала (линейного отклика), а результаты нелинейного усиления будут изложены в других работах. На рис. 8 показаны кривые коэффициента СР усиления η для такого слабого композитного сигнала в зависимости от интенсивности шума (значения параметров расчета — в подрисуночной подписи).

Аналогичные кривые зависимости коэффициента усиления η в зависимости от амплитуды A управляющего высокочастотного поля рассчитаны для эффекта DASR при фиксированном уровне шума $D^{1/2} = 0,2 \Phi_0$, мень-

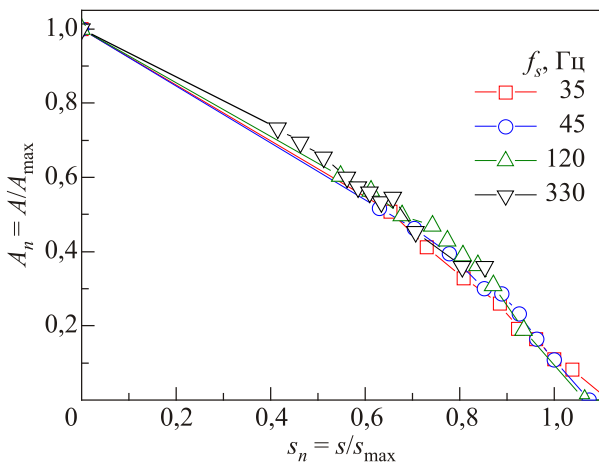


Рис. 10. (Онлайн в цвете) Универсальная зависимость (в приведенных координатах) амплитуды управляющего поля A_n , необходимой для достижения максимального усиления η_{max} сигналов различной частоты, в зависимости от заданного уровня шума s_n . Каждая кривая нормирована индивидуально. Параметры расчета те же, что на рис. 8 и 9.

шем оптимального (рис. 9). Видно, что, несмотря на «эквивалентность» шума и управляющего ВЧ сигнала в смысле получения максимального усиления полезного сигнала на определенной частоте (рис. 6), полосы усиливаемых частот различаются (для эффекта DASR полоса сужается). Это видно из сравнения коэффициентов усиления четырех гармонических компонент одинаковой амплитуды, которые составляют сложный композитный сигнал, в эффектах СР (рис. 8) и DASR (рис. 9).

Тем не менее если нормировать амплитуду ВЧ поля и шума (как было сделано на рис. 7) отдельно для каждой частотной составляющей, то оказывается, что кривые для всех частотных компонент сигнала сливаются в одну, демонстрируя универсальность «закона управления усилением» в эффекте DASR с помощью ВЧ поля для каждой конкретной частоты (рис. 10), хотя по абсолютной величине коэффициенты усиления отличаются (см. рис. 9).

4. Заключение

В работе экспериментально наблюдался эффект стохастического резонанса в одноконтактном сверхпроводящем квантовом интерферометре (кольце ВЧ СКВИДа), который проявлялся в усилении слабого гармонического низкочастотного сигнала (режим линейного отклика). Экспериментально подтверждено существование СР-подобного эффекта усиления слабого сигнала, обнаруженного нами ранее численным моделированием, вызванного, в отличие от СР, кооперативным действием шумового (стохастического) магнитного потока внутри системы и периодического (детерминированного) высокочастотного поля. Мы предложили называть его «стохастический резонанс с детерминированной добавкой» («deterministically-assisted stochastic resonance», DASR).

Продемонстрирована возможность управления стохастическим усилением слабого гармонического сигнала и максимизация коэффициента усиления сигнала при уровне шума ниже оптимального с помощью эффекта DASR. Для слабого гармонического сигнала (режим линейного отклика) показана эквивалентность действия шума и высокочастотного управляющего поля на изменение коэффициента усиления, однако расчет показал, что частотные характеристики усиления все же различны при управляемом (DASR) и «чистом» стохастическом (СР) усилении. Также из расчета следует, что амплитуда управляющего ВЧ поля при любом заданном субоптимальном уровне шума, необходимая для получения максимально возможного усиления, не зависит от частоты сигнала при условии, что она намного ниже частот ВЧ поля и частоты среза квазибелого шума.

Таким образом, эффект DASR может быть использован как в устройствах на основе СКВИДа, так и в

прочих приборах, обладающих необходимой для СР нелинейностью, вследствие своей универсальности, для точной настройки коэффициента стохастического усиления в условиях неоптимального или изменяющегося шумового окружения. В последнем случае необходимо обеспечить обратную связь и некий адаптивный алгоритм подстройки для поддержания стабильного усиления. Следует также учитывать обнаруженное различие в частотных свойствах СР и DASR усиления слабых сигналов. Для практического использования описанного эффекта следует провести дальнейшие исследования, включающие изучение нелинейности усиления, изменение отношения сигнал/шум для сигналов различной амплитуды и спектрального состава и т.д.

