Эквивалентная электрическая схема резистивной модели джозефсоновского перехода на основе потребителя постоянной мощности

А. А. Пенин[a,*], А. С. Сидоренко[a, b]

[a]*Институт инженерной электроники и нанотехнологий им. Д. Гицу, Технический университет Молдовы, г. Кишинев, MD-2028, Молдова*

[b]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, 109028, Россия*

[*]*e-mail: alexandr.penin@iien.utm.md ; https://orcid.org/0000-0002-3127-2979*

Поступила в редакцию 23.07.2026
После доработки 29.08.2026
Принята к публикации 15.10.2026

На основе известного аналитического выражения вольт-амперной характеристики резистивной модели (RSJ) джозефсоновского перехода исследованы зависимости полного постоянного тока и его нормальной компоненты от сверхпроводящей составляющей. Рассмотрены потребитель и источник постоянной мощности как новые элементы теории электрических цепей. Показано, что характеристики этих элементов аналогичны зависимостям, описывающим резистивную модель джозефсоновского перехода. На этой основе предложена эквивалентная электрическая схема, в которой переход представлен последовательным сочетанием отрицательного линейного сопротивления и нелинейного элемента, эквивалентного потребителю постоянной мощности. Предложенная схема обеспечивает наглядную физическую интерпретацию взаимосвязи между сверхпроводящей и нормальной составляющими тока и может быть полезна при анализе и преподавании принципов работы джозефсоновских переходов.

Ключевые слова: сверхпроводимость, джозефсоновский переход, RSJ-модель, вольт-амперная характеристика, эквивалентная электрическая схема, потребитель постоянной мощности

УДК 538.945.6:621.3.01
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.5.67

ВВЕДЕНИЕ

Эффект Джозефсона стал одним из ключевых открытий второй половины 20 века и не утрачивает актуальности поныне. Практически сразу после его теоретического предсказания Брайаном Джозефсоном в 1962 году [1] произошло его экспериментальное обнаружение [2]. Последовал лавинообразный рост теоретических и экспериментальных работ по исследованию этого удивительного квантового эффекта [3, 4], а также по его широкому применению в многочисленных приборах и устройствах сверхпроводниковой электроники – сверхчувствительных магнитометрах (СКВИДах), СВЧ-приемниках, одноквантовых детекторах, СВЧ-генераторах и усилителях, стандартах напряжения [5–7]. В настоящее время эффект Джозефсона (переход или контакт) используется для создания искусственных нейронов и синапсов в энергоэффективных компьютерах с мозгоподобной архитектурой искусственных нейронных сетей [8, 9]. Приведенные примеры практического применения джозефсоновских переходов требуют разработки соответствующих моделей и методов их анализа. Физические свойства джозефсоновских переходов, эквивалентные модели и особенности функционирования подробно рассмотрены в многочисленных работах [7, 9–15], что облегчает деятельность инженеров и разработчиков сверхпроводниковой электроники.

При протекании через джозефсоновский переход постоянного тока меньшего критического значения напряжение на переходе отсутствует. Этот режим соответствует стационарному эффекту Джозефсона, а сам переход может быть представлен нелинейной индуктивностью, параметры которой определяются величиной сверхпроводящего тока.

При превышении критического тока наряду со сверхпроводящей возникает нормальная (диссипативная) составляющая тока. В результате на переходе появляется высокочастотное напряжение, обусловленное нестационарным эффектом Джозефсона. В этом режиме постоянный ток переносится двумя временными компонентами – сверхпроводящей и нормальной, осциллирующими в противофазе. Такое представление лежит в основе широко используемой резистивной модели RSJ, согласно которой джозефсоновский переход эквивалентен параллельному соединению идеального сверхпроводящего элемента и нормального сопротивления.

Учет собственной емкости перехода приводит к более общей модели RCSJ.

Приведенные модели являются стандартными теоретическими основами для описания динамики джозефсоновского перехода в сверхпроводниковых цепях. Представляя переход как идеальный джозефсоновский элемент, параллельно соединенный с диссипативной ветвью, эти модели отражают существенную конкуренцию между динамикой сверхпроводящей фазы, диссипацией квазичастиц и высокочастотным откликом. Несмотря на свои успехи, модель RSJ/RCSJ сталкивается с известными ограничениями и источниками противоречий. Реальные устройства демонстрируют паразитные индуктивности, паразитные емкости и импедансы окружающей среды, которые могут сильно изменять динамику и даже маскировать внутренние эффекты (например, процессы Купера более высокого порядка или 4π-периодические сверхтоки).

