

Исследование спектральной плотности мощности в цепочках индуктивно связанных безгистерезисных джозефсоновских контактов

А. С. Мясников^{1,4,*}, А. Л. Панкратов^{1,2,3,†}, Е. В. Панкратова^{4‡}

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, д. 23

²Институт физики микроструктур РАН
Россия, 603950, ГСП-105, Нижний Новгород

³ЛКН НГТУ им. Р.Е. Алексеева
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

⁴Волжская государственная академия водного транспорта
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5А

В работе на примере параллельной цепочки индуктивно связанных джозефсоновских контактов проведено исследование спектральных характеристик генерации. Исследовано влияние числа контактов и параметра связи на изменение ширины линии генерации.

PACS: 05.40.Ca, 74.81.Fa.

УДК: 53.043.

Ключевые слова: джозефсоновские контакты, спектр, шум.

Системы с джозефсоновскими переходами обладают уникальными физическими свойствами, эффективное использование которых способствует развитию целого ряда приложений, охватывающих различные области науки и техники [1]. В частности, современные схемы быстрой одноквантовой логики, представляющие собой чипы с высокой степенью интеграции джозефсоновских переходов, широко используются при создании высокопроизводительных вычислительных систем и систем обработки изображений [2]; реализация стандарта Вольта с использованием цепочки последовательно включенных туннельных джозефсоновских контактов позволяет получить 1 В с высокой точностью и упростить процесс калибровки прецизионных аналого-цифровых преобразователей и цифровых вольтметров [3, 4]. На основе сверхпроводников создаются генераторы узкополосного электромагнитного излучения, параметрические усилители, преобразователи частоты, детекторы и другие сверхпроводниковые аналого-цифровые устройства, отличающиеся рекордно высокой чувствительностью и высокими значениями рабочих частот. Одной из основных задач, возникающих в контексте создания высокостабильных генераторов, является задача исследования спектральных характеристик джозефсоновской генерации с целью получения значительного уменьшения ширины линии при наличии внешних и внутренних флуктуаций в многоэлементных массивах джозефсоновских контактов. В данной работе исследование формы и ширины линии генерации проведено на примере параллельной цепочки индуктивно связанных джозефсоновских контактов.

В настоящее время разработано много моделей, учи-

тывающих различные свойства джозефсоновских переходов. Однако для описания фазовой динамики контактов наиболее широкое распространение получила резистивно-шунтированная модель (RCSJ) [1]. В рамках данной модели по закону Кирхгофа полный ток I , проходящий через джозефсоновский контакт, определяется суммой джозефсоновского тока $I_j = I_c \sin \phi$, нормального тока $I_n = V/R_n$ и емкостного тока $I_d = CdV/dt$:

$$I = I_c \sin \phi + \frac{\Phi_0}{2\pi R_n} \frac{d\phi}{dt} + \frac{\Phi_0 C}{2\pi} \frac{d^2\phi}{dt^2}, \quad (1)$$

которое после введения безразмерного времени $\tau = t(2\pi I_c / (\Phi_0 C))^{1/2}$ принимает вид:

$$\frac{d^2\phi}{d\tau^2} + \alpha \frac{d\phi}{d\tau} + \sin \phi = i_{dc}, \quad (2)$$

где $i_{dc} = I/I_c$ — нормированный постоянный ток, проходящий через джозефсоновский контакт. Коэффициент диссипации $\alpha = \beta^{-1/2}$, где $\beta = 2\pi C I_c R_n^2 / \Phi_0$ — параметр Маккамбера–Стюарта, определяющий вид вольт-амперной характеристики (ВАХ) джозефсоновского контакта. В частности, ВАХ с большим гистерезисом наблюдаются для контактов с диэлектрическим (туннельным) барьером (SIS-контакты), имеющих обычно большие величины β . Для контактов с барьером из нормального металла (SNS-контакты) $\beta < 1$ и наблюдается обратимая ВАХ. Известно так же, что безгистерезисная ВАХ может наблюдаться и для туннельных джозефсоновских переходов, шунтированных извне достаточно малым сопротивлением $R \ll \alpha R_n$. Именно такие переходы (позволяющие получить $\beta < 1$ и сохранить хорошие джозефсоновские свойства) широко используются для генерации и усиления одноквантовых импульсов при построении цифровых схем на основе быстрой одноквантовой логики [5].

