

ЦИФРОВІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ НА БАЗІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ ТА ПЕРЕХОДІВ ДЖОЗЕФСОНА

Запропоновані структурні схеми логічних елементів «І», «АБО», «НІ» з використанням високотемпературної надпровідності та переходів Джозефсона. Носієм інформації в таких елементах є кванти магнітного потоку та відповідні їм одноквантові імпульси напруги, які генеруються джозефсонівськими елементами при проходженні через них квантів магнітного потоку. З використанням еквівалентної схеми переходу Джозефсона побудовано еквівалентну схему логічного елемента «АБО». Проведено розрахунок часу згасання джозефсонівського струму та величини енергії, яка необхідна для переходу елемента із стану логічного нуля до логічної одиниці. Розраховано величину індуктивності, яка необхідна для створення одиничного кванту магнітного потоку.

Ключові слова: джозефсонівські переходи, надпровідність, кванти магнітного потоку, надструм, швидка одноквантова логіка.

G.G. BORTNYK, V.V. KYCHAK
Vinnytsya national technical university

DIGITAL RADIOTECHNICAL DEVICES BASED ON HIGH TEMPERATURE HYPERCONDUCTIVITY AND JOSEPHSON JUNCTION

There are proposed block diagrams of AND, OR, NOT logic elements, using high-temperature hyper conductivity and Josephson junctions, where medium is magnetic flux single quanta and corresponding single-quantum voltage pulses, generated by Josephson elements when passed by magnetic flux single quanta. The equivalent circuit of the OR logic element has been constructed having used an equivalent circuit of the Josephson junction. Damping time for the Josephson current and energy, required for element conversion from logic zero state to logic one state, has been calculated. The value of inductance, required for developing the magnetic flux single quantum, has been calculated.

Key words: Josephson junctions, hyper conductivity, quanta of the magnetic flux, hyper current, fast one quant logic.

Вступ

Основним фактором, який стримує підвищення тактової частоти сучасних напівпровідникових процесорів є величина енергії, що витрачається на одну логічну операцію, яка для напівпровідникових пристроїв дорівнює 10^{-13} Дж/біт. В праці [1] показано, що величина енергії перемикання для випадку застосування технології цифрових пристроїв на базі надпровідників, приблизно дорівнює 10^{-18} Дж/біт, тобто на п'ять порядків менша. Це дає можливість підвищити тактову частоту до 100 ГГц і вище.

При використанні високотемпературних надпровідників, які зберігають надпровідність при температурі рідкого азоту, мінімальне значення тривалості одноквантових імпульсів напруги може становити біля 0,1 пс. Це дає можливість збільшити тактову частоту цифрових пристроїв до 1 ТГц [1, 2].

У зв'язку з цим доцільно розглянути можливість побудови цифрових пристроїв на базі надпровідників і джозефсонівських переходів, робота яких ґрунтується на застосуванні одиничних квантів магнітного потоку.

Постановка задачі досліджень

У праці [3] проведено дослідження вольт-амперної характеристики джозефсоновського переходу та показано, що в теперішній час розробляється нова технологія цифрових пристроїв на базі надпровідності та джозефсонівських переходів, яка отримала назву швидкої одноквантової логіки (ШОКЛ). В таких пристроях носієм інформації є одиничні кванти магнітного потоку Φ_0 та відповідні їм одноквантові імпульси напруги, які генеруються джозефсоновськими елементами при проходженні через них квантів магнітного поля.

Проте, у відомих працях по елементах ШОКЛ не розроблені еквівалентні схеми логічних пристроїв та не проведено аналіз їх можливостей при використанні сучасних технологій і високотемпературної надпровідності.

У зв'язку з цим, метою цієї роботи є розробка функціональної схеми логічних елементів на базі переходів Джозефсона та високотемпературної надпровідності з використанням одиничних квантів магнітних потоків та побудова їх еквівалентних схем, що характеризуються високою швидкодією та надмалим енергоспоживанням.

Розв'язання задачі

Джозефсонівські переходи проявляють себе як деякий слабкий електричний зв'язок між двома надпровідниками, розділеними тонким шаром діелектрика. Між такими надпровідниками протікає надструм при нульовій напрузі внаслідок тунельного ефекту. При перевищенні цього надпровідникового струму деякого значення I_0 , між надпровідниками виникає падіння напруги, величина якої визначається шириною енергетичного зазору надпровідника $2\Delta(T)$:

$$U \approx \frac{2\Delta(T)}{q}$$

При цьому генерується змінний струм, величина якого визначається за співвідношенням Джозефсона [4]:

$$I = I_0 \sin(\omega t + Q_0) \tag{1}$$

Величину надструму I_0 можна розрахувати за виразом [4]

$$I_0 = \frac{qhS}{m} \left(\beta(x) \frac{d\alpha(x)}{dx} - \alpha(x) \frac{d\beta(x)}{dx} \right) \cdot n_{S_1}^{1/2} \cdot n_{S_2}^{1/2} \sin(\phi_2 - \phi_1) \tag{2}$$

$\alpha(x)$ і $\beta(x)$ визначають глибину проникнення хвильових функцій із першого та другого надпровідників в шар діелектрика; $\theta = \phi_2 - \phi_1$; S – площа джозефсонівського переходу; ϕ_1, ϕ_2 – фази хвильових функцій в надпровідниках 1, 2 відповідно; n_{S_1}, n_{S_2} – густина куперівських пар в надпровідниках 1,2 відповідно.

