

DOI [10.28925/2663-4023.2020.8.7384](https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.8.7384)

УДК 621.382.323

**Тиханський Михайло Васильович**

к.ф.-м.н., доцент

доцент кафедри захисту інформації НУ «Львівська політехніка», Львів, Україна

ORCID: 0000-0001-7283-0626

[tymyvas@gmail.com](mailto:tymyvas@gmail.com)**Партика Андрій Ігорович**

к.т.н.

старший викладач кафедри захисту інформації НУ «Львівська політехніка», Львів, Україна

ORCID: 0000-0003-3037-8373

[andrijp14@gmail.com](mailto:andrijp14@gmail.com)

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПАМ'ЯТІ

**Анотація.** Мета роботи полягає в пошуку способів збільшення швидкодії елементів комп'ютерної пам'яті за рахунок використання структур, що працюють на інших принципах, ніж традиційні напівпровідникові схеми. Одним з напрямків використання унікальних можливостей джозефсонівської структур є створення на їх основі надшвидкодійних елементів комп'ютерної пам'яті нового покоління. Завдяки високим робочим характеристикам частотам, які є близькими до частоти 1 ТГц, вони найперспективніші кандидати для створення петафлоп комп'ютерів. Крім того, і джозефсонівські кріотрони і СКВІДи можуть бути використані для реалізації кубітів – елементів квантових комп'ютерів і для опису макроскопічної квантової поведінки, наприклад, при створенні зчитувальної електроніки для квантових обчислень. В роботі створено математичну модель перехідних процесів, які мають місце у джозефсонівських кріотронах під час прямих логічних переходів «0» → «1» та зворотних логічних переходів «1» → «0». Розглянуто керування логічним станом джозефсонівських елементів пам'яті, створених на основі джозефсонівських тунельних переходів типу S-I-S за допомогою зовнішніх імпульсів струму. Методами математичного моделювання досліджено перехідні процеси в кріотронах під час зміни їх логічного стану та розраховано перехідні характеристики кріотронів для робочих температур  $T_1 = 11,6$  К та  $T_2 = 81,2$  К, які є близькими до температур кипіння гелію та азоту відповідно. Показано, що такі елементи пам'яті можуть ефективно працювати і за робочої температури  $T_2 = 81,2$  К. Визначено часи комутації для прямих логічних переходів «0» → «1» та для зворотних переходів «1» → «0». Виявлено особливості поведінки джозефсонівських кріотронів та досліджено стабільність режиму роботи таких елементів пам'яті.

**Ключові слова:** джозефсонівський кріотрон; логічний елемент; перехідна характеристика; перехідний процес; процес комутації.

### 1. ВСТУП

Використання традиційних елементів пам'яті в комп'ютерній техніці забезпечило тривалий прогрес у розвитку комп'ютерних технологій, але подальші кроки у цій галузі пов'язують із створенням комп'ютерної техніки нового покоління, елементи якої працювали би на нових фізичних явищах і принципах. Цікавими і перспективними в цьому плані є надпровідні або джозефсонівські кріотрони, якщо їх використовувати як елементи логічних схем, запам'ятовуючі пристрої чи різноманітні перемикачі. Вони

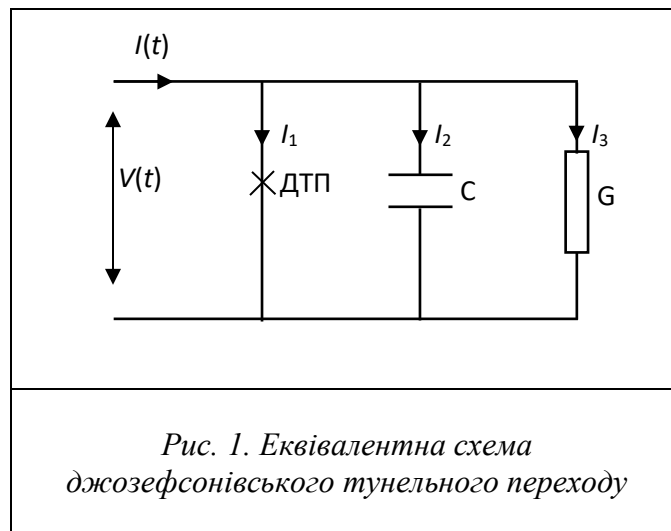
відзначаються низьким споживанням енергії для зміни логічного стану ( $\sim 10^{-18}$  Дж), малими характерними розмірами (0,01 - 1 мкм), високою швидкістю і малим часом комутації ( $\sim 10^{-11}$  с) [1-3]. Дослідження щодо створення на основі джозефсонівських тунельних контактів надшвидкодіючих елементів комп'ютерної пам'яті проводяться в багатьох дослідних лабораторіях [2-7].

