

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ КРІОТРОНІВ

© Тиханський М.В., Партика А.І., 2007

M.V. Tyhanskyi, A.I. Partyka

OPERATION MODE OPTIMIZATION OF JOSEPHSON CRYOTRONS

© Tyhanskyi M.V., Partyka A.I., 2007

Запропоновано метод оптимізації режиму роботи джозефсонівських кріотронів (ДК) під час керування їхнім логічним станом імпульсами струму. Існуюча математична модель перехідних процесів в джозефсонівських кріотронах дає можливість отримати перехідні характеристики під час зміни логічного стану. Проте оптимізувати режим роботи кріотронів через велику кількість параметрів у моделі є складним завданням. Запропонований нами метод оптимізації, який полягає в розрахунках не тільки перехідних характеристик кріотронів, а також і часових залежностей складових загального струму в кріотроні, дав змогу дослідити вплив кожної складової струму на перехідні процеси і визначити ті параметри моделі, які безпосередньо впливають на логічні переходи.

In the paper, we propose a method of operation mode optimization of Josephson cryotrons (JC) during the regulation of their logic-state by current impulses. The existing mathematical model of transitional processes in Josephson cryotrons allows us to obtain transitional characteristics during the change in cryotrons' logic-state. However, to carry out the operation mode optimization of cryotrons remains a hard task due to the large number of the model's parameters. The proposed optimization method consisting in calculating not only the transitional characteristics of cryotrons, but also the time-dependences of the total current components in a cryotron allowed us to investigate the influence of each current component on the transitional processes and determine those parameters, which have a direct influence on logic-state transitions.

Вступ

Відкриття високотемпературних надпровідників і прогрес в технології виготовлення кріоелектронних мікроструктур привели до практичного використання створених на основі ефектів Джозефсона електронних перемикачів (кріотронів) та джозефсонівських комірок пам'яті [1–4]. Перспективність їхнього застосування в кріоелектроніці та комп'ютерній техніці визначається високою швидкістю порівняно з традиційними напівпровідниковими елементами. Дослідження фундаментальних фізичних процесів в джозефсонівських тунельних переходах (ДТП) та джозефсонівських мікромісткових контактах (ДМК) [1–2] можуть бути використані для розроблення джозефсонівських кріотронів та надшвидкодіючих елементів комп'ютерної пам'яті на їхній основі [3–4]. Основна інформація про перехідні процеси в кріотронах під час зміни їх логічного стану міститься в перехідних характеристиках кріотронів – часових залежностях напруги на кріотроні. Перехідні характеристики отримують експериментальними методами [2, 4] або розраховують,

використовуючи математичну модель. У роботах [5–7] було створено таку модель та отримані перехідні характеристики ДК при керуванні логічним станом кріотронів зовнішніми імпульсами струму. Наступним кроком на шляху розвитку цієї математичної моделі є пошуки методів оптимізації параметрів кріотронів та режиму їхньої стабільної роботи.

Математична модель перехідних процесів у кріотронах

У роботах [5, 7, 8] створено математичну модель перехідних процесів в кріотронах під час логічних переходів «0» → «1» та «1» → «0» при керуванні їх логічним станом імпульсами струму форми e^{-t^4} . Робочою температурою кріотронів була температура $T = 81,2$ К, яка є близькою до температури кипіння азоту $T = 77$ К. Для отримання перехідних характеристик використані розраховані ВАХ S-I-S тунельних переходів за робочої температури, які були апроксимовані простою математичною функцією:

$$I(V) = G_0 \cdot \left[0,920 \cdot V - \frac{0,001^{1,4} \cdot 2681 \cdot V^{1,4}}{1 + (0,054 \cdot V)^{15,5}} \right],$$