Численное решение уравнений моделей RSJ и RCSJ позволяет исследовать динамику процессов во времени. Для анализа сверхпроводниковых устройств предложены различные подходы к построению их эквивалентных схем, включая универсальные методы моделирования [16] и более сложные схемотехнические реализации на основе операционных усилителей [17, 18], воспроизводящие динамику джозефсоновских переходов в составе электронных устройств.

Экспериментальное исследование высокочастотных процессов в переходе затруднено вследствие чрезвычайно высокой частоты джозефсоновских осцилляций. Поэтому на практике анализируют средние значения напряжения, измеряемые при различных значениях постоянного тока, что позволяет получать вольтамперную характеристику (ВАХ) перехода. Теоретические и экспериментальные исследования джозефсоновских переходов и СКВИДов показывают, что эта характеристика включает сверхпроводящую ветвь со средним напряжением, равным нулю, и нелинейную резистивную ветвь, соответствующую конечному среднему напряжению. При больших токах резистивная ветвь асимптотически переходит в линейную зависимость, поскольку сверхпроводящая составляющая тока стремится к нулю и весь ток протекает через нормальное сопротивление.

Несмотря на широкое применение моделей RSJ и RCSJ, вопрос о построении эквивалентной электрической схемы, непосредственно описывающей поведение джозефсоновского перехода для средних значений напряжения и токов, остается практически не рассмотренным. Между тем в современной теории электрических цепей активно развиваются представления о новых нелинейных элементах – потребителе и источнике постоянной мощности [19–23], сохраняющих неизменную мощность при изменении параметров источника питания или нагрузки.

В настоящей работе показано, что характеристики этих элементов обладают непосредственной аналогией с зависимостями, описывающими резистивную RSJ-модель джозефсоновского перехода для средних значений напряжения и тока. На основе этой аналогии предложена новая эквивалентная электрическая схема джозефсоновского перехода, позволяющая получить наглядную физическую интерпретацию взаимосвязи между сверхпроводящей и нормальной составляющими тока.

В отличие от известных эквивалентных схем RSJ и RCSJ, описывающих мгновенные процессы во времени, предложенная в работе схема относится исключительно к средним значениям токов и напряжений и позволяет представить джозефсоновский переход как комбинацию отрицательного сопротивления и потребителя постоянной мощности. Насколько нам известно, такая интерпретация ранее не рассматривалась.

ИСХОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ И ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ПЕРЕХОДА

При протекании постоянного тока меньше критического I_C напряжение на переходе равно нулю. Величина такого сверхтока I_S через джозефсоновский переход определяется известным выражением:

$$I_S = I_C \sin\varphi. \qquad (1)$$

Для максимального значения сверхтока $I_S = I_C$ джозефсоновская фаза $\varphi = \pi/2$.

В свою очередь, при подаче постоянного тока $I > I_C$ на переходе возникает высокочастотное напряжение:

$$V(t) = I_n(t) R_n = R_n \frac{(I)^2 - (I_C)^2}{I + I_C \cos\omega t}, \qquad (2)$$

где R_n – сопротивление перехода в нормальном состоянии; I_n – нормальная компонента тока.

Таким образом, подаваемый постоянный ток

$$I = I_S(t) + I_n(t) \qquad (3)$$

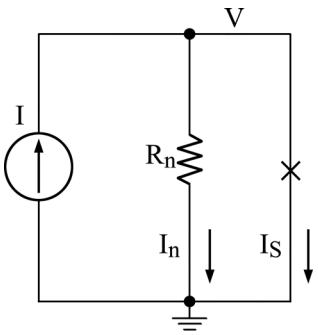


Рис. 1. Резистивная модель джозефсоновского перехода.