*E-mail: alexander@myasnikov.tel

†E-mail: alp@ipmras.ru

‡E-mail: pankratova@vgavt-nn.ru

Для изучения спектральных характеристик генерации в параллельной цепочке индуктивно связанных джозефсоновских контактов рассмотрим систему:

$$\frac{d^2\phi_j}{d\tau^2} + \alpha \frac{d\phi_j}{d\tau} + \sin\phi_j = i_{dc} + \varepsilon(\phi_{j-1} - 2\phi_j + \phi_{j+1}) + i_f(\tau), \quad (3)$$

где $j = 1, \dots, n$ – номер контакта в цепочке, ε – параметр связи, равный $\varepsilon = 1/l$, где l – безразмерная индуктивность между соседними элементами цепочки. Флуктуационный ток $i_f(\tau)$ моделируется белым гауссовым шумом: $\langle i_f(\tau) \rangle = 0$, $\langle i_f(\tau) i_f(\tau + \tau^*) \rangle = 2\alpha\gamma\delta(\tau^*)$, где γ – безразмерная интенсивность шума. Параметр затухания $\alpha = 3$, поэтому ВАХ джозефсоновского контакта является безгистерезисной. Граничные условия на краях цепочки имеют вид: $\phi_0(\tau) = \phi_1(\tau)$, $\phi_n(\tau) = \phi_{n+1}(\tau)$.

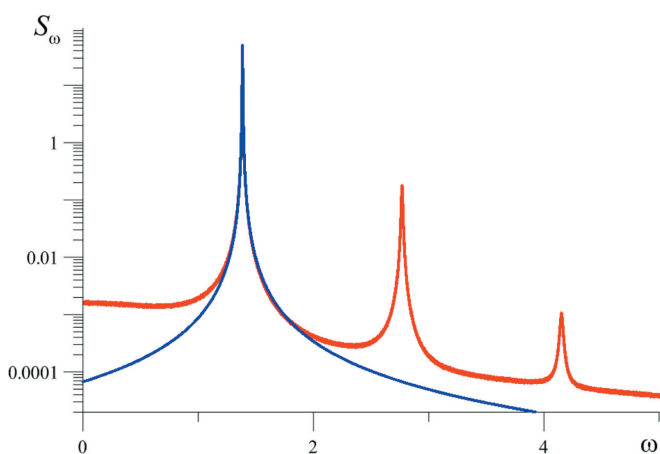


Рис. 1: Спектральная плотность мощности напряжения на выходе джозефсоновского контакта, посчитанная численно при $\gamma = 0,001$ (кривая красного цвета). Синяя кривая – кривая Лоренца

Известно, что малые широкополосные флуктуации приводят к спектру, состоящему из низкочастотной части и серии линий гармоник джозефсоновской генерации, уширенных по Лоренцу [1]. Поэтому на рис. 1 на красную кривую, численно полученную для спектральной плотности мощности напряжения одиночного джозефсоновского контакта, наложим кривую Лоренца (синего цвета):

$$S_{L\omega}(\omega) = \frac{S_0\Delta\omega}{(\omega - \omega_J)^2 + (\Delta\omega)^2}. \quad (4)$$

Аппроксимация с помощью выражения (4) численно полученных спектральных кривых при изменении параметра инжектируемого тока i_{dc} позволяет получить зависимость ширины линии $\Delta\omega(i_{dc})$. График получаемой таким образом зависимости представлен точками на рис. 2.

С другой стороны, для определения ширины линии генерации в пределе большого затухания можно использовать формулу Лихарева [1]:

$$\Delta\omega(i_{dc}) = \frac{2\gamma(i_{dc}^2 + 0.5)}{i_{dc}^2 - 1}. \quad (5)$$

График зависимости $\Delta\omega(i_{dc})$, получаемой согласно (5), показан кривой синего цвета на рис. 2.

