

**Н.В. Колотинский<sup>1</sup>, В.К. Корнев<sup>1</sup>, И.И. Соловьев<sup>2</sup>,  
Н.В. Кленов<sup>1</sup>, А.В. Шарафиев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> МГУ имени М. В. Ломоносова

<sup>2</sup> НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени  
М.В. Ломоносова

## **Численное моделирование устройств сверхпроводниковой электроники**

*Представлен программный продукт PSCAN для численного моделирования сосредоточенных цепей устройств сверхпроводниковой электроники. Синтезированы два типа базовых ячеек для формирования на их основе сверхпроводящих квантовых решеток, которые могут быть использованы для создания широкополосных усилителей и активных электрически малых антенн*

**Ключевые слова:** численное моделирование, сверхпроводниковая электроника

### **Введение.**

Развитие сверхпроводниковой электроники, в основе которой лежит использование макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках, таких как эффект КИ Джозефсона и эффект макроскопической квантовой интерференции, открывает новые возможности для прогресса телекоммуникационных технологий, технологий обработки и защиты информации.

Хорошо известны рекордные достижения, полученные в области низкочастотных устройств на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров, или сквидов (англ.: SQUID – Superconducting Quantum Interference Device), в которых достигнуто энергетическое разрешение порядка  $10^{-30} \dots 10^{-32}$  Дж/Гц, то есть близкое к постоянной Планка  $h$ , и чувствительность по магнитному потоку  $\delta\Phi/(\Delta F)^{1/2}$  порядка  $(10^{-5} \dots 10^{-6})\Phi_0$ , где  $\Phi_0 = h/2e \approx 2 \cdot 10^{-15}$  Вб – квант магнитного потока. Такие магнитометры нашли применение в магнитокардиографии, магнитоэнцефалографии, геофизике, в системах сверхнизкочастотной связи, устройствах неразрушающего контроля металлических конструкций.

Джозефсоновские элементы характеризуются очень высоким быстродействием: характерная частота  $F_c$  джозефсоновских контактов на основе низкотемпературных сверхпроводников лежит в диапазоне сотен гигагерц, а в случае высокотемпературных сверхпроводников может достигать единиц и даже десятков терагерц. Высокое быстродействие, высокая чувствительность, предельно низкая энергия переключения джозефсоновских элементов  $E_J = \Phi_0 I_c = 2 \cdot 10^{-15}$  Вб  $\times 10^{-4}$  А  $\approx 10^{-18}$  Дж открывает большие перспективы для разработки аналоговых и цифровых устройств, которые способны работать в более высокочастотных диапазонах сигналов, обеспечивать более высокие скорости обработки информации. Прогресс современных цифровых технологий в значительной степени связывается с развитием сверхпроводниковых цифровых устройств на основе быстрой одноквантовой логики, известной как RSFQ-логика (Rapid Single Flux Quantum logic), которая была впервые предложена и введена в разработку в лаборатории криоэлектроники физического факультета МГУ [1, 2].

Крайне низкая величина энергии переключения джозефсоновских элементов и их высокое быстродействие, допускающее тактовые частоты устройств на основе низкотемпературных сверхпроводников до 100 ГГц, позволяют одновременно наращивать как быстродействие, так и степень интеграции сверхпроводниковых цифровых устройств.

Использование макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках позволяет также создавать высокочувствительные широкополосные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) [3, 4]. Это делает возможным создание широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой сигналов в гигагерцовом и выше (десятки ГГц) диапазонах частот [5-7].

В данной статье представлен программный пакет PSCAN, предназначенный для численного моделирования сверхпроводниковых устройств, а также разработанные с его помощью сверхпроводниковые квантовые решетки, которые служат для создания на их основе широкополосных усилителей и активных электрически малых антенн (ЭМА). Электрически малые антенны могут быть использованы в широкополосных приемных системах с прямой оцифровкой сигналов.

### **Программный пакет PSCAN**

В основе всех компьютерных программ для автоматизированного расчета цифровых и аналоговых полупроводниковых электронных схем лежит использование уравнений Кирхгоффа для этих цепей, и поэтому данные программы не могут быть применены для анализа устройств сверхпроводниковой электроники в силу неприменимости для них уравнений Кирхгоффа. В отличие от полупроводниковых схем, анализ сверхпроводниковых цепей должен выполняться на основе уравнений баланса джозефсоновских фаз для сверхпроводящих контуров этой цепи, то есть, используя так называемый метод узловых фаз.

