

05.4; 09

© 1992

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ
В РАДИОЧАСТОТНОМ КЕРАМИЧЕСКОМ ВТСП СКВИДЕ

Е.В. И л ь и ч е в, В.В. К у т ы р е в

В рамках резистивной модели для джозефсоновского контакта [1] замкнутое им сверхпроводящее кольцо (интерферометр) в присутствии внешнего магнитного поля описывается уравнением

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \beta_c^{-1/2} \frac{d\varphi}{dt} + \sin\varphi + \frac{\varphi}{l} = \frac{\varphi_e}{l}, \quad (1)$$

где φ_e - внешний магнитный поток, φ - разность фаз на джозефсоновском контакте. Обе величины нормированы на $\Phi_0/2\pi$, где $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб - квант магнитного потока. В уравнении использованы безразмерные параметры $l = \frac{2\pi L I_c}{\Phi_0}$, $\beta = \frac{2\pi R^2 C I_0}{\Phi_0}$.

Здесь R и C - соответственно сопротивление и емкость джозефсоновского контакта, I_c - его критический ток, L - индуктивность сквида.

Анализ динамики интерферометра показывает, что при увеличении β переход из одного стационарного состояния в другое меняет характер - предпочтительными оказываются многоквантовые переходы [2]. При дальнейшем росте β несколько конечных стационарных состояний становятся равновероятными. Это означает возможность возникновения стохастичности в интерферометре. Специально проведенные эксперименты на интерферометрах с прижимными контактами $Nb-Nb$ [3] оказались в хорошем согласии с моделью. Здесь показано возникновение стохастичности при увеличении β .

При исследовании азотных ВЧ сквидов был зафиксирован новый тип неустойчивости, связанный со значительной несинусоидальностью токофазовой зависимости слабой связи [4]. К сожалению, автор не приводит экспериментальных кривых, однако из текста ясно, что проводилось исследование вольт-полевой характеристики сквида в зависимости от температуры. Таким образом, описано развитие неустойчивости при уменьшении I_c слабой связи (что соответствует уменьшению l) вплоть до полного хаоса.

В данной работе показано, что в азотном ВТСП сквиде возможно возникновение неустойчивости за счет выбора рабочей точки при постоянных β и l .

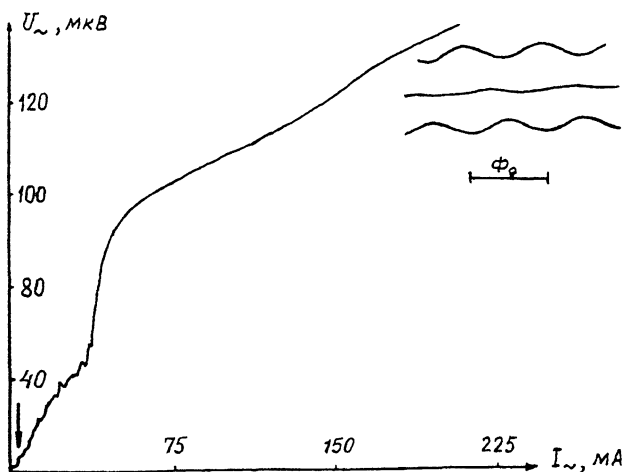


Рис. 1. ВЧ ВАХ и серия сигнальных характеристик. Ток накачки для сигнальных характеристик определяется пересечением их продолжения с ВЧ ВАХ.

Исследуемые датчики были изготовлены из керамики состава $YBa_2Cu_3O_x$ с $T_c \approx 90$ К. Они представляют собой полые цилиндры с внутренним диаметром 0.5 мм, толщиной стенки 1 мм и высотой 3 мм. По образующей цилиндра делается прорезь, в которой оставлена перемычка с характерными размерами 30–100 мкм. В отверстии цилиндра размещается катушка контура, резонансная частота которого 25–30 МГц, добротность $Q \approx 30$. Мы записывали зависимость величины переменного напряжения на резонансном контуре U_{\sim} от тока накачки I_{\sim} (ВЧ ВАХ) и от постоянного тока в катушке резонансного контура $I_{=}$ (сигнальная или вольт-полевая характеристика). Схема измерений изложена ранее в [5]. Исследования проводились в жидком азоте в комбинированных экранах – из магнитомягких материалов и на основе $YBa_2Cu_3O_x$ керамики (сверхпроводящих).

На рис. 1 представлена ВЧ ВАХ сквида, записанная на резонансной частоте системы контур – сквид и сигнальные характеристики, полученные при различных амплитудах тока накачки. Основной отличительной особенностью представленной ВЧ ВАХ является „шумовая“ область на начальном участке кривой. За этой областью (при „больших“ амплитудах тока накачки) сквид ведет себя обычным образом, то есть ВЧ ВАХ и сигнальные характеристики ничем не отличаются от известных (например, [6]).