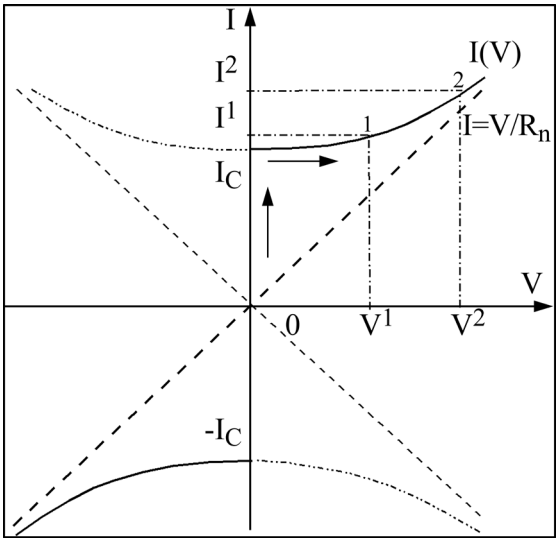


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика джозефсоновского перехода.

переносится двумя высокочастотными компонентами I_S, I_n, которые осциллируют в противофазе во времени с частотой ω, пропорциональной постоянной составляющей (среднего значения) напряжения V на переходе:

$$V = R_n \sqrt{(I)^2 - \left(I_{(C)}\right)^2}. \qquad (4)$$

Отсюда следует резистивная модель джозефсоновского перехода, изображенная на рис. 1. Модель содержит параллельно соединенные резистивный элемент R_n с током I_n и сверхпроводящий элемент с током I_S.

ВАХ джозефсоновского перехода представляет зависимость среднего значения напряжения (4) от задаваемого тока I и определяет гиперболу (рис. 2). Такая характеристика соответствует туннельному SIS (сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник) переходу и SNS (сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник) переходу.

Характеристика состоит из сверхпроводящей ветви, для которой напряжение $V = 0$, и двух резистивных ветвей, когда $V \neq 0$. В случае изменения режима работы перехода, когда задаваемый ток $I > I_C$, значительная его доля протекает в виде сверхпроводящего тока I_S. Соответствующий вид зависимости напряжения в условной точке *1* показан на рис. 3 для $I = 1{,}2I_C$. При увеличении тока, например, $I = 2I_C$, зависимость напряжения в условной точке *2*, приближается к синусоидальной форме. При $I >> I_C$ практически весь ток течет через резистивный элемент и ВАХ выходит на линейную зависимость $V = R_n I$.

Важно отметить, что размах зависимости напряжения как разность между максимальным и минимальным значениями не зависит от формы зависимости или входного тока, что следует из (2). В этом случае

$$V_{\max} - V_{\min} = 2I_C R_n.$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ И НОРМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛНОГО ТОКА

Для интерпретации взаимосвязи или поведения компонент полного тока получим соответствующие выражения и построим характеристики. Рассмотрим компоненты полного тока согласно (3). Тогда напряжение V выражается через средние значения компонент тока за период джозефсоновский фазы, то есть $V = R_n (I - I_S)$.

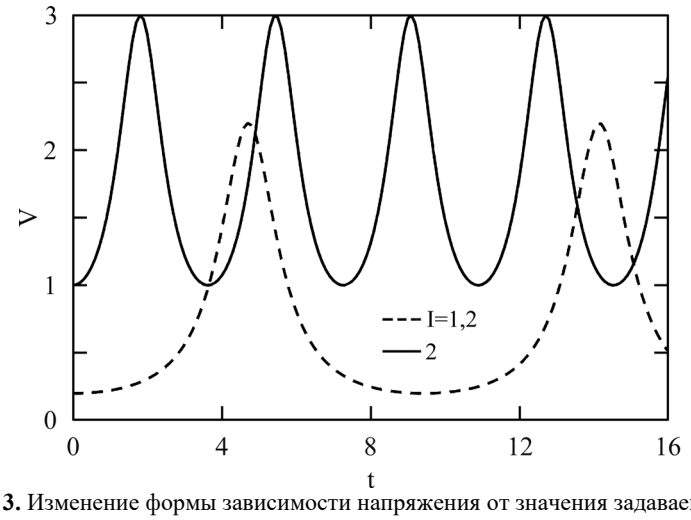


Рис. 3. Изменение формы зависимости напряжения от значения задаваемого тока.

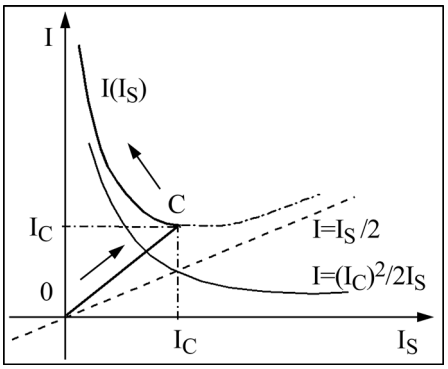


Рис. 4. Характеристика $I(I_S)$ полного тока от сверхтока с выделенной рабочей областью.