Программный комплекс PSCAN (Personal Superconductor Circuit Analyzer), разработанный в лаборатории криоэлектроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [8, 9], является одним из наиболее эффективных автоматизированных программных пакетов для численного анализа сосредоточенных сверхпроводниковых электронных схем, которые могут содержать от десятков до нескольких тысяч джозефсоновских элементов.

Высокая эффективность комплекса PSCAN достигается за счет использования автоматически изменяющегося переменного шага интегрирования (по времени) при численном решении системы дифференциальных уравнений. Такая система уравнений генерируется внутри программного пакета автоматически на основе заданной структуры исследуемой схемы и используемых моделей джозефсоновских элементов. Для описания структуры схемы используется специальный внутренний язык, в состав которого входят условные обозначения моделей джозефсоновских элементов и всех возможных элементов схемы, таких как резисторы, емкости, сверхпроводящие индуктивности, сверхпроводящие трансформаторы, а также генераторы фазы, тока и напряжения. В описании структуры (один или несколько файлов с расширением \*.cir) указывается, к каким номерам узлов исследуемой схемы подключены ее элементы,

модели этих элементов, а также входные параметры, в том числе те, которые предусматривается изменять в процессе моделирования схем (раздел EXTERNAL), и выходные величины (раздел VALUE).

После этого на основании *sig*-файлов, содержащих информацию о структуре схемы, входных параметрах и выходных величинах, создается итоговый файл-проект (с расширением \*.prj) для данной схемы. Затем осуществляется трансляция указанного файла-проекта, в процессе которой внутри PSCAN генерируется необходимая система уравнений и создается исполняемый файл (с расширением \*.cbe), позволяющий затем выполнять различные типы анализа данной схемы: моделирование динамики, расчет вольт-амперных и сигнальных характеристик и т.д. Программный пакет PSCAN позволяет также моделировать процессы в присутствии квазибелых шумов, вычислять спектр моделируемых процессов, в частности, спектр джозефсоновской генерации и ширину спектральной линии.

С помощью программного пакета PSCAN были разработаны базовые ячейки сверхпроводящих квантовых цепочек и решеток для создания на их основе широкополосных усилителей и активных электрически малых антенн, предназначенных для использования в гигагерцовом и выше диапазонах частот.

### **Сверхпроводящие квантовые цепочки и решетки**

Сверхпроводящие квантовые цепочки и решетки представляют собой однородные периодические структуры на основе ячеек, характеризующихся высокой линейностью отклика напряжения на магнитное поле. Такие структуры позволяют создавать широкополосные усилители и активные электрически малые антенны с высокой линейностью характеристик и большим динамическим диапазоном, возрастающим с увеличением числа ячеек  $N$  как  $\sqrt{N}$ .

Нами были разработаны две базовые ячейки для построения сверхпроводящих квантовых цепочек и решеток. Первая ячейка представляет собой, так называемый би-сквид [10], который содержит в себе как двухконтактный, так и одноконтактный сквиды (см. рис. 1а). При оптимально выбранных параметрах этого устройства выполняемое одноконтактным сквидом нелинейное преобразование входного магнитного сигнала в разность фаз джозефсоновских переходов (см. рис. 1б) может быть полностью обратным по отношению к выполняемому двухконтактным сквидом нелинейному преобразованию разности джозефсоновских фаз в напряжение. Поэтому отклик напряжения такого би-сквида на приложенный магнитный сигнал может быть сделан очень близким к треугольному виду (см. отклик на рис. 1в, показанный сплошной линией; штриховой линией показан отклик обычного сквида)

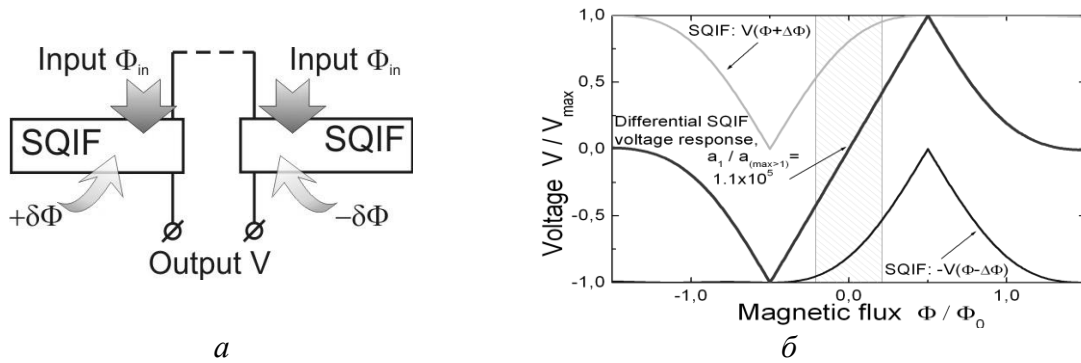


Рис. 2.