Для исследования особенности на начальном участке ВЧ ВАХ мы записали сигнальные характеристики при различных токах накачки (рис. 2). Уровень тока накачки для кривой 1 показан стрелкой на рис. 1. Кривая 2 получена при амплитуде I_{\sim} , порядка $10^{-2} \phi_0$.

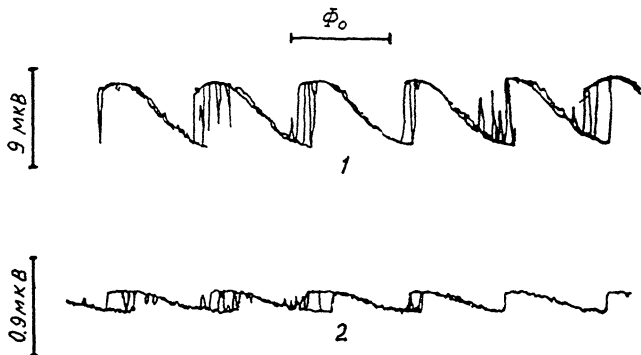


Рис. 2. Сигнальные характеристики. Ток накачки для кривой 1 указан стрелкой на рис. 1, для кривой 2 его амплитуда соответствует магнитному потоку $\approx 10^{-2} \Phi_0$.

Для анализа полученных результатов, в предположении малой емкости слабой связи, запишем полный ток, протекающий через нее:

$$i_4 = f(\varphi) - \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{\Phi_0}{2\pi R I_0}, \quad (2)$$

где $f(\varphi)$ – сверхпроводящая компонента тока, зависящая от разности фаз на берегах. Поскольку мы наблюдаем изменение импеданса системы контур-интерферометр от внешнего магнитного поля в случае, когда поток накачки много меньше Φ_0 , в первом приближении можно считать, что $\varphi_e \approx \varphi$ (для обычного сквида это соответствует случаю $l \ll 1$, так называемый безгистерезисный режим [1]). Представляя $\varphi = \varphi_{\sim} + \varphi_{=}$, где φ_{\sim} и $\varphi_{=}$ соответственно переменная и постоянная части магнитного потока, и учитывая, что $\varphi_{\sim} \ll 1$, получаем дифференцированием по времени из (2):

$$\frac{di_4}{dt} = \frac{df(\varphi_{=})}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi_{\sim}}{dt} + \frac{d^2\varphi_{\sim}}{(dt)^2} \cdot \frac{\Phi_0}{2\pi R I_0}. \quad (3)$$

Измеряемое напряжение U_n пропорционально di_4/dt , следовательно, при постоянной и малой амплитуде φ_{\sim} сигнальная характеристика пропорциональна производной токо-фазовой зависимости по внешнему потоку.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. В устойчивой области сигнальной характеристики $f(\varphi)$ является монотонной функцией.

2. Неустойчивость сигнальной характеристики возникает периодически с периодом $\approx \Phi_0$ (рис. 2).

3. В области неустойчивости система скачком переходит из одного состояния в другое. Следовательно (с учетом пп. 1 и 2), $f(\varphi)$ является неоднозначной функцией.

4. При больших потоках накачки поведение слабой связи в данном эксперименте неотличимо от джозефсоновского.

С нашей точки зрения, полученную картину можно объяснить таким образом. Слабая связь интерферометра состоит из множества параллельно и последовательно соединенных джозефсоновских контактов, что и является причиной необычной токо-фазовой зависимости. В случае малых амплитуд φ_n при изменении $\varphi =$ возникает перераспределение межгранулярных токов в слабой связи. Это вызывает наблюдаемый нами шумовой фон даже в устойчивой области сигнальной характеристики. В случае больших амплитуд φ_n потери в контуре обусловлены тем, что каждый период накачки слабая связь переходит в нормальное состояние. Здесь поправка от перераспределения межгранулярных токов мала. Если дополнительно предположить, что времена переключения межгранулярных токов много больше, чем обратная частота накачки, становится ясной устойчивая работа сквида при больших амплитудах φ_n .

В заключение нам хотелось бы поблагодарить А.В. Артамошина, К.В. Мицена за изготовление датчиков, В.А. Жаботинского за интерес к работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона. М.: Мир, 1984. 639 с.
- [2] Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985. 319 с.
- [3] Дмитренко И.М., Конотоп Д.А., Цой Г.М., Шнырков В.И. // ФНТ. 1983. № 6. С. 345.
- [4] Polushkin V.N. Proc. of 6th Int. Symp. on Weak Supercond., 20-24 May 1991 Smolenice, Czechoslovakia, World Scientific, P. 147.
- [5] Закосаренко В.М., Ильичев Е.В., Тулин В.А. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 17. С. 90.
- [6] Антонова И.Ю., Закосаренко В.М., Ильичев Е.В., Розенфланц В.Ж., Тулин В.А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 3. С. 135.

Поступило в Редакцию
3 июня 1992 г.