де G_0 – нормальна провідність переходу – параметр, який можна було змінювати в процесі моделювання і вибирати оптимальним; V – напруга на переході (задана в мілівольтах); I – сила тунельного струму (в міліамперах). Логічним станом кріотронів керували за допомогою зовнішніх імпульсів струму, форму яких задавала математична функція: $I_i(t) = I_0 \exp\left(-\frac{(t-t_n)^4}{t_{0n}^4}\right)$, де I_0 – амплітуда імпульсу струму, t_{0n} – середня тривалість n -го імпульсу, t_n – момент подачі n -го імпульсу струму. Для отримання перехідної характеристики кріотрона $V(t)$ – залежності напруги на кріотроні V від часу t – розв’язувалось складене нами диференціальне рівняння:

$$I_p + I_0 \exp\left(-\frac{(t-t_1)^4}{t_{01}^4}\right) - I_0 \exp\left(-\frac{(t-t_2)^4}{t_{02}^4}\right) = \frac{C\hbar}{2e} \varphi'' + \left[G_0 \cdot \left[0,920 \cdot V - \frac{0,001^{1,4} \cdot 2681 \cdot V^{1,4}}{1 + (0,054 \cdot V)^{15,5}} \right] \right] \frac{\hbar}{2e} \varphi' + [I_c] \sin \varphi, \quad (1)$$

де t_1 і t_2 – відповідно момент подачі першого і другого імпульсів, t_{01} і t_{02} – відповідно тривалість першого та другого імпульсів струму, C – ємність тунельного переходу. Невідомою функцією рівняння є функція $\varphi(t)$ – стрибок фази хвильових функцій надпровідників, які утворюють джозефсонівських тунельний перехід, визначивши яку, за допомогою формули Джозефсона $V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}$ можна отримати перехідну характеристику кріотрона $V(t)$. Початкові умови: $t = 0$; $\varphi(0) = 0$; $V(0) = 0$, тобто кріотрон перебував у стані логічного “0”, $I(0) = I_p$. Моделювання перехідних процесів, отримання перехідних характеристик, визначення швидкодії кріотрона та дослідження особливостей режимів роботи проводились розв’язанням цих рівнянь за допомогою комп’ютера. Під час моделювання логічних переходів “0” → “1” рівняння (1) задавалось 7 параметрами (I_p , I_0 , I_c , C , G_0 , t_1 , t_{01}) і трьома константами (0,920; 2681; 0,054), за допомогою яких апроксимували ВАХ. Значення I_p , I_0 та I_c вибирали на основі аналізу ВАХ, G_0 та C задавали методом підбору. Суть цього методу полягала у такому: спочатку визначали такі діапазони значень G_0 та C , за яких режим роботи кріотронів був би стабільним під час логічних переходів, а потім значення G_0 та C змінювались так, щоб покращувались перехідні характеристики кріотронів і при цьому стабільний режим роботи не переходив у нестабільний. Для того, щоб моде-

лювати логічні переходи «0» → «1» → «0», потрібно додатково ввести ще 2 часові параметри негативного імпульсу струму (t_2, t_{02}). Параметри t_1, t_{01}, t_2 та t_{02} підбирали і задавали аналогічно.

На рис. 1 показано часову залежність стрибка фази $\varphi(t)$ на кріотроні, на рис. 2 – перехідну характеристику джозефсонівського кріотрона, отриману для логічних переходів «0» → «1» та «1» → «0» при керуванні їх логічним станом імпульсами струму форми e^{-t^4} . Приведена характеристика розрахована, коли робочі та критичні параметри кріотрона були близькими до оптимальних. Температура $T = 81,2$ К, нормальна провідність $G_0 = 0,6$ Ом⁻¹, ємність ДТП $C = 1,5$ пФ, робочий струм кріотрона $I_p = 8$ мА, критичний струм $I_c = 15,5$ мА, амплітуда зовнішніх імпульсів струму $\Delta I = 8$ мА, Вертикальними стрілками показано: момент подачі позитивного імпульсу струму $t_1 = 20$ пс, момент подачі негативного імпульсу струму $t_2 = 60$ пс. Горизонтальними стрілками: середню тривалість позитивного імпульсу струму $t_{01} = 4$ пс, середню тривалість негативного імпульсу струму $t_{02} = 20$ пс.