**Постановка проблеми.** В наших попередніх роботах [8-9] створено основи математичної моделі перехідних процесів, що проходять у джозефсонівських кріотронах на основі S-I-S тунельних контактів під час зміни їх логічного стану за допомогою керуючих імпульсів струму або магнітного потоку, і розраховано перехідні характеристики кріотронів – часові залежності напруги на кріотроні.

Основою таких кріотронів були джозефсонівські тунельні переходи з високотемпературних надпровідників, які можна використовувати як надшвидкодіючі елементи пам'яті з робочими температурами, рівними температурі кипіння азоту  $T = 77$  К і гелію  $T = 4$  К відповідно.

**Мета статті.** В даній роботі приведені отримані перехідні характеристики кріотронів, досліджені особливості характеристик, які розраховані для керування логічним станом кріотронів за допомогою зовнішніх імпульсів струму.

## 2. ПРИНЦИП РОБОТИ КРІОТРОНІВ



На рис. 1 приведена еквівалентна електрична схема джозефсонівського тунельного переходу (ДТП)[1]. Струм  $I(t)$ , який пропускають через перехід, розгалужується на три складові:  $I_1 = I_c \sin \varphi$  – джозефсонівський тунельний струм, який зумовлений тунелюванням куперівських пар;  $I_2 = C \frac{dV}{dt}$  – ємнісний струм, який зумовлений перезарядкою переходу, і  $I_3 = GV$  – нормальний струм, який пов'язаний із одноелектронним тунелюванням. Тут  $I_c$  – критичний струм ДТП, – різниця фаз (стрибок фази) хвильових функцій надпровідників, з яких складається перехід,  $V$  – напруга на переході,  $G$  – нормальна провідність ДТП, яка може залежати від напруги  $V$ . Напругу на контакті  $V$  виражають через функцію  $\varphi$  за допомогою

загальновідомого співвідношення нестационарного ефекту Джозефсона  $V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}$ , де  $\hbar$  – стала Планка,  $e$  – заряд електрона. Загальний струм  $I(t)$ , що протікає через ДТП, за законом Кірхгофа можна подати у вигляді суми трьох складових:  $I(t) = I_1 + I_2 + I_3$ , що дозволяє записати робоче диференційне рівняння:

$$I(t) = I_c \sin \varphi + \frac{C\hbar}{2e} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{G(V)\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (1)$$

Струм  $I(t)$  містить постійну складову  $I_{OP}$  (робочий струм) і змінну складову, яка визначається керуючими зовнішніми імпульсами, необхідними для зміни логічного стану кріотрона. Станом логічного «0» вважають стан, коли  $I(t) = I_p$  і  $V = 0$ , станом логічної «1» вважають стан, коли  $I(t) = I_{OP}$  і  $V \neq 0$ . Для встановлення значення  $I_{OP}$  потрібно знати ВАХ джозефсонівського тунельного переходу і величину сили критичного струму  $I_c$ . Розв'язавши робоче диференційне рівняння (1), отримаємо невідому функцію  $\varphi(t)$  і визначимо часову залежність напруги на кріотроні  $V(t)$  (перехідну характеристику кріотрона), яка містить інформацію про перехідні процеси під час логічних переходів «0» → «1» чи «1» → «0». Детальніше принцип роботи джозефсонівських кріотронів описано в роботі [10].

### 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Основою математичної моделі перехідних процесів в джозефсонівських кріотронах є диференційне рівняння (1). Якщо у початковий момент часу кріотрон перебував у логічному стані «0», то початкові умови для рівняння (1) встановлено такі:  $\varphi(0) = 0$  і  $\varphi'(0) = 0$ , бо у цьому стані напруга  $V = 0$ . Для визначення функції  $G(V)$ , яка би описувала залежність нормальної провідності тунельного переходу  $G$  від напруги  $V$ , нами розраховано ВАХ джозефсонівських тунельних переходів на основі S-I-S тунельних контактів для двох температур  $T_1 = 11,6$  К та  $T_2 = 81,2$  К, які є близькими до температур кипіння гелію та азоту відповідно. Розраховані ВАХ були апроксимовані простими математичними функціями, які мають такий вигляд:

$$I(V) = G_0 \left[ 0,942 \cdot V - \frac{0,940 \cdot V}{1 + (0,054 \cdot V)^{15,5}} \right] \quad (2)$$

для температури  $T_1 = 11,6$  К і

$$I(V) = G_0 \cdot \left[ 0,920 \cdot V - \frac{0,001^{1,4} \cdot 2681 \cdot V^{1,4}}{1 + (0,054 \cdot V)^{15,5}} \right] \quad (3)$$

для температури  $T_2 = 81,2$  К.  $G_0$  - нормальна провідність ДТП за високих напруг  $V$ , тобто таких напруг, коли перехід стає омичним. Під час моделювання параметр  $G_0$  змінювали в широких межах.