Частота змінного струму ω_0 залежить від напруги, яка виникає на переході Джозефсона та визначається із співвідношення Джозефсона

$$\omega = \frac{2e}{\hbar} U$$

Якщо до джозефсонівського переходу підключити зовнішню напругу більшу $\frac{2\Delta(N)}{q}$, то має місце

тунелювання електронів із одного надпровідника в інший (на рівні, вищі надпровідникового енергетичного зазору) у вигляді куперівських пар. Після тунелювання вони займають квантові стани, які відрізняються від квантових станів електронів у звичайному провіднику. Тому їх називають квазічастинками [5]. При зменшенні струму нижче I_0 стан з нульовою напругою вже не відновлюється. У загальному випадку тунельний перехід у реальному джозефсонівському контакті зашунтований електростатичною ємністю між двома надпровідниками, яка приводить до гістерезисної вольтамперної характеристики. Крім того, тунельний перехід характеризується деякою нелінійною провідністю G тунелювання квазічастинки. Тому еквівалентну схему переходу Джозефсона можна зобразити у вигляді паралельного з'єднаного джерела надструму, еквівалентної ємності C та опору R (рисунк 1).

Оскільки явище гістерезису в багатьох випадках є небажаним, то від нього позбавляються шляхом шунтування контакту деяким опором R [5].

В праці [4] приведені функціональні схеми логічних елементів зі струмовим інжекційним живленням, але вони є досить складними, оскільки використовують велику кількість індуктивних елементів. В цій роботі запропоновано функціональні схеми основних логічних елементів із використанням магнітного керування. На рисунку 2 приведена функціональна схема логічного елемента «АБО».

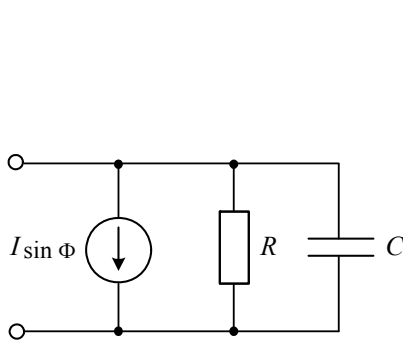


Рис. 1. Еквівалентна схема переходу Джозефсона

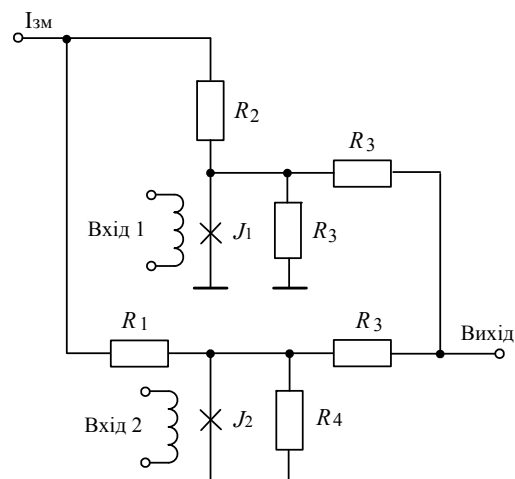


Рис. 2. Функціональна схема логічного елемента «АБО»

Принцип роботи логічного елемента «АБО» полягає в наступному. При відсутності сигналів на входах кожен із переходів перебуває в стані надпровідності, і через них протікає струм, величина якого визначається струмом зміщення і не перевищує критичного струму. При цьому напруга на виході відсутня, що відповідає значенню логічного «0». При подачі сигналу на перший вхід, перший перехід J_1 переходить в стан під напругою, і на виході виникає сигнал, який відповідає логічній «1». Аналогічно для випадку, коли

на другий вхід поступає вхідний сигнал. В цьому випадку перехід J_2 переходить в стан під напругою і на виході має місце вихідний сигнал, що відповідає логічній «1». Якщо на кожен з входів поступають сигнали, то обидва переходи переходять в стан під напругою і на виході має місце логічна «1». Таким чином, приведена схема виконує функцію «АБО». Функціональні схеми логічних елементів «І», «НЕ» наведені на рисунках 3, 4. Принцип роботи їх аналогічний вищевказаному.