Вторая базовая ячейка представляет собой цепь, состоящую из двух дифференциально включенных параллельных СКИФ (SQIF - Superconducting Quantum Interference Filter [11]), противоположно смещенных магнитным потоком  $\delta\Phi$  определенной величины (см. рис. 2а) [12]. В отличие от обычной параллельной цепочки джозефсоновских переходов, соединенных небольшими сверхпроводящими индуктивностями одинаковой величины, что обеспечивает приложение одинаковых величин магнитного сигнала к каждой такой секции, СКИФ предполагает неоднородное распределение магнитного потока вдоль такой параллельной цепочки. При оптимальном выборе закона распределения магнитного сигнала форма боковых сторон центрального пика отклика напряжения СКИФ становится максимально близкой к параболическому закону. Вычитание смещенных друг относительно друга парабол, осуществляемое в рассматриваемой дифференциальной ячейке дает строго линейный отклик напряжения ячейки в целом (см. рис. 2б).

Обе предложенные ячейки были детально изучены теоретически с использованием аналитических и численных методов для определения области оптимальных параметров и наиболее точного воспроизведения их в разработанной затем тонкопленочной топологии этих ячеек. Последовательные цепочки ячеек были изготовлены посредством стандартной ниобиевой технологии формирования джозефсоновских структур с плотностью критического тока  $4,5 \text{ кА/см}^2$  и исследованы экспериментально [13, 14].

Интегрирование сверхпроводящей квантовой цепочки с индивидуальными для каждой ячейки сверхпроводящими трансформаторами магнитного потока или с одним общим трансформатором позволяет создать активную электрически малую антенну. Нами был изготовлен и экспериментально исследован прототип активной ЭМА на

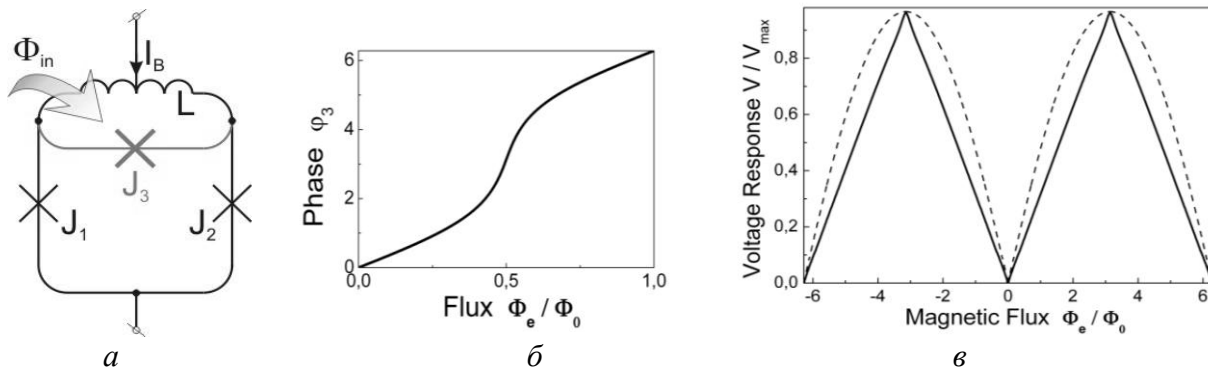


Рис. 1.

основе цепочки из 80 дифференциальных СКИФ-ячеек, интегрированной с общим сверхпроводящим трансформатором магнитного потока [Шарафиев]. Вся интегральная схема размещена на стандартном чипе  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  с двухрядным расположением контактных площадок по его периметру [13] и занимает доступную площадь  $3,3 \times 3,3 \text{ мм}^2$ . Измеренная крутизна преобразования магнитного сигнала в напряжение составила 750 мкТ/мкВ, а линейность преобразования, измеренная на частоте сигнала 300 кГц, составляла 70 дБ [15].

Возможен также другой подход к построению активных антенн, свободный от использования сверхпроводящих трансформаторов потока. В качестве активной антенны могут быть использованы непосредственно двумерные сверхпроводящие квантовые решетки с несверхпроводящим последовательным или последовательно-параллельным соединением ячеек. Отсутствие общего трансформатора потока устраняет существование между ячейками цепочки дополнительных электрических и магнитных связей, которые, как правило ухудшают степень линейности характеристики системы в целом.