Струм  $I(t)$ , який пропускали через кріотрон, мав постійну складову  $I_{OP}$  та змінну складову  $I_i$  (керуючий імпульс струму). Під час проведення пробних моделювань керуючі імпульси мали ідеально прямокутну форму і задавались

функціями Хевісайда або розмиту форму і задавались функціями Гауса [8]. Заміна функцій Хевісайда на функції Гауса призвела до значного погіршення перехідних характеристик, що ми пояснили поганою локалізацією таких керуючих імпульсів у часі. Для покращення перехідних характеристик кріотронів і підвищення їх швидкодії ми запропонували здійснювати керування логічним станом за допомогою імпульсів, що мають таку форму, яку можна задавати функцією  $\exp(-t^4)$ . В результаті струм  $I(t)$  ми задавали так:

$$I(t) = I_p \pm I_0 \exp\left(-\frac{(t-t_n)^4}{\tau_n^4}\right), \quad (4)$$

де  $I_0$  – амплітуда керуючого імпульсу струму,  $\tau_n$  – середня тривалість  $n$ -го імпульсу струму,  $t_n$  – момент подачі  $n$ -го імпульсу струму. Значення величин  $I_{OP}$ ,  $I_0$ ,  $\tau_n$  та  $t_n$  у ході математичного моделювання можна було змінювати в широкому діапазоні. На основі попередніх досліджень [8], величина сили робочого струму  $I_{OP}$  задавалось так, щоб  $I_{OP} \approx 0.5I_c$ , де  $I_c$  – сила критичного струму джозефсонівського кріотрона.

В результаті підстановок матимемо кінцеве робоче диференціальне рівняння:

$$\begin{aligned} & I_{OP} + I_0 \exp\left(-\frac{(t-t_1)^4}{\tau_1^4}\right) - I_0 \exp\left(-\frac{(t-t_2)^4}{\tau_2^4}\right) = \\ & = \frac{C\hbar}{2e} \varphi'' + \left[ 0.942(\alpha\varphi') - \frac{0.940(\alpha\varphi')}{1 + (0.054\alpha\varphi')^{15.5}} \right] \cdot G_0 + (I_c) \sin \varphi \end{aligned} \quad (5)$$

для температури  $T_1 = 11,6$  К, де  $t_1$  і  $t_2$  – відповідно моменти подачі першого і другого керуючих імпульсів,  $2\tau_1$  і  $2\tau_2$  – відповідно тривалості першого та другого керуючих імпульсів. Для температури  $T_2 = 81,2$  К робоче рівняння було таким:

$$\begin{aligned} & I_{OP} + I_0 \exp\left(-\frac{(t-t_1)^4}{\tau_1^4}\right) - I_0 \exp\left(-\frac{(t-t_2)^4}{\tau_2^4}\right) \\ & \frac{C\hbar}{2e} \varphi'' + \left[ 0.920(\alpha\varphi') - \frac{0.001^{1.4} \cdot 2681 \cdot (\alpha\varphi')^{1.4}}{1 + (0.054\alpha\varphi')^{15.5}} \right] \cdot G_0 + (I_c) \sin \varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