Из выражения (4) с учетом (2) для нормального тока следует равенство:

$$I_n = \sqrt{(I)^2 - (I_C)^2} = I - I_S. \qquad (5)$$

Возводим в квадрат обе части:

$$(I)^2 - (I_C)^2 = (I)^2 - 2II_S + (I_S)^2.$$

Тогда

$$(I_C)^2 = 2II_S - (I_S)^2.$$

Отсюда получаем выражение для зависимости $I(I_S)$:

$$I(I_S) = \frac{(I_S)^2 + (I_C)^2}{2I_S} = \frac{I_S}{2} + \frac{(I_C)^2}{2I_S}. \qquad (6)$$

Как видно, данное выражение относительно сверхтока I_S содержит сумму линейной и гиперболической составляющих. Соответствующий график представлен на рис. 4. Линейная составляющая является асимптотой для результирующей кривой.

При увеличении тока I от нуля до критического сверхток также увеличивается и рабочая точка перемещается по линейному участку до точки C. При дальнейшем увеличении тока $I > I_C$ сверхток начинает уменьшаться вплоть до нуля и рабочая точка идет по результирующей гиперболе.

Получаем теперь выражение для зависимостей $I_n(I_S)$ или $V(I_S)$. С учетом (5) и (6) следует выражение:

$$I_n(I_S) = \frac{V(I_S)}{R_n} = I - I_S = \frac{I_S}{2} + \frac{(I_C)^2}{2I_S} - I_S = -\frac{I_S}{2} + \frac{(I_C)^2}{2I_S}. \qquad (7)$$

Как видно, данное выражение относительно I_S содержит разницу гиперболической и линейной составляющих. Соответствующий график представлен на рис. 5. Линейная составляющая является асимптотой для результирующей кривой.

Рабочая точка начинает перемещаться от точки C, соответствующей $I_S = I_C$. При уменьшении сверхтока вплоть до нуля нормальный ток увеличивается и рабочая точка идет по результирующей гиперболе.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ПЕРЕХОДА

В представлении теории электрических цепей необходимо показать непосредственно модель

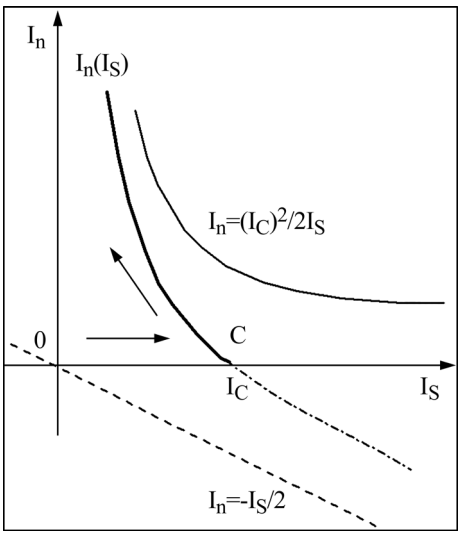


Рис. 5. Характеристика нормального тока от сверхтока с выделенной рабочей областью.

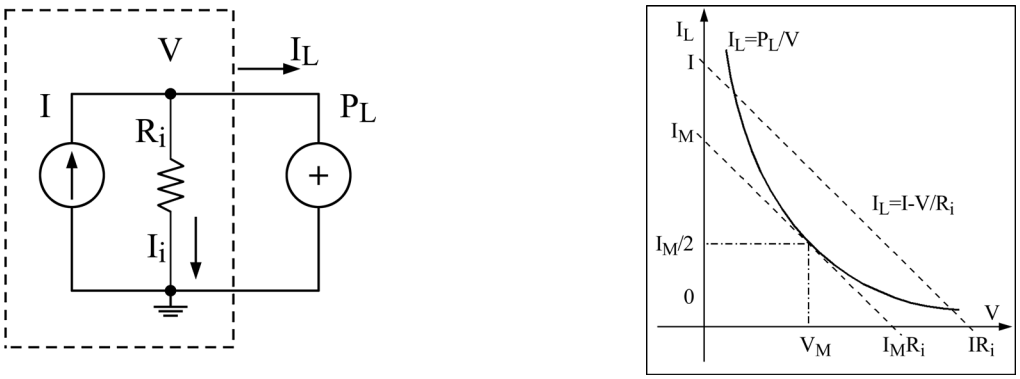


Рис. 6. Схема и характеристики системы питания с потребителем неизменной мощности.

