

УДК 538.945.6:[004+004.38]

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА В СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРАХ

Хаджинова К. А., студент гр.328506

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Цегельник В.В. – доктор физ.-мат.наук, профессор кафедры ВМ

Аннотация. Дано общее представление об эффекте Джозефсона, его историческом контексте и актуальности в современных информационных и квантовых технологиях. Показано его влияние на развитие науки и технологии. Рассмотрено, как этот эффект используется в современных информационных технологиях, а также в квантовых компьютерах.

Ключевые слова. Эффект Джозефсона, информационные технологии, квантовая физика, квантовые компьютеры, кубиты, резистивная модель Джозефсона, туннельный переход, СКВИД.

Эффект Джозефсона, открытый в 1962 году, представляет собой квантово-механическое явление, возникающее в сверхпроводящих системах. Британский физик Б. Джозефсон на основе теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера предсказал стационарный и нестационарный эффекты в контакте сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник. Экспериментально стационарный эффект был подтвержден американскими физиками Ф. Андерсоном и Дж. Роуэллом в 1963 году [1].

Резистивная модель, также известная как модель резистивного джозефсоновского перехода или модель RCSJ (от англ. Resistively Shunted Josephson Junction), является простой моделью, используемой для описания поведения сверхпроводящего джозефсоновского перехода, когда он шунтируется сопротивлением.

В резистивной модели джозефсоновский переход представляется комбинацией идеального сверхпроводящего элемента (конденсатора) и резистора, соединенных последовательно. Это позволяет учитывать потери энергии и диссипацию тока, которые могут возникать в переходе из-за различных факторов, таких как тепловой шум или флуктуации фазы.

Резистивная модель Джозефсона описывает ток через переход Джозефсона уравнением:

$$I = I_c \sin \varphi + \frac{V}{R}, \quad (1)$$

где I – ток через переход Джозефсона, I_c – критический ток, который является максимальным током, который может протечь через переход без нарушения сверхпроводящего состояния, φ – разность фаз волновых функций сверхпроводников на обеих сторонах перехода, V – приложенное напряжение на переходе, R – сопротивление туннельного перехода.

Это уравнение объясняет, как ток через переход Джозефсона зависит от разности фаз и внешнего напряжения. Оно позволяет описывать свойства и поведение перехода Джозефсона в различных режимах работы и условиях.

Резистивная модель позволяет описывать не только идеальное поведение джозефсоновского перехода без потерь (когда R стремится к нулю), но и его поведение при наличии диссипации. Это позволяет учесть влияние внешних факторов на работу перехода и адаптировать его для конкретных приложений. Однако следует отметить, что резистивная модель является упрощенной и не учитывает все квантомеханические аспекты перехода Джозефсона. Для более точного описания необходимо использовать более сложные модели, такие как фазо-квантовая модель или модель Гинзбурга-Ландау.

Эффект Джозефсона основывается на уникальном явлении [2], которое происходит, когда сверхпроводящий ток проходит через тонкий изолирующий барьер, известный как туннельный переход, между двумя сверхпроводниками. Это явление происходит, когда сверхпроводник, который обычно не проводит тока, позволяет току проходить через него без приложенного напряжения. Это происходит из-за особенностей квантовой механики, когда электроны в сверхпроводнике могут перемещаться без сопротивления, создавая ток без напряжения [3].

Этот эффект является фундаментальным для квантовых технологий, поскольку он позволяет создавать и манипулировать квантовыми битами, что является ключевым элементом в квантовых вычислениях.

Актуальность применения эффекта Джозефсона:

- Используется в сверхчувствительных магнитометрах (SQUID) для измерения магнитных полей сверхнизкой интенсивности.
- Применение в медицине (магнитоэнцефалография), геофизике, неразрушающем контроле.
- Низкое энергопотребление: потенциальное применение в квантовых компьютерах, где требуется высокая скорость обработки данных при минимальном энергопотреблении.
- Разработка сверхпроводниковых логических элементов (СКВИД-ячейки) и кубитов.
- Быстродействие: использование в высокочастотных устройствах, таких как сверхпроводниковые фильтры и генераторы.
- Потенциальное применение в квантовых коммуникациях.