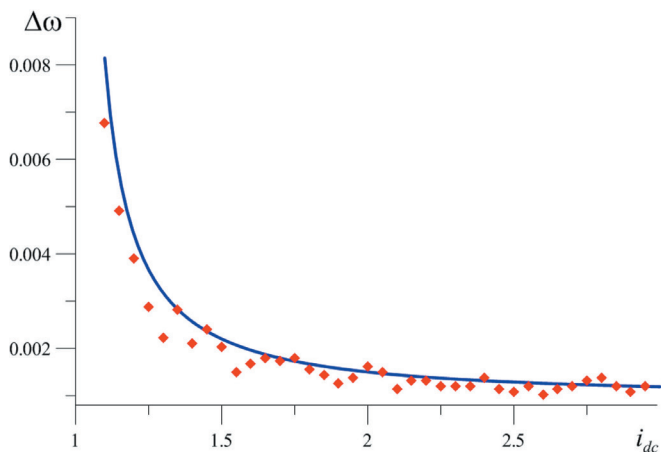


Рис. 2: Уменьшение ширины линии генерации при увеличении значений инжектируемого тока i_{dc}

Из графиков рис. 2 видно, что формула Лихарева (5) даёт хорошее совпадение с результатами численного счёта.

Для цепочек, состоящих из разного числа джозефсоновских контактов, численно получены зависимости $\Delta\omega(i_{dc})$. Показано, что увеличение числа элементов в цепочке приводит к уменьшению ширины линии джозефсоновской генерации [6]. Изучен характер изменения зависимости $\Delta\omega(n)$ при различных значениях параметра связи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 14-02-31727, № 12-01-00694) и МОН РФ (гранты № 3.2054.2014/К и № 02.В.49.21.0003).

- [1] Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. (М.: Наука, 1985).
 [2] Олейник В.Ф. и др. Сборник научных трудов. Радиотехника. **155**. С. 7.(2008).
 [3] Hamilton C.A. Rev. Sci. Instrum. **71**, N. 10. P. 3611 (2000).
 [4] Боровицкий С.И. и др. Журнал технической физики. **72**.

С. 64. (2002).

- [5] Lotkhov S.V. et al. Appl. Phys. Lett. **89**. P. 132115. (2006).
 [6] Корнев В.К., Арзуманов А.В. Письма в ЖТФ. **26**. С. 23. (2000).

Power spectral density calculation for chains of inductively coupled non-hysteretic Josephson junctions

A. S. Myasnikov^{1,4,a}, A. L. Pankratov^{1,2,3,b}, E. V. Pankratova^{4c}

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod, 603950, Russia

²Institute for Physics of Microstructures of RAS. Nizhny Novgorod, 603950, Russia

³LCN, Nizhny Novgorod R.E. Alexeev State Technical University. Nizhny Novgorod, 603950, Russia

⁴Volga State Academy of Water Transportation. Nizhny Novgorod, 603950, Russia.

E-mail: ^aalexander@myasnikov.tel, ^balp@ipmras.ru, ^cpankratova@vgavt-nn.ru

For a parallel chain of inductively coupled Josephson junctions we investigated the spectral characteristics of the generation. Changes in the spectral linewidth versus the number of junctions and the coupling parameter are examined.

PACS: 05.40.Ca, 74.81.Fa.

Keywords: Josephson junctions, spectrum, noise.

Сведения об авторах

1. Мясников Александр Сергеевич — студент; тел.: +7(905) 663-72-01, e-mail: alexander@myasnikov.tel.
2. Панкратов Андрей Леонидович — докт. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИФМ РАН; тел.: (905) 191-32-23, e-mail: alp@ipmras.ru.
3. Панкратова Евгения Валерьевна — канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры математики ФБОУ ВПО ВГАВТ; тел.: (831) 419-78-37, e-mail: pankratova@vgavt-nn.ru.