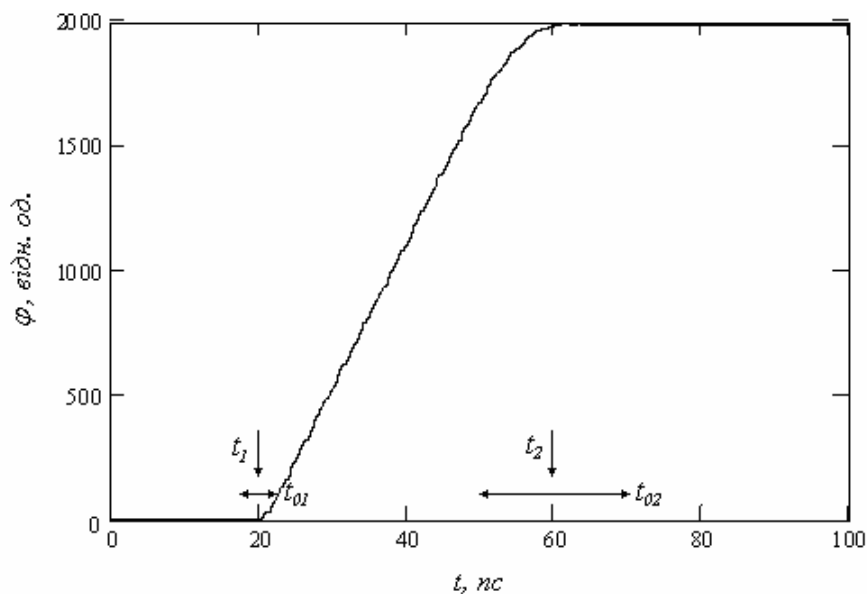


Рис. 1. Часова залежність стрибка фази $\varphi(t)$ на кріотроні

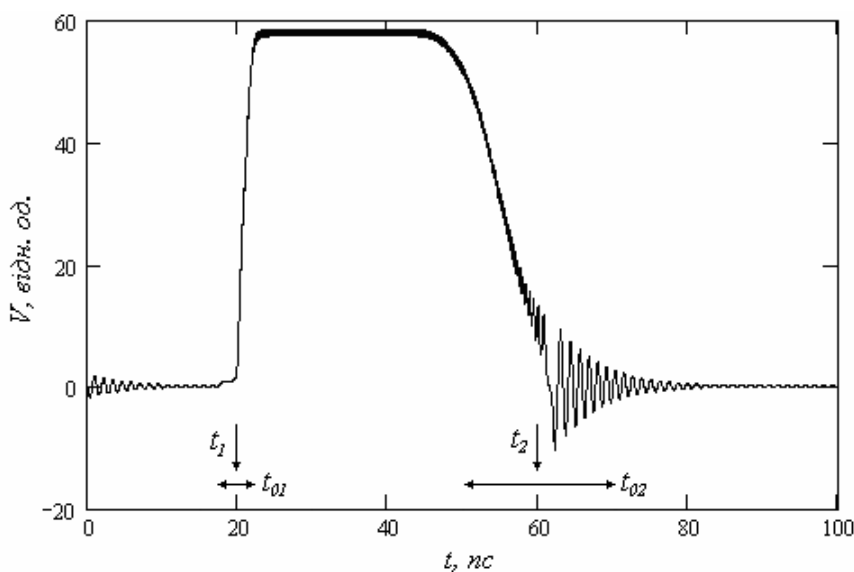


Рис. 2. Перехідна характеристика джозефсонівського кріотрона під час логічних переходів «0» → «1» та «1» → «0»

Метод оптимізації режиму роботи кріотронів

Для оптимізації параметрів кріотронів та режиму їхньої роботи запропоновано і розроблено метод поелементних розрахунків часових залежностей всіх складових сумарного струму, тобто постійного робочого струму, що протікає через кріотрон, та імпульсів струму, за допомогою яких змінювали логічний стан кріотрона. Розв'язавши диференційне рівняння (1) відносно невідомого параметра φ , ми отримали можливість розписати кожен складову сумарного струму, а саме[9]:

1. Струм, який протікає за рахунок одноелектронного тунелювання $I_1(t)$:

$$I_1 = G_0 \cdot \left[0,920 \cdot p\varphi' - \frac{0,001^{1,4} \cdot 2681 \cdot (p\varphi')^{1,4}}{1 + (0,054 \cdot p\varphi')^{15,5}} \right];$$

2. Ємнісного струму $I_2(t)$:

$$I_2 = p \cdot C \cdot \varphi'', \text{ де } p = \frac{\hbar}{2e};$$

3. Струму, який протікає за рахунок надпровідного тунелювання куперівських пар $I_3(t)$:

$$I_3 = I_c \cdot \sin \varphi.$$

Побудувавши в середовищі часову залежність $\varphi(t)$ (рис. 1) і провівши відповідні обрахунки, отримано такі залежності: $V(t)$ (рис. 2), $I_1(t)$ (рис. 3, а), $I_2(t)$ (рис. 3, б), $I_3(t)$ (рис. 3, в).

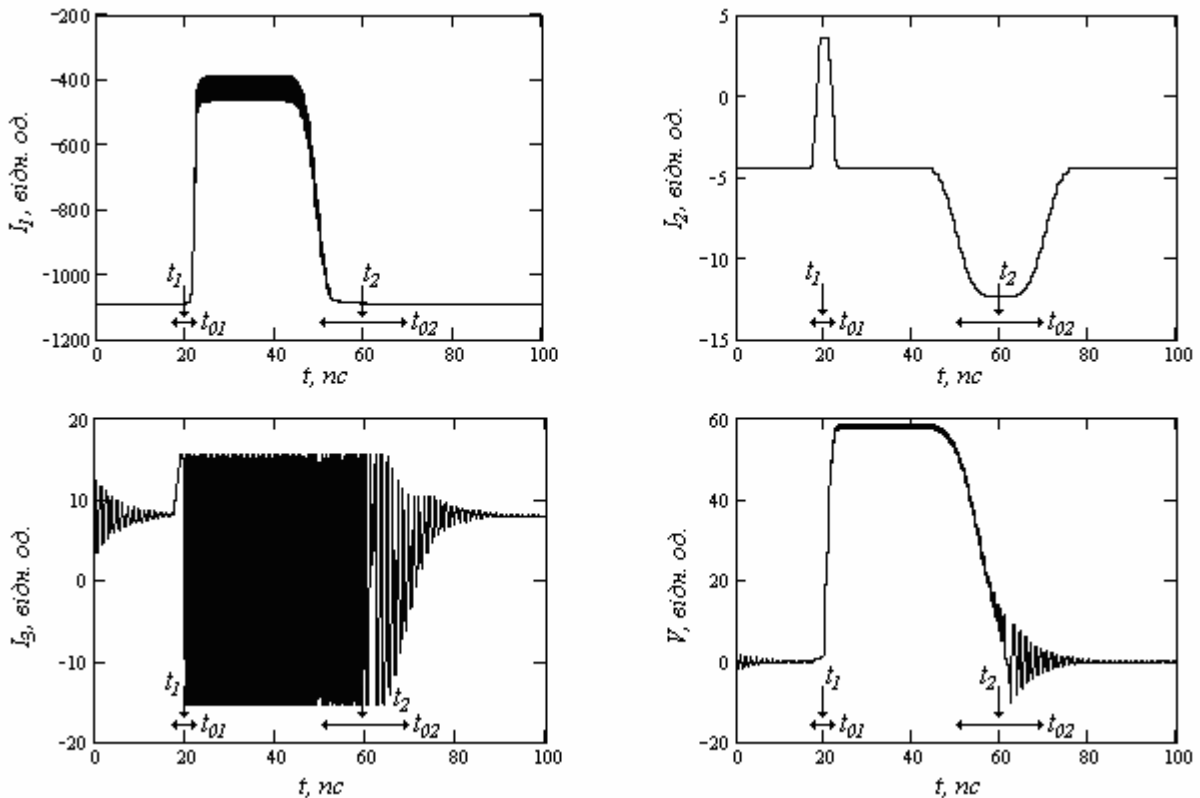


Рис. 3. Часові залежності окремих складових сумарного струму, що протікає через кріотрон (I_1 – струм, зумовлений тунелюванням нормальних електронів, I_2 – струм зарядження ємності, I_3 – надпровідний тунельний струм)