сверхпроводящего элемента с каким-то параметром. Так, можно представить сверхпроводящий элемент как нелинейный резистивный элемент R_S, характеристика которого определяется выражением, следующим из (7):

$$R_S = \frac{V}{I_S} = R_n \frac{I_n(I_S)}{I_S} = R_n \left[-\frac{1}{2} + \frac{(I_C)^2}{2(I_S)^2} \right]. \quad (8)$$

Тогда возникает вопрос о сути и физическом смысле вводимого элемента. Предварительно можно отметить, что такой резистивный элемент представляет последовательное соединение отрицательной линейной и нелинейной составляющих.

Характеристики потребителя мощности

В теории электрических цепей известны такие элементы, как всем знакомые источник напряжения V и источник тока I. Эти источники могут отдавать и потреблять энергию (или мощность) с учетом соответствующих направления тока и полярности напряжения. В то же время в теории электрических цепей развиваются представления о таких новых элементах, как потребитель и источник постоянной или неизменной мощности, параметром которых является мощность P. Так, для потребителя мощности такие параметры режима, как напряжение и ток, будут меняться в зависимости от значения входного питающего напряжения или тока. Например, блок питания компьютера потребляет требуемую мощность в широком диапазоне изменения напряжения сети (обычно от 100 до 240V).

Рассмотрим простейшую систему питания на рис. 6. Источник питающего тока I с внутренним сопротивлением R_i подключен к нагрузке в виде потребителя неизменной мощности $+P_L$.

Характеристика источника тока представляет широко известную нагрузочную прямую линию согласно выражению:

$$I_L(V) = I - I_i = I - \frac{V}{R_i}. \quad (9)$$

В свою очередь, характеристика нагрузки представляет гиперболу:

$$I_L(V) = \frac{P_L}{V}. \quad (10)$$

Точки пересечения этих характеристик определяют две возможные рабочие точки такой цепи. Исключая величину V в системе уравнений (9, 10), получим квадратное уравнение:

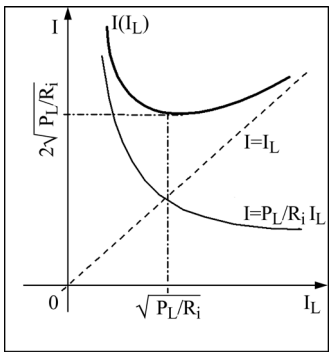


Рис. 7. Характеристика входного тока от тока потребителя мощности.

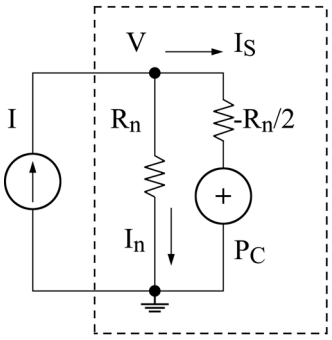


Рис. 8. Эквивалентная схема джозефсоновского перехода.

$$\left(I_L\right)^2 - II_L + \frac{P_L}{R_i} = 0. \qquad (11)$$

Решение дает два корня:

$$I_L = \frac{I}{2} \pm \sqrt{\frac{\left(I\right)^2}{4} - \frac{P_L}{R_i}}.$$

Таким образом, можно говорить об избытке мощности, которую обеспечивает источник тока. Очевидно, есть такое минимальное значение тока $I = I_M$, когда нагрузочная прямая только касается гиперболы, то есть избытка мощности нет. В этом случае

$$I_{LM} = \frac{I_M}{2}, \quad \frac{\left(I_M\right)^2}{4} = \frac{P_L}{R_i}. \qquad (12)$$

Отсюда минимальное значение тока:

$$I_M = 2\sqrt{\frac{P_L}{R_i}}. \qquad (13)$$

Можно дать другую интерпретацию такого режима. Раз нет избытка мощности, то источник тока полностью отдает мощность. Из теории цепей известно условие уже максимальной мощности нагрузки – это режим согласования, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника тока. Отсюда следуют соотношения (12), (13).