Применение эффекта Джозефсона в информационных технологиях:

Джозефсоновские переходы, которые являются квантовыми аналогами электронных переключателей, используются в электронике для создания сверхпроводящих элементов. Они позволяют управлять током в суперпроводнике, что делает их идеальными для использования в высокочастотных устройствах и в качестве элементов в сверхпроводящих схемах.

Сверхпроводящие ячейки памяти (SPM) используют эффект Джозефсона для хранения информации в квантовых состояниях. Они обещают значительно увеличить плотность хранения данных и скорость передачи информации по сравнению с традиционными технологиями.

Сильношунтированный модуль Джозефсона (SQUID) - устройство на основе эффекта Джозефсона для измерения слабых магнитных полей или тока. Он состоит из двух сверхпроводящих туннельных контактов и петлевого элемента. СКВИДы, которые используют эффект Джозефсона, обладают высокой чувствительностью и точностью, что делает их идеальными для использования в метрологии, магнитометрии, неразрушающем контроле материалов и квантовых компьютерах [4].

Джозефсоновские логические схемы, которые используют эффект Джозефсона для управления квантовыми битами, являются ключевыми элементами в разработке сверхпроводящих компьютеров. Они обеспечивают основу для создания квантовых логических элементов, которые могут обрабатывать информацию на квантовом уровне, что открывает новые возможности для обработки данных и решения сложных задач.

Применение эффекта Джозефсона в квантовых компьютерах:

Джозефсоновские переходы играют ключевую роль в создании кубитов - квантовых аналогов битов в классической информатике. Кубиты на основе джозефсоновских переходов обладают свойствами квантовой суперпозиции и квантовой запутанности, что позволяет выполнять параллельные вычисления и обеспечивает высокую плотность информации.

Джозефсоновские вентили являются элементами, используемыми для управления и манипулирования состояниями кубитов. Они позволяют выполнять квантовые операции, такие как однокубитовые и двухкубитовые вращения, квантовые вентили NOT, CNOT и другие. Джозефсоновские вентили обеспечивают точное и быстрое управление кубитами, что является критическим для реализации квантовых алгоритмов.

Джозефсоновские кубиты имеют несколько преимуществ и недостатков по сравнению с другими типами кубитов, такими как фотонные кубиты или кубиты на основе квантовых точек. Преимущества джозефсоновских кубитов включают высокую скорость операций, низкий уровень ошибок и возможность масштабирования. Однако они также имеют некоторые недостатки, такие как высокая чувствительность к окружающим шумам и требование к очень низким температурам (близким к абсолютному нулю) для работы.

В настоящее время исследуются и разрабатываются различные архитектуры квантовых компьютеров, использующих джозефсоновские кубиты. Современные достижения включают создание квантовых устройств с увеличенным числом кубитов, улучшение точности и стабильности квантовых операций, а также разработку методов для управления и исправления ошибок. Перспективы развития включают увеличение числа кубитов, реализацию коррекции ошибок, разработку новых алгоритмов и применение квантовых компьютеров для решения сложных вычислительных задач и оптимизации.

Эффект Джозефсона играет ключевую роль в современных информационных и квантовых технологиях, обеспечивая основу для создания сверхпроводящих элементов, ячеек памяти и квантовых компьютеров. Этот эффект позволяет управлять квантовыми состояниями с высокой точностью и эффективностью, что открывает новые возможности для обработки информации и решения сложных задач.

Современные технологии активно используют эффект Джозефсона для создания и манипулирования квантовыми битами, а также в квантовых генераторах для создания квантовых состояний. Это приводит к развитию новых устройств и систем, которые могут значительно улучшить эффективность и возможности обработки информации.

Будущее квантовых технологий, основанных на эффекте Джозефсона, обещает быть весьма перспективным, с потенциалом для создания более мощных и эффективных вычислительных систем, а также для решения проблем, которые не могут быть решены с помощью классических методов.

Однако для реализации этих перспектив необходимо продолжать исследования и разработки в области сверхпроводимости и квантовых технологий.

С уравнением для тока I в случае сильно шунтированной модели Джозефсона ассоциируется семейство уравнений на торе:

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = -\sin \phi + B + A \cos \omega t, \quad (2)$$

где $A, \omega \geq 0, B \geq 0$ – параметры.