З рис. 3, а видно, що саме струм I_1 , зумовлений тунелюванням нормальних електронів, відіграє домінуючу роль у формуванні характеру фронту перехідної характеристики. Порівнявши рис. 3, а і рис. 3, в бачимо, що в стані логічної «1» відбуваються гармонічні осциляції, пов'язані власне з надпровідним тунелюванням. Проаналізувавши отримані залежності, ми побачили, що оптимальне значення нормальної провідності лежить в межах $G_0 = 0,5 - 0,6 \text{ Ом}^{-1}$. Якщо величину

нормальної провідності збільшувати, то в стані логічної «1» зростатиме амплітуда надпровідних коливань, що є небажаним явищем з погляду стабільності роботи кріотрона. У випадку ж зменшення величини провідності взагалі не спостерігалось логічного переходу «1»→«0».

На рис. 3, б зображено, як змінюється заряд конденсатора залежно від керівних імпульсів. Із зміною ємності ДТП в межах $C = 1,5 - 1,6$ пФ перехідна характеристика практично не змінювала свого вигляду. Зменшення ємності до значень, менших за 1,5 пФ, приводило до зниження швидкодії кріотрона і виникнення згинів на перехідних характеристиках, а зростання $C > 1,6$ пФ – до збільшення часу комутації. Після завершення переходу «1»→«0» в стані логічного «0» на перехідній характеристиці кріотрона спостерігались згасаючі релаксаційні коливання напруги. Як видно з вищезазначених графіків, ці коливання мають надпровідну природу і збігаються з моментом розрядки конденсатора. Запропонований метод дав змогу значно звузити область пошуку таких параметрів, як нормальна провідність G_0 і ємність переходу C , тим самим створюючи можливість для подальшої оптимізації інших параметрів.

Висновки

Запропонований нами метод оптимізації режиму роботи джозефсонівських кріотронів під час керування їх логічним станом імпульсами струму дав можливість розрахувати часові залежності складових струмів разом з перехідною характеристикою кріотрона. Аналіз отриманих результатів зменшив кількість параметрів моделі, які впливають на перехідні процеси в кріотронах, і зміною яких можна оптимізувати режим роботи кріотронів та покращити їхні перехідні характеристики. Оптимізовані таким чином характеристики зменшили час комутації кріотронів при логічних переходах «0» → «1» до 2 пс, а при логічних переходах «1» → «0» – до 15 пс.

1. Малишевский А.С. // *Физика низких температур*. – 1997. Т. 23. – №7. – С. 663–675.
2. Orlando T.P., Mooij J.E., Tian L., Casper H. van der Wal, Levitov L.S., Seth Lloyd, Mazo J.J. // *Phys. Rev. B*. 60. – №22. – 1999. – С. 15398–15414.
3. Ван Дузер Т. *Физические основы сверхпроводящих устройств*. – М.: Радио и связь, 1984.
4. T. Van Duzer. // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techn.* – 1990. – 28. – P. 492–498.
5. Тиханський М.В., Шуригін Ф.М., Тиханська К.М. // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2003. – №482. – С. 152–160.
6. Безуглий Е.В., Братусь Е.Н., Галайко В.П. // *Физика низких температур*. – 1999. Т. 25. – №3. – С. 230–239.
7. Тиханський М.В., Тиханська К.М. // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2004. – №513. – С. 191–198.
8. Тиханський М.В., Крисько Р.Р., Партика А.І. // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2005. – №532. – С. 138–146.
9. Янсон И.К. // *Физика низких температур*. – 2004. Т. 30. – №7 – 8. – С. 689–697.