Соответствие характеристик джозефсоновского перехода и потребителя мощности

Рассмотрим теперь зависимость $I(I_L)$, используя выражение (11):

$$I\left(I_L\right) = I_L + \frac{P_L}{R_i I_L}. \qquad (14)$$

Как видно, данное выражение относительно I_L содержит сумму линейной и гиперболической составляющих. Соответствующий график представлен на рис. 7. Линейная составляющая является асимптотой для результирующей кривой.

Полученная кривая аналогична характеристике перехода на рис. 4. Тогда к эквивалентной схеме джозефсоновского перехода можно применить представления о потребителе неизменной мощности.

С учетом (8) получаем напряжение на переходе через параметры сверхпроводящего элемента:

$$V = R_S I_S = -\frac{R_n}{2} I_S + \frac{R_n}{2}\left(I_C\right)^2 \frac{1}{I_S}.$$

Можем ввести такой параметр, как характерная мощность перехода:

$$P_C = \frac{R_n}{2}\left(I_C\right)^2. \qquad (15)$$

Тогда напряжение на переходе:

$$V = -\frac{R_n}{2} I_S + P_C \frac{1}{I_S}. \qquad (16)$$

Отсюда следует эквивалентная схема перехода, как показано на рис. 8.

Характеристика (6) примет вид:

$$I\left(I_S\right) = \frac{I_S}{2} + \frac{P_C}{R_n I_S}. \qquad (17)$$

Такая эквивалентная схема поясняет смысл резистивного элемента (8). Через отрицательную линейную и гиперболическую (потребитель неизменной мощности) части протекает общий сверхток. Эта гиперболическая часть значительно в большей степени (чем линейная) влияет на изменение сверхтока при увеличении полного тока (17) и соответственно напряжения (16).

Рассмотрим смысл характерной мощности (15) на примере рис. 3. Для синусоидальной зависимости напряжения или тока с амплитудой I_C эта мощность соответствует мощности на резисторе R_n.

ВЫВОДЫ

В работе предложена эквивалентная электрическая схема резистивной модели джозефсоновского перехода для средних значений напряжения и токов, основанная на представлении перехода в виде комбинации отрицательного линейного сопротивления и потребителя постоянной мощности. Такая схема наглядно отражает взаимосвязь сверхпроводящей и нормальной составляющих тока и дополняет традиционную интерпретацию RSJ-модели.

Показано, что зависимости, описывающие джозефсоновский переход, обладают непосредственной аналогией с характеристиками новых элементов теории электрических цепей – потребителя и источника постоянной мощности. Установленная аналогия представляет интерес не только с методической точки зрения, но и демонстрирует возможность применения аппарата современной теории электрических цепей для интерпретации физических процессов в сверхпроводниковых структурах.

Предложенный подход может быть использован при разработке более детальных схемотехнических моделей сверхпроводниковых электронных устройств. В частности, перспективным направлением является построение принципиальных эквивалентных схем на основе электронных узлов, реализующих отрицательное сопротивление, и потребитель постоянной мощности, что позволит моделировать устройства с джозефсоновскими переходами средствами традиционной электронной схемотехники.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования поддержаны государственной программой Молдовы, проект 20.80009.5007.11 «Функциональные наноструктуры и наноматериалы для индустрии и сельского хозяйства». Также исследования поддержаны Программой фундаментальных исследований, проект HSE-BR-2025-2 Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Россия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Josephson, B., Possible new effects in superconductive tunneling. *Phys. Lett.*, 1962, vol. 1, no. 7, p. 251.
2. Anderson, P., and Rowell, J., Probable Observation of the Josephson Tunnel Effect. *Phys. Rev. Lett.*, 1963, vol. 10, no. 6, p. 230.
3. Shapiro, S., and Josephson, B., Currents in Superconducting Tunneling: The Effect of Microwaves and Other Observations. *Phys. Rev. Lett.*, 1963, vol. 11, no. 8, p. 80.
4. Dmitrenko, I., and Yanson, I., Investigation of the High-frequency Josephson Current, *Soviet Physics JETP*, 1966, vol. 22, no. 6, p. 1190.
5. Mercereau, J., Superconducting magnetometers. *Rev. Physiq. Appliq.*, 1970, vol. 5, no. 1, p. 13.
6. Langenberg, D., Scalapino, D., and Taylor, B., The Josephson Effects. *Scien. Amer.*, 1966, vol. 214, no. 5, p. 30.
7. Barone, A., and Paterno, G., *Physics and Applications of the Josephson Effect*. NY: John Wiley & Sons, Inc., 1982. 529 p.
8. Sidorenko, A., Superconducting artificial neural networks and quantum circuits. *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2026, vol. 17, p. 744. https://doi.org/10.3762/bjnano.17.51
9. Sidorenko, A., Hahn, H., and Krasnov, V., Frontiers of nanoelectronics: intrinsic Josephson effect and prospects of superconducting spintronics. *Beilstein J. Nanotechnol*., 2023, vol. 14, p. 79. https://doi.org/10.3762/bjnano.14.9
10. Шмидт, В.В., *Введение в физику сверхпроводников*. Изд. 2-е, М.: МЦНМО, 2000. 402 с.
11. Likharev, K.K., *Dynamics of Josephson junctions and circuits*. NY: CRC Press, 2022. 640 p. https://doi.org/10.1201/9781315141572
12. Soloviev, I.I., Klenov, N.V., Schegolev, A.E., Bakurskiy, S.V., and Kupriyanov, M.Y., Analytical derivation of DC SQUID response. *Supercond. Sci. Technol.*, 2016, vol. 29, no. 9, art. ID. 094005. https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/9/094005
13. Lykov, A., and Lykov, I., Current–Voltage Characteristics of Nonideal Josephson Junctions. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2024, vol. 51, p. 155. https://doi.org/10.3103/S1068335624600050
14. Tesche, C., and Clarke, J., DC SQUID: Noise and optimization. *J. Low Temp. Phys.*, 1977, vol. 29, no. 3, p. 301.
15. Bonavolontà, C., Vettoliere, A., Sorrentino, P., and Granata, C., Superconducting quantum