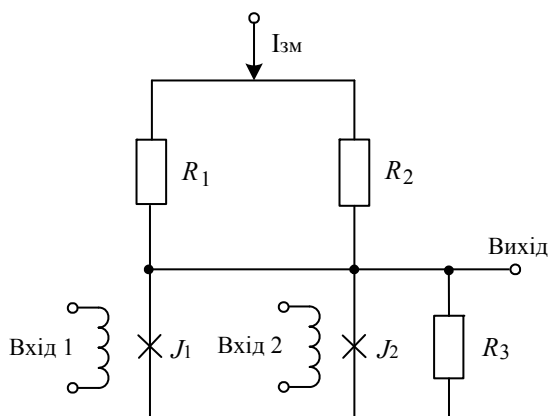


Рис.3. Функціональна схема логічного елемента «І»

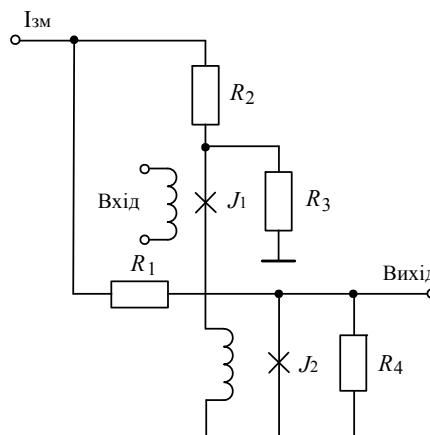


Рис. 4. Функціональна схема логічного елемента «НІ»

Для розрахунку параметрів логічних елементів необхідно розробити їх еквівалентні схеми з урахуванням еквівалентної схеми переходу Джозефсона, на який діє магнітний потік, обумовлений проходженням електричного струму через індуктивний елемент. Еквівалентна схема логічного елемента «АБО» приведена на рисунку 5.

На еквівалентній схемі джерела струмів враховують вплив магнітного поля на величину струмів, які визначаються за виразом [5]

$$I_1 = I_{01} \sin\left(\frac{\pi\Phi_1}{\Phi_0} + Q_{01}\right),$$

$$I_2 = I_{02} \sin\left(\frac{\pi\Phi_2}{\Phi_0} + Q_{02}\right). \quad (3)$$

Залежність надструмів I_{01}, I_{02} від величини магнітного потоку можна розрахувати за виразом

$$I'_0 = I_0 \frac{\sin \pi \Phi / \Phi_0}{\pi \Phi / \Phi_0}, \quad (4)$$

де $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15}$ Вб; R_2, R_5, R_7 – опори тунелювання джозефсонівських переходів, величину яких можна розрахувати за виразом [6]

$$R = K \frac{2\pi^2 U^2}{e\mu},$$

де U – напруга на переході; ϕ – хімічний потенціал; K – коефіцієнт, який враховує розмірність.

Аналогічно можна побудувати еквівалентні схеми для логічних елементів, приведених на рис. 3, 4.

З використанням запропонованої еквівалентної схеми проведено розрахунок впливу магнітного потоку на величину вихідного струму при його дії на різні елементи схеми.

Оскільки на джозефсонівський перехід при перемиканні логічного елемента діє квант магнітного поля, при якому джозефсонівський струм зменшується, то його швидкодія визначається характерним часом згасання джозефсонівського струму, величина якого визначається за виразом [6]

$$\tau = R_T C,$$

де C – ємність переходу, R_T – опір для квазічастини струму на одиницю площі поверхні переходу, який залежить від температури.

Використовуючи вихідні дані, наведені в [7], розраховано час згасання джозефсонівського струму, який становить 0,0116 пс. При цьому допускалось, що опори шунтуючих резисторів такого ж порядку, як і опори переходів. Опори резисторів R_7 і R_8 значно менші шунтуючих опорів і їх вплив не враховувався. Слід відзначити, що час згасання струму залежить від шунтуючого опору R_5 , R_6 і опору R_7 , величина

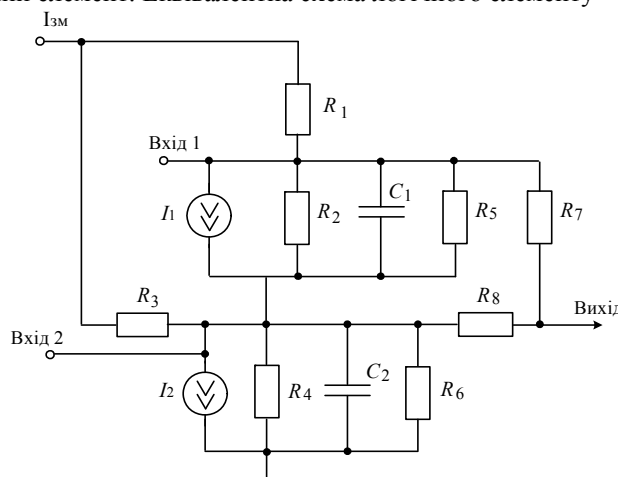


Рис. 5. Еквівалентна схема логічного елемента «АБО»

якого залежить від температури і він зростає до нескінченності, коли $T \rightarrow 0$. При температурі, яка відповідає стану надпровідності, величина цього опору може становити одиниці Ком. Із приведених розрахунків можна зробити висновок, що швидкодія логічних елементів на базі переходів Джозефсона суттєво зростає.