При фиксированном ω (частота) важную роль при исследовании модели Джозефсона играет величина $\rho(B, A, \omega)$ – число вращения векторного поля уравнения (2) записанного в виде системы:

$$\dot{\phi} = -\frac{\sin \phi}{\omega} + l + 2\mu \cos \tau, \quad \dot{\tau} = 1; \quad l = \frac{B}{\omega}, \mu = \frac{A}{2\omega}, \quad (3)$$

где A и B называют еще ординатой и абсциссой соответственно.

С физической точки зрения число вращения уравнения (2) имеет смысл среднего напряжения на продолжительном временном интервале. При определенном значении I асимптотика решений уравнения (2) совпадает с асимптотикой однопараметрического семейства решений уравнения:

$$W'' = -\frac{W'^2}{W} - \frac{W'}{z} - \frac{2l}{z}W^2 + \frac{2l-2}{z} + W^3 - \frac{1}{W}, \quad (4)$$

где $z=t$. Уравнение (4) есть третье уравнение Пенлеве. В работе [5] установлена связь между решениями системы уравнений.

$$z^2 u' = z^2 \vartheta + (1-l)zu - u^2 \vartheta, \quad z^2 \vartheta' = -z^2 u + lz\vartheta + u\vartheta^2, \quad (5)$$

и решением уравнения (4), определяемая формулой:

$$W = \frac{\vartheta}{u}, \quad (6)$$

Характерной особенностью системы (4) является то, что она эквивалентна уравнению:

$$y'' = \frac{3y-1}{2y(y-1)}y'^2 - \frac{y'}{z} + \frac{(y-1)^2}{z^2} \left(a + \frac{b}{y} \right) + \frac{cy}{z} + \frac{dy(y+1)}{y-1}, \quad (7)$$

с наборами параметров $(\frac{(1-l)^2}{8}, -\frac{(1-l)^2}{8}, 0, -2), (\frac{l^2}{8}, -\frac{l^2}{8}, 0, -2)$ [6].

Уравнение (5) есть пятое уравнение Пенлеве.

Тем самым получен в явном виде новый случай связи между решением уравнения (4) и решениями уравнения (7) с наборами параметров, указанными выше.

Данный пример является ярким примером плодотворного взаимодействия физики и математики.

Применение эффекта Джозефсона в современных информационных технологиях и квантовых компьютерах представляет собой важный шаг в развитии вычислительной техники и расширении возможностей обработки информации. Этот эффект, основанный на квантовых свойствах сверхпроводников, позволяет создавать высокочувствительные и быстродействующие устройства, способные обрабатывать и хранить информацию на квантовом уровне.

Список использованных источников:

1. Кулик И. О., Янсон И. К. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах. – М.: Наука, 1970.
2. The modelling of a Josephson junction and Heun polynomials [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/math-ph/0601064.pdf>. – Date of access: 14.04.2024.
3. Шмидт В. В. Введение в физику сверхпроводников. – М.: Наука, 1982.
4. Isingizwe, Frederic & Perold, Willem. (2010). Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) Magnetometers: Principles, Fabrication and Applications.
5. Bibilo Y., Glutsyuk A. A. On families of constrictions in model of overdamped Josephson junction and Painleve' 3 equation. *Nonlinearity*. 2022. V. 35, № 10. P.5427-5480.

6. Цегельник В.В. О свойствах решений системы двух нелинейных дифференциальных уравнений, ассоциированной с моделью Джозефсона. Теоретическая и математическая физика. 2024. Т.219, № 1. С. 12-16.

UDC 538.945.6:[004+004.38]

APPLICATION OF THE JOSEPHSON EFFECT IN MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES AND QUANTUM COMPUTERS

Khadzhinova K. A., student of gr. 328506

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Tsegelnik V.V. – PhD in Physics and Mathematics, Professor of the Department of Higher Mathematics

Annotation. The article provides a general understanding of the Josephson effect, its historical context and relevance in modern information and quantum technologies. The paper shows his influence on the development of science and technology. The article examines how this effect is used in modern information technologies, as well as in quantum computers.

Keywords. *Josephson effect, information technology, quantum physics, quantum computers, qubits, resistive Josephson model, tunnel junction, SQUID.*