1. R. Rouse, S. Han, and J.E. Lukens, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 108 (1995).
2. A.D. Hibbs, A.L. Singasas, E.W. Jacobs, A.R. Bulsara, J.J. Bekkedahl, and F. Moss, *J. Appl. Phys.* **77**, 2582 (1995).
3. A.D. Hibbs and B.R. Whitecotton, *Appl. Supercond.* **6**, 495 (1998).
4. O.G. Turutanov, A.N. Omelyanchouk, V.I. Shnyrkov, and Yu.P. Bliokh, *Physica C* **372–376**, 237 (2002).
5. А.М. Глухов, О.Г. Турутанов, В.И. Шнырков, А.Н. Омелянчук, *ФНТ* **32**, 1477 (2006) [*Low Temp. Phys.* **32**, 1123 (2006)].
6. O.G. Turutanov, V.A. Golovanevskiy, V.Yu. Lyakhno, and V.I. Shnyrkov, *Physica A* **396**, 1 (2014).
7. R. Benzi, A. Sutera, and A. Vulpiani, *J. Phys. A* **14**, L453 (1981).
8. C. Nicolis and G. Nicolis, *Tellus* **33**, 225 (1981).
9. L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, and F. Marchesoni, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 223 (1998).
10. В.С. Анищенко, А.Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский-Гайер, *УФН* **169**, 7 (1999) [*Phys.-Usp.* **42**, 7 (1999)].
11. Ю.Л. Климонтович, *УФН* **169**, 39 (1999) [*Phys.-Usp.* **42**, 37 (1999)].
12. A.R. Bulsara, *Nature* **437**, 962 (2005).
13. V.I. Shnyrkov, V.A. Khlus, and G.M. Tsoi, *J. Low Temp. Phys.* **39**, 477 (1980).
14. V.I. Shnyrkov and Yu.P. Bliokh, *XII Trilateral German-Russian-Ukrainian Seminar on High-Temperature Superconductivity*, Program and Abstracts, Kiev (1999), p. 81.
15. G. Schmid and P. Hänggi, *Physica A* **351**, 95 (2005).
16. L. Gammaitoni, M. Löcher, A. Bulsara, P. Hänggi, J. Neff, K. Wiesenfeld, W. Ditto, and M.E. Inchiosa, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 4574 (1999).
17. J. Mason, J.F. Lindner, J. Neff, W.I. Ditto, A.R. Bulsara, and M.L. Spano, *Phys. Lett. A* **277**, 13 (2000).
18. S. Savel'ev, A.L. Rakhmanov, and F. Nori, *Phys. Rev. E* **72**, 056136 (2005).
19. О.Г. Турутанов, В.И. Шнырков, А.М. Глухов, *ФНТ* **34**, 37 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 37 (2008)].
20. V.I. Shnyrkov, A.A. Soroka, and O.G. Turutanov, *Phys. Rev. B* **85**, 224512 (2012).

21. A. Barone and G. Paterno, *Physics and Applications of the Josephson Effect*, Wiley, New York (1982).
22. А.М. Королев, В.М. Шульга, О.Г. Турутанов, В.И. Шнырков, *ПТЭ* **4**, 37 (2015) [*Instrum. Exp. Tech.* **58**, 478 (2015)].
23. O.G. Turutanov, V.Yu. Lyakhno, and V.I. Shnyrkov, *arXiv.org:1506.00953*.
24. В.А. Хлус, *ФНТ* **12**, 25 (1986) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **12**, 14 (1986)].

Кероване стохастичне підсилення слабого сигналу в надпровідному квантовому інтерферометрі

О.Г. Турутанов, В.Ю. Ляхно, М.Є. Пивовар,
В.І. Шнырков

У одноконтактному ніобієвому надпровідному квантовому інтерферометрі (кільці ВЧ НКВІДу) спостерігається підсилення слабого низькочастотного гармонійного сигналу завдяки ефекту стохастичного резонансу (СР) при внесенні до кільця квазібілого гауссова шумового потоку. Експериментально показано, що при неоптимальній інтенсивності шумового потоку, яка недостатня для реалізації умови СР, можна керувати середньою частотою переходів кільця між його метастабільними станами і тим самим підсиленням слабого сигналу, отримуючи максимально можливе підсилення за допомогою додаткового детермінованого змінного магнітного потоку з частотою, що значно перевищує частоту корисного сигналу, що підсилюється. Порівнюються частотні характеристики посилення композитного багаточастотного сигналу в режимах керованого стохастичного підсилення та «чистого» СР.

Ключові слова: ВЧ НКВІД, стохастичний резонанс, керований стохастичний резонанс, ScS-контакт, контакт Джозефсона.

Controlled stochastic amplification of a weak signal in a superconducting quantum interferometer

O.G. Turutanov, V.Yu. Lyakhno, M.E. Pivovarov,
and V.I. Shnyrkov

The amplification of a weak low-frequency harmonic signal due to stochastic resonance (SR) effect is observed in a single-junction superconducting quantum interferometer (RF SQUID loop) when quasi-white Gaussian noise magnetic flux is applied to the loop. It is experimentally shown that, at suboptimal flux noise intensity which is insufficient for SR, the mean rate of transitions between the metastable states of the loop, and thus the signal gain, can be controlled by an additional deterministic alternating magnetic flux with frequency being much higher than that of the useful signal to provide the maximal possible gain. The frequency characteristics of a multi-tone composite signal amplification in the cases of controlled stochastic amplification and “pure” stochastic resonance are compared to each other.

Keywords: RF SQUID, stochastic resonance, controlled stochastic resonance, ScS contact, Josephson junction.