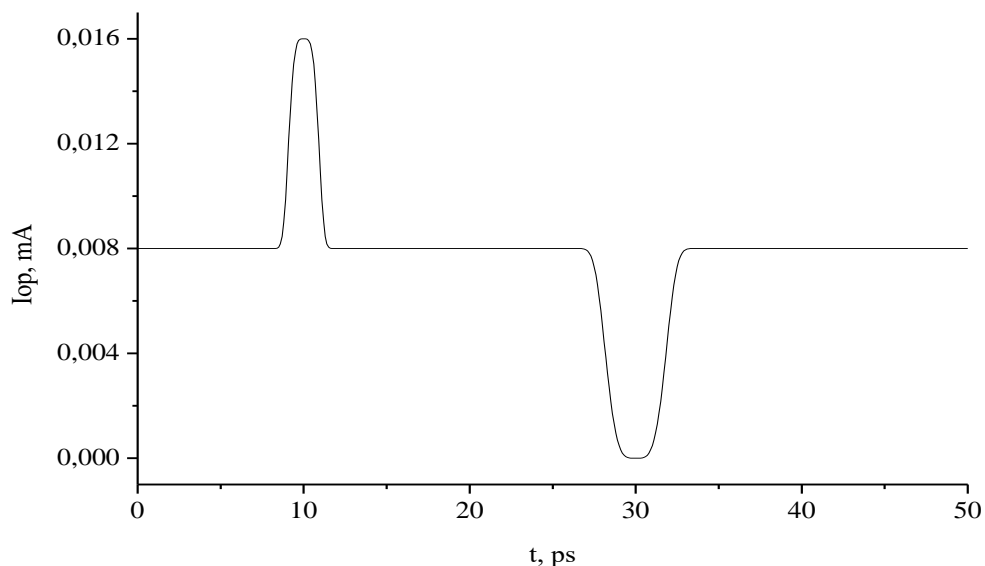
Моделювання перехідних процесів, отримання перехідних характеристик, визначення швидкодії кріотрона та дослідження особливостей режимів роботи проводились розв'язуючи такі рівняння за допомогою методу Рунге-Кутта. Під час моделювання прямих логічних переходів "0" → "1" та зворотних логічних переходів "1" → "0" рівняння (5-6) конкретизувались за допомогою 9 параметрів:  $I_{OP}$ ,  $I_0$ ,  $I_c$ ,  $C$ ,  $G_0$ ,  $t_1$ ,  $\tau_1$ ,  $t_2$  та  $\tau_2$  і трьох констант, які визначали ВАХ кріотрона для заданої температури. Параметри встановлювались методом підбору, виходячи з мінімізації величини часу комутації кріотрона і стабільності режиму роботи.

#### 4. ПЕРЕХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРІОТРОНІВ

На рис. 2 приведено часову залежність керуючих імпульсів струму (а) і одну з перехідних характеристик кріотронів під час логічних переходів "0" → "1" та "1" → "0"

(б), яка розрахована для температури  $T_1 = 11,6$  К з використанням оптимальних параметрів моделі, які містяться у табл. 1. Пошук оптимальних параметрів також здійснювали методом підбору. Критерієм оптимальності служили максимальна швидкодія чи мінімальний час комутації  $\Delta t$  - характерний час, за який кріотрон змінює свій логічний стан.

В початковий момент часу кріотрон перебував у стані «0», а напруга на ньому  $V(0) = 0$ . В часовому проміжку  $0 < t < 5$  пс на перехідній характеристиці  $V(t)$  видно слабкі згасаючі коливання напруги, які можна пояснити виходом кріотрона на робочий режим. В момент часу  $t_1 = 10$  пс подано перший керуючий імпульс струму тривалістю  $\tau_1 = 2$  пс. Моментом подачі керуючого імпульсу вважаємо той момент часу, коли величина керуючого імпульсу досягає максимуму. Видно, що в результаті дії на кріотрон керуючого імпульсу кріотрон здійснює логічний перехід «0» → «1», час комутації для якого  $\Delta t_1 \approx 1$  пс. Після переходу кріотрона в стан логічної «1» на перехідній характеристиці спостерігались незгасаючі коливання напруги малої амплітуди, які можна пояснити джозефсонівською генерацією. Швидкодія логічного переходу «0» → «1» була максимальною для керуючих імпульсів струму середньою тривалістю  $\tau_1 = 1$  пс. Зменшення величини  $\tau_1$  до 1 пс або збільшення до 4 пс вело до зниження швидкодії і збільшення часу комутації до  $\Delta t_1 \approx 2,5$  пс.