magnetometers for brain investigations. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 5, p. 4625.
https://doi.org/10.3390/s25154625

16. Wang, Y., Unified Network Equation for Both Normal RLC Circuits and Josephson Junction Circuits. *arXiv preprint arXiv:2109.12476*, 2021.
https://doi.org/10.48550/arXiv:2109.12476
17. Henry, R., and Prober, D., Electronic analogs of double-junction and single-junction SQUIDs. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981, vol. 5, no. 6, p. 902.
18. Ying, G., and Kouzaev, G., Circuit Models for Josephson Effects in Weakly Coupled Bose-Einstein Condensates and in Superconductors. Rec. Adv. Electr. Eng., 2013, p. 74.
19. Singer, S., and Erickson, R., Power–source element and its properties. *IEE Proc. – Circ., Dev. Syst.*, 1994, vol. 141, no. 3, p. 220.
https://doi.org/10.1049/ip-cds:19941020
20. Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C., and Williamson, G., Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives. *IEEE Trans. Veh. Technol*., 2006, vol. 55, no. 4, p. 1112.
https://doi.org/10.1109/TVT.2006.877483
21. Mellincovsky, M., Kuperman, A., Lerman, C., Gadelovits, N., et al., Performance and limitations of a constant power-fed supercapacitor. *IEEE Trans. Energ. Convers.*, 2014, vol. 29, no. 2, p. 445.
https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2296792
22. Penin, A., *Analysis of Electrical Circuits with Variable Load Regime Parameters: Projective Geometry Method*, 3rd ed., Cham: Springer International Publishing AG, 2020. 520 p.
https://doi.og/10.1007/978-3-030-35366-7
23. Penin, A., and Sidorenko, A., Determination of one valued characteristics of power-source and power-load elements. In: *Telecommunications, Electronics and Informatics*, Proc. of the 6th Intern. Conf. ICTEI 2018, Chisinau, 24–27 May 2018, UTM, 2018, p. 98. http://repository.utm.md/handle/5014/8060

Summary

Using the known analytical current-voltage relation for the resistively shunted junction (RSJ) model of a Josephson junction, the dependences of the total direct current and its normal component on the supercurrent component were investigated. A constant-power load and a constant-power source are considered as new elements in electric-circuit theory. Their characteristics are shown to be analogous to the relations describing the resistive model of the Josephson junction. On this basis, an equivalent electrical circuit is proposed in which the junction is represented by a series combination of a negative linear resistance and a nonlinear element equivalent to a constant-power load. The proposed circuit provides a clear physical interpretation of the relationship between the superconducting and normal current components and may be useful for analysis and teaching of Josephson-junction operation.

Keywords: superconductivity; Josephson junction; RSJ model; current-voltage characteristic; equivalent electrical circuit; constant-power load