Для розрахунку енергії, яка необхідна для перемикавання логічного елемента із стану логічної «1» до логічного «0», будемо використовувати залежність надструму від магнітного потоку (3). Відомо, що при дії магнітного потоку має місце квантування надструму. При дії магнітного потоку величиною Φ_0 струм досягає практично нульового значення, тому необхідно розрахувати величину енергії, яка потрібна для отримання кванту магнітного потоку. Якщо допустити, що струм зміщення дорівнює 1 мА, то величина енергії, що втрачається на перемикавання, дорівнює $2,07 \cdot 10^{-18}$ Дж.

При цьому, величина індуктивності, яка необхідна для отримання потоку величиною Φ_0 , дорівнює 2,07 пГн. При збільшенні струму зміщення величина індуктивності, яка необхідна для того, щоб отримати квант магнітного потоку Φ_0 , зменшується.

Висновки

1. Запропоновані функціональні схеми магнітокерованих логічних елементів «АБО», «І», «НІ» на базі переходів Джозефсона та розроблені їх еквівалентні схеми.
2. Проведений розрахунок часу згасання джозефсонівського струму та потужності, яка витрачається на перемикавання логічних елементів, доводить їх переваги у порівнянні з напівпровідниковими елементами.
3. Показано, що величина індуктивності, яка необхідна для реалізації магнітного потоку перемикавання, має дуже мале значення і може бути легко реалізована за інтегральною технологією.

Література

1. Корнев В.К. Исследование динамических процессов в джозефсоновских устройствах сверхпроводниковой электроники : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – М., 2007 – 38 с.
2. Суперпозиция состояний в потоковых кубитах с джозефсоновским контактом S с S типа / [В.И. Шныров, А.А. Сорока, А.М. Королев, О.Г. Турутанов] // Физика низких температур, 2012. – Т. 38. – № 4. – С. 382–395.
3. Корнев В.К. Эффект Джозефсона и его применение в сверхпроводниковой электронике / В.К. Корнев // Соревский образовательный журнал. – 2001. – Т. 2. – № 8. – С. 84–90.
4. Сучано Т. Введение в микроэлектронику / Сучано Т., Икома Т., Такэиси Е. ; [пер. с яп.] // М. : «Мир». 1988. – 320 с.
5. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах / Букингем М. – М. : «Мир». – 1986. – 399 с.
6. Кулик И.О. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах // И.О. Кулик, И.К. Янсон // Изд. «Наука». – 1970. – 276 с.
7. Тиханский М.В. Моделирование процессов коммутации в джозефсоновских элементах логики «И» и «ИЛИ» / М.В. Тиханский, Р.Р. Крысько // Физика низких температур. – 2013. – Т. 39. – № 2. – С. 127–133.

Referanses

1. Kornev V.K. Research of the dynamic processes in the Josephson devices hyperconductive electronics. Abstract of the dissertation. M. 2007 – 38 p.
2. Shnyrov V.I. Superposition of the state in the cubits with Josephson contact S with S type / V.I. Shnyrov, A.A. Soroka, A.M. Korolyov, O.G. Turutanov // Physics of the low temperatures, 2012, v. 38, № 4. – P. 382-395.
3. Kornev V.K. Josephson effect and its using in the hyperconductivity electronics / V.K. Kornev. // Sorovs educational journal. – 2001. – v. 2. - № 8. – P. 84-90.
4. Suchano T. Introduction in the electronics. / T. Suchano, T. Ikoma, E. Takeisy // M. "Peace". 1988. – 320 p.
5. Bukingem M. Noises in the devices and systems / M. Bukingem. – M.: "Peace". – 1986. – 399 p.
6. Kulik I.O. Josephson effect in the hyperconducting tunnel structures // I.O. Kulik, I.K. Janson // Publ. "Science". – 1970. – 276 p.
7. Tihanskiy M.V. Modeling of the commutation processes in the Josephson logic elements "AND" and "OR" / M.V. Tihanskiy, R.R. Krysko // Physics of low temperatures. 2013, v. 39, № 2. – P. 127-133.

Рецензія/Peer review : 14.1.2014 р.

Надрукована/Printed : 6.2.2014 р.
Статтю представляє: д.т.н. Кичак В.В.