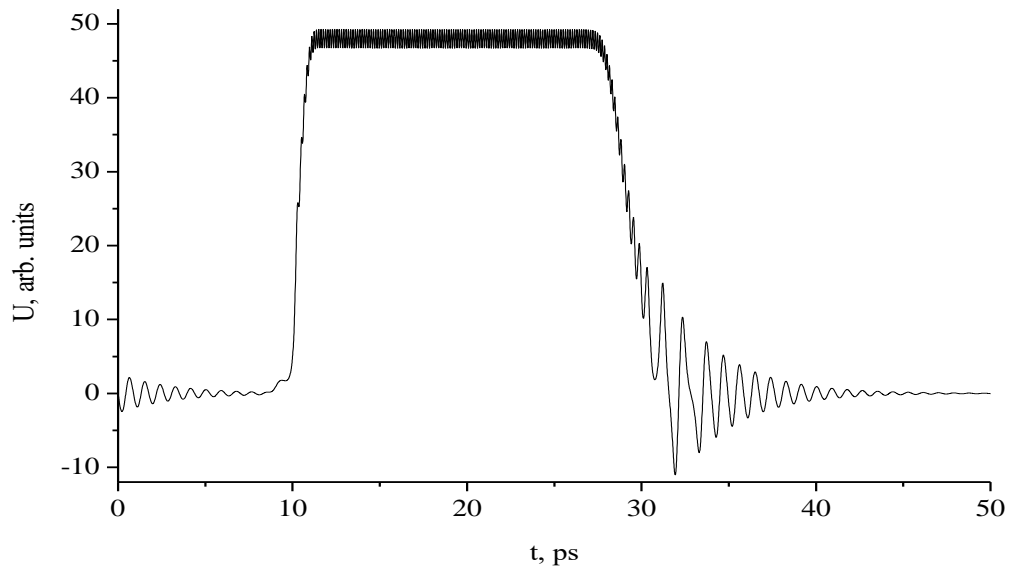


Рис. 2. Часова залежність керуючих імпульсів струму (а) та напруги на кріотроні  $V$  (б) під час логічних переходів «0» → «1» та «1» → «0»

Для моделювання логічного переходу «1» → «0» коли кріотрон перебував у стані «1» і напруга на ньому була рівною  $V_0 \approx 10$  мВ, в момент часу  $t_2 = 30$  пс подано другий керуючий імпульс струму тривалістю  $\tau_2 = 4$  пс, який мав негативну полярність відносно першого. З рис. 2б видно, що під час логічного переходу «1» → «0» перехідний процес був складнішим. Напруга на кріотроні зменшувалась до нульового значення не плавно, а її зменшення супроводжувалось до моменту часу  $t = 30$  пс коливаннями напруги із зростаючою амплітудою, а після цього спостерігались згасаючі коливання напруги. Аналогічні коливання напруги спостерігались і на перехідних характеристиках кріотронів, отриманих експериментально [4], і на перехідних характеристиках, які були розраховані нами у разі керування станом кріотрона імпульсами струму ідеальної прямокутної форми [8]. Максимальна амплітуда коливань напруги складала не більше за 15% від величини напруги на кріотроні в стані логічної «1». Характерний час згасання коливань напруги  $\sim 10$  пс. Той факт, що амплітуда коливань напруги у стані логічного «0» не перевищувала 15% від величини напруги  $V_0$ , коли кріотрон перебував у стані логічної «1», дозволяє ідентифікувати цей стан як стан логічного «0». Поки що ми вважаємо, що логічні переходи «1» → «0» у джозефсонівських кріотронах не можуть проходити без згасаючих коливань напруги. Коли амплітуда цих коливань була меншою (набагато меншою) за напругу  $V_0$ , спостерігались незгасаючі коливання напруги, а кріотрон не змінював свого логічного стану. Час комутації для логічних переходів «1» → «0»  $\Delta t_2$  визначали як проміжок часу від початку перехідного процесу до моменту часу, коли амплітуда коливань напруги стане меншою за рівень напруги  $0,1V_0$ . За перехідною характеристикою, що приведена на рис.2б, визначено цей час комутації:  $\Delta t_2 \approx 6$  пс. Визначені часи комутації  $\Delta t_1$  і  $\Delta t_2$  також приведені у табл. 1.

Таблиця 1.

**Основні параметри моделі і часи комутації за температури 11,6 К**

Робоча температура $T$ , К	11,6
Сила критичного струму $I_C$ , мКА	15,5
Сила робочого струму $I_{OP}$ , мКА	8
Амплітуда керуючих імпульсів $I_0$ , мКА	8
Ємність тунельного переходу $C$ , пФ	$0,78 \times 10^{-3}$
Нормальна провідність $G_0$ , Ом <sup>-1</sup>	$0,54 \times 10^{-3}$
Момент подачі першого імпульсу $t_1$ , пс	10
Тривалість першого імпульсу $\tau_1$ , пс	2
Момент подачі другого імпульсу $t_2$ , пс	30
Тривалість другого імпульсу $\tau_2$ , пс	4
Час комутації для логічних переходів "0" → "1" $\Delta t_1$ , пс	1
Час комутації для логічних переходів "1" → "0" $\Delta t_2$ , пс	6

Результати математичного моделювання показали, що перехідні характеристики кріотронів для логічних переходів "1" → "0" у значній мірі залежали від середньої тривалості негативних керуючих імпульсів струму  $\tau_2$ . Найкращі характеристики були отримані, коли величина  $\tau_2$  складала 4 пс. Зменшення середньої тривалості імпульсів струму  $\tau_2$  вело до поступової втрати стабільності режиму роботи кріотронів, тобто керуючі імпульси струму не могли змінювати логічного стану "1" на стан "0". Збільшення тривалості негативних керуючих імпульсів суттєво не впливало на форму перехідних характеристик, проте призводило до збільшення часу комутації кріотрона  $\Delta t_2$ .