### **Заключение**

Использование программного пакета PSCAN для численного моделирования сосредоточенных сверхпроводниковых цепей позволило нам синтезировать две базовые ячейки для создания сверхпроводящих квантовых цепочек и решеток. Такие структуры позволяют создавать на их основе широкополосные усилители и активные электрически малые антенны (ЭМА) для гигагерцового и выше диапазонов частот. Разработанные сверхпроводящие квантовые решетки обеспечивают высокую линейность характеристик и большой динамический диапазон. Создание активных сверхпроводниковых ЭМА востребовано для дальнейшего развития широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой входного сигнала, отвечающих новой современной концепции развития технологии связи и телекоммуникаций. Кроме того, ожидаемый прогресс в области технологии формирования интегральных джозефсоновских схем на основе высокотемпературных, в том числе, новых, сверхпроводников позволит в дальнейшем выполнить интеграцию активных сверхпроводниковых антенн с высокоэффективными фильтрами на основе таких сверхпроводников [16] для их использования в базовых станциях сотовой связи

### **Библиографический список**

- [1] K.K. Likharev, O.V. Mukhanov, and V.K. Semenov, "Resistive single flux quantum logic for the josepjon-junction technology", *In: SQUID '85*, H. hahlbohm and Luebbig (eds.), W. de Gruyter, Berlin, 1985, p. 1103-1108.
- [2] K.K. Likharev, O.V. Mukhanov, and V.K. Semenov, "Ultimate performance of RSFQ logic circuits", *IEEE Trans. on Magn.*, v. 23, 1987, p. 759-762.
- [3] O. Mukhanov, D. Gupta, A. Kadin, and V. Semenov, "Superconductor Analog-to-Digital Converters," *Proc. of the IEEE*, vol. 92, p. 1564-1584, Oct. 2004.
- [4] A. Inamdar, S. Rylov, et al., "Progress in Design of Improved High Dynamic Range Analog-to-Digital Converters," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, p. 670-675, 2009.
- [5] O. A. Mukhanov, D. Kirichenko, I. V. Vernik, et al., "Superconductor Digital-RF Receiver Systems," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E91-C, No.3, p.306-317, 2008.
- [6] D. E. Kirichenko, T. V. Filippov, and D. Gupta, "Microwave Receivers with Direct Digitization," *Microwave Symposium Digest*, p. 1449 – 1452, 2009.

- [7] D. Gupta, D. E. Kirichenko, V. V. Dotsenko, R. Miller, et al., "Modular, Multi-function Digital-RF Receiver Systems," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 21, p. 883-890, 2011.
- [8] S. V Polonsky, V. K. Semenov, and P. N. Shevchenko, "PSCAN - Personal Superconductor Circuit Analyzer", *Supercond. Sci. Technol.*, v. 4, 1991, p. 667-669.
- [9] V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, "Numerical Simulation of Josephson-Junction System Dynamics in the Presence of Thermal Noise", *Inst. Physics Conf. Ser. No 158, IOP Publishing Ltd*, 1997, p. 627 - 630.
- [10] V. K. Kornev, I. I. Soloviev, et al., "Bi-SQUID - Novel Linearization Method for dc SQUID Voltage Response", *Superconductor Science and Technology (SUST)*, vol. 22, pp. 114011-1-6., 2009.
- [11] J. Oppeländer, Ch. Häussler, T. Träuble and N. Schopohl, "Sigmoid like flux to voltage transfer function of superconducting quantum interference filter circuits" *Physica C: Superconductivity*, 368(1-4): 125-129, 2002.
- [12] И.И.Соловьев, В.К.Корнев, Н.В.Кленов, О.А. Муханов, "Сверхпроводниковые джозефсоновские структуры с высокой линейностью преобразования магнитного сигнала в напряжение", *ФТТ*, 52, 11, 2010.
- [13] V. K. Kornev, I. I. Soloviev et al., "Progress in High Linearity Multi-Element Josephson Structures", *Physica C*, vol. 470, pp. 886-889, 2010.
- [14] V. K. Kornev, I. I. Soloviev, et al., "Design and Experimental Evaluation of SQIF Arrays with Linear Voltage Response," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, part 1, pp. 394- 398, 2011.
- [15] V. K. Kornev, I. I. Soloviev, et al., "Array designs for active electrically small superconductive antennas", *Physica C*, 2012, in press, doi:10.1016/j.physc.2011.12.038.
- [16] S. Ohshima, "High-temperature superconducting passive microwave devices, filters, and antennas," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 13, p. 103-108, 2000.