Для дослідження можливості використовувати джозефсонівські кріотрони як елементи пам'яті, які могли би працювати за температури, яка близька до температури кипіння азоту, проведено моделювання перехідних процесів в кріотронах за робочої температури  $T_2 = 81,2$  К. Для цього використовували робоче рівняння (6) і отримали перехідні характеристики, одну з яких разом з часовою залежністю керуючих імпульсів струму приведено на рис. 3. В табл. 2 приведено параметри моделі, які відповідають цій перехідній характеристиці.

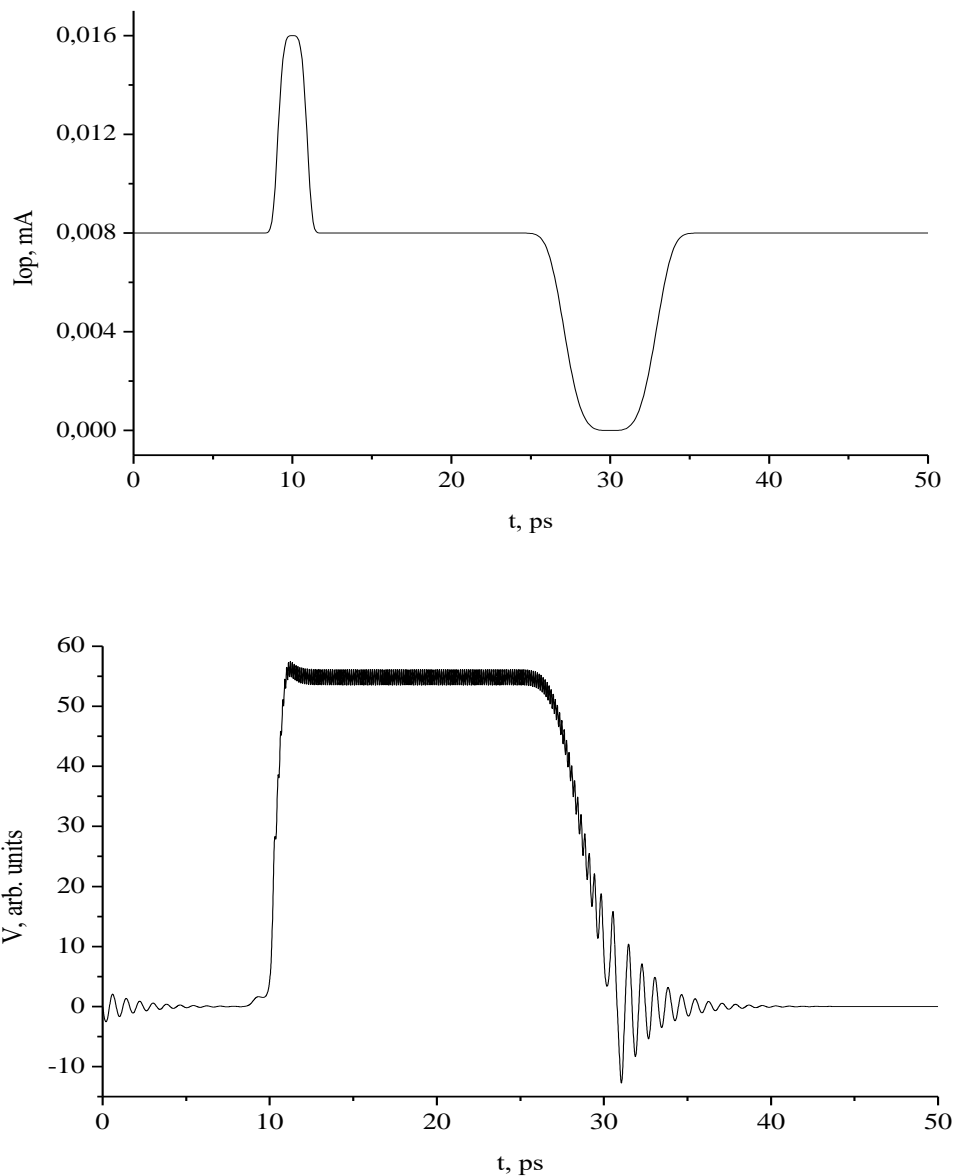


Рис. 3. Часова залежність керуючих імпульсів струму (а) та напруги на кріотроні  $V$  (б) під час логічних переходів «0» → «1» та «1» → «0»

Як видно з рис. 3, перехідна характеристика кріотрона не зазнала суттєвих змін, окрім появи згину на кривій  $V(t)$  після закінчення логічного переходу «0» → «1». Отримано, що мінімальна тривалість першого керуючого позитивного імпульсу струму, який приводив до логічного переходу «0» → «1»,  $\tau_1 = 1$  пс. Час комутації для таких логічних переходів  $\Delta t_1 \approx 1$  пс. Мінімумна тривалість другого керуючого негативного імпульсу струму, який приводив до логічного переходу «1» → «0»,  $\tau_2 = 3,5$  пс, а час комутації -  $\Delta t_2 \approx 7$  пс. Мінімумна тривалість негативних керуючих імпульсів  $\tau_2$  у декілька разів перевищувала мінімумну тривалість позитивних керуючих імпульсів  $\tau_1$ . Аналогічні результати були отримані у попередніх роботах [8] і їх можна пояснити так:  $\tau_2 > \tau_1$ , оскільки відновити джозефсонівське тунелювання куперівських пар в кріотроні



під час логічних переходів «1» → «0» важче, ніж зруйнувати джозефсонівське тунелювання під час логічних переходів «0» → «1». Тому для відновлення потрібно більше часу, ніж для руйнування.

Таблиця 2.

**Основні параметри моделі і часи комутації за температури 81,2 К**

Робоча температура $T$ , К	81,2
Сила критичного струму $I_C$ , мкА	15,5
Сила робочого струму $I_{OP}$ , мкА	8
Амплітуда керуючих імпульсів $I_0$ , мкА	8
Ємність тунельного переходу $C$ , пФ	$0,66 \times 10^{-3}$
Нормальна провідність $G_0$ , Ом <sup>-1</sup>	$0,75 \times 10^{-3}$
Момент подачі першого імпульсу $t_1$ , пс	10
Тривалість першого імпульсу $\tau_1$ , пс	2
Момент подачі другого імпульсу $t_2$ , пс	30
Тривалість другого імпульсу $\tau_2$ , пс	7
Час комутації для логічних переходів «0» → «1» $\Delta t_1$ , пс	1
Час комутації для логічних переходів «1» → «0» $\Delta t_2$ , пс	7

Порівнюючи отримані перехідні характеристики кріотронів для робочих температур  $T_1 = 11,6$  К і  $T_2 = 81,2$  К, приведені на рис. 2 і рис. 3, та визначені часи комутації  $\Delta t_1$  і  $\Delta t_2$  для цих температур, які приведені у табл. 1 і табл. 2, можна зробити висновок, що збільшення робочої температури до  $T_2$  на швидкодію джозефсонівських кріотронів суттєво не впливає.

**6. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

В роботі створено математичну модель перехідних процесів, які мають місце під час зміни логічного стану джозефсонівських кріотронів у разі дії керуючих імпульсів струму. Розраховано перехідні характеристики кріотронів для робочих температур  $T_1 = 11,6$  К і  $T_2 = 81,2$  К, досліджено особливості перехідних характеристик та визначено часи комутації кріотронів для логічних переходів «0» → «1» та «1» → «0». Отримані величини часів комутації, які для прямих логічних переходів «0» → «1» час комутації складала  $\approx 1$  пс, а для зворотних переходів «1» → «0» ці часи були 6 - 7 пс. Показано, що такі елементи комп'ютерної пам'яті, виготовлені на основі високотемпературних надпровідників, можуть ефективно працювати за робочих температур, які є близькими до температури кипіння азоту. Результати моделювання узгоджуються з результатами, отриманими в моделі перехідних процесів в джозефсонівській елементах логіки «І», «АБО» та «НЕ» [11, 12].



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] К.К. Likharev, V.K. Semenov., *IEEE Trans Appl Supercond* As-1: 3-28, (1991).
- [2] Q.P. Herr, A.Y. Herr, O.T. Oberg, and A.G. Ioannidis, *J. Appl. Phys.* **109**, 103903 (2011)
- [3] W. Kuo, C.S. Wu, J.H. Shyu, and C.D. Chen, *J. Appl. Phys.* **101**, 053903 (2007).
- [4] J.H. Kim, R.P. Dhungana, and K.S. Park, *Phys. Rev. B* 73, 214506. (2006).
- [5] Y. Ilyin, A. Nijhuis and H.H.J. ten Kate, *Cryogenics*. Vol. 46. Is. 7-8. (2006).
- [6] Y. Mizugaki, Y. Namatame and M. Maezawa, *Supercond. Sci. Technol*, **20**, Is.11, (2007).
- [7] Т. Ван Дузер, *Физические основы сверхпроводящих устройств*, Радио и связь, Москва (1984).
- [8] М.В. Тиханський, А.І. Партика, *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, №4, (2007).
- [9] М.В. Тиханський, А.І. Партика, *Вісник НУ"Львівська політехніка"*, №646: Електроніка, (2009).
- [10] М.В. Тиханський, А.І. Партика, *Журнал «Електроніка и связь»*, Ч.2., №4-5, (2009).
- [11] Р.Р. Крисько, А.І. Партика, М.В. Тиханський, *Матеріали VII українсько-польської науково-практичної конференції «Електроніка та інформаційні технології»*, Львів, (2016).
- [12] Р.Р. Крисько, А.І. Партика, М.В. Тиханський, *«Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, т. 4, №4, (2019). <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2019.4.3243>

**Mykhailo V. Tyhanskyi**

PhD, Associate professor, Associate professor department of information security  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: 0000-0001-7283-0626  
tymyvas@gmail.com

**Andrii I. Partyka**

PhD, Senior lecturer department of information security  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: 0000-0003-3037-8373  
andrijp14@gmail.com

## MATHEMATICAL MODEL FOR TRANSITIONAL PROCESSES IN JOSEPHSON MEMORY ELEMENTS

**Abstract.** The goal of this work is to find ways of enhancing the speed of computer memory cells by using structures that employ operating principles other than those of traditional semiconductors' schemes. One of the applications of the unique properties of Josephson structures is their usage in novel superfast computer memory cells. Thanks to their high working characteristic frequencies close to 1 THz, the Josephson structures are most promising candidates to be used in petaflop computers. Moreover, both Josephson cryotrons and Josephson SQUIDs can be used in qubits, which are basic units in quantum computers, and also for describing a macroscopic quantum behavior, for example, during read-out processes in quantum computations. In the present work, we have created a mathematical model of transition processes in Josephson cryotrons during direct, "1" → "0", as well as inverse, "0" → "1", logical transitions. We have considered controlling the logical state of Josephson memory cells based on Josephson tunneling junctions of the S-I-S type via external current pulses. By means of mathematical modelling, we have studied transition processes in cryotrons during the change of their logical state and calculated their transition characteristics for working temperatures  $T_1 = 11.6$  K and  $T_2 = 81.2$  K, which are close to the boiling temperatures of helium and nitrogen, respectively. It has been shown that such memory cells can effectively operate at the working temperature  $T_2 = 81.2$  K. We have determined commutation times for both the direct "0" → "1" and inverse "0" → "1" transitions. We have also identified peculiar behaviors of the Josephson cryotrons based memory cells and studied the stability of their operation.

**Key words:** Josephson cryotron; logical element; the transition characteristics; transition process; process of commutation.

### REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

- [1] K.K. Likharev, V.K. Semenov., *IEEE Trans Appl Supercond* As-1: 3-28, (1991).
- [2] Q.P. Herr, A.Y. Herr, O.T. Oberg, and A.G. Ioannidis, *J. Appl. Phys.* **109**, 103903 (2011)
- [3] W. Kuo, C.S. Wu, J.H. Shyu, and C.D. Chen, *J. Appl. Phys.* **101**, 053903 (2007).
- [4] J.H. Kim, R.P. Dhungana, and K.S. Park, *Phys. Rev. B* **73**, 214506. (2006).
- [5] Y. Ilyin, A. Nijhuis and H.H.J. ten Kate, *Cryogenics*. Vol. 46. Is. 7-8. (2006).
- [6] Y. Mizugaki, Y. Namatame and M. Maezawa, *Supercond. Sci. Technol.* **20**, Is.11, (2007).
- [7] T. Van Duzer, *Fizicheskie osnovy sverhprovodjashhih ustrojstv*, Radio i svjaz', Moskva (1984).
- [8] M.V. Tyhanskyi, A.I. Partyka, *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, №4, (2007).
- [9] M.V. Tyhanskyi, A.I. Partyka, *Visnyk NU "Lvivska politekhnik"*, N646: Elektronika, (2009).
- [10] M.V. Tyhanskyi, A.I. Partyka, *Zhurnal «Jelektronika i svjaz'»*, Ч.2., №4-5, (2009).
- [11] R.R. Krysko, A.I. Partyka, M.V. Tyhanskyi, *Materialy VII ukrainsko-polskoi naukovopraktychnoi konferentsii «Elektronika ta informatsiini tekhnologii»*, Lviv, (2016).



- [12] M. Tyhanskyi, A. Partyka, and R. Krysko, "INCREASING THE SWITCHING RATE OF THE AND AND OR LOGICAL OPERATIONS BASED ON JOSEPHSON JUNCTIONS", *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, vol. 4, no. 4, pp. 32-43, Jun. 2019. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2019.4.3243>



This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.