



DOI 10.28925/2663-4023.2019.4.3243

УДК 621.382.323

Тиханський Михайло Васильович

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри захисту інформації
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
OrcID: 0000-0001-7283-0626
tytyvas@gmail.com

Партика Андрій Ігорович

кандидат технічних наук, старший викладач
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
OrcID: 0000-0003-3037-8373
andrijp14@gmail.com

Крисько Ростислав Романович

OrcID: 0000-0001-5624-1506
rostyslawk@gmail.com

ЗБІЛЬШЕННЯ ШВИДКОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ЛОГІКИ «І» ТА «АБО» НА ОСНОВІ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ КОНТАКТІВ

Анотація. Використання традиційних логічних елементів в цифровій електроніці забезпечувало багаторічний розвиток різноманітних електронних приладів та пристроїв. Паралельно проводяться дослідження та розробки логічних елементів на основі інших нетрадиційних фізичних явищ чи ефектів, зокрема логічних елементів на основі явища надпровідності, перспектива використання яких полягає в надмалому споживанні енергії та надвисокій швидкодії. Для надпровідникових логічних елементів використовують різноманітні джозефсонівські кріоелектронні структури, відомі як джозефсонівські кріотрони, в основі роботи яких лежить стаціонарний та нестаціонарний ефекти Джозефсона. На базі джозефсонівських кріотронів можна створювати і джозефсонівські елементи комп'ютерної пам'яті, і джозефсонівські елементи цифрової логіки. Основними вимогами до джозефсонівських кріотронів є стабільний режим роботи та висока швидкодія чи малий час комутації. Інформацію про режим роботи та швидкодію дають нам перехідні характеристики кріотронів – часові залежності напруги на кріотроні під час зміни його логічного стану, які можна отримати або експериментально, або розрахувати теоретично. Мета роботи полягає в пошуку способів збільшення швидкодії елементів цифрової логіки за рахунок використання структур, що працюють на інших принципах, ніж традиційні напівпровідникові схеми. Нами запропоновано принцип створення елементів цифрової логіки на базі джозефсонівських кріотронів, в основі роботи яких лежить стаціонарний та нестаціонарний ефекти Джозефсона. Описано принцип роботи цифрових логічних елементів «І» та «АБО», створених на основі тунельних джозефсонівських переходів «надпровідник - ізолятор - надпровідник». Створені математичні моделі процесів комутації в таких логічних елементах дозволили розрахувати їх перехідні характеристики під час зміни логічного стану і визначити основні параметри таких моделей. Показано, що реалізувати елементи цифрової логіки «І» та «АБО» можна на окремих джозефсонівських кріотронах і керувати їх логічним станом за допомогою керуючих вхідних сигналів у вигляді імпульсів струму. Такі логічні елементи задовольняють усі вимоги до цифрових елементів логіки і мають характерний час комутації 2 - 3 пс, що вказує на суттєве підвищення їх швидкодії.

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



1. ВСТУП

Використання традиційних логічних елементів в цифровій електроніці забезпечувало багаторічний розвиток різноманітних електронних приладів та пристроїв. Паралельно проводяться дослідження та розробки логічних елементів на основі інших нетрадиційних фізичних явищ чи ефектів, зокрема логічних елементів на основі явища надпровідності, перспектива використання яких полягає в надмалому споживанні енергії та надвисокій швидкодії [1-2]. Для надпровідникових логічних елементів використовують різноманітні джозефсонівські кріоелектронні структури, відомі як джозефсонівські кріотрони, в основі роботи яких лежить стаціонарний та нестаціонарний ефекти Джозефсона. На базі джозефсонівських кріотронів можна створювати і джозефсонівські елементи комп'ютерної пам'яті [3-6], і джозефсонівські елементи цифрової логіки [1-2].

Основними вимогами до джозефсонівських кріотронів є стабільний режим роботи та висока швидкодія чи малий час комутації. Інформацію про режим роботи та швидкодію дають нам перехідні характеристики кріотронів – часові залежності напруги на кріотроні під час зміни його логічного стану, які можна отримати або експериментально, або розрахувати теоретично.

Постановка проблеми. Нами було створено математичну модель перехідних процесів в джозефсонівських кріотронах – елементах пам'яті [7-8], запропоновано способи керування логічним станом таких елементів, розраховані їх перехідні характеристики під час зміни логічного стану, досліджено особливості перехідних характеристик, а також оцінено час комутації – характерний час, за який на кріотроні з'являється чи зникає напруга, коли його логічний стан міняється.

Мета статті. В цій роботі запропонована реалізація джозефсонівських логічних елементів “Г” та “АБО” і створено математичну модель перехідних процесів, що протікають в таких елементах логіки з метою отримання перехідних характеристик під час зміни логічного стану під дією керуючих сигналів у формі зовнішніх імпульсів електричного струму.

2. ПРИНЦИП РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ ЛОГІКИ “Г”

Логічний елемент “Г” запропоновано створити на основі джозефсонівського тунельного переходу (S-I-S джозефсонівського тунельного переходу), вольтамперна характеристика якого приведена на рис. 1. Принцип роботи логічного елемента “Г” полягає в наступному: коли сила струму I через тунельний перехід (контакт) є меншою за силу критичного струму I_c , напруга на ньому $V = 0$ внаслідок тунелювання куперівських пар, а якщо $I > I_c$, то бездисипативне тунелювання куперівських пар руйнується і на контакті виникає напруга $V \neq 0$, оскільки його ВАХ визначається одноелектронним тунелюванням носіїв заряду. Стану логічного “0” на ВАХ відповідає точка А, коли напруга на контакті $V = 0$. Для цього через елемент потрібно пропускати електричний струм I такої сили, щоб вона не перевищувала значення I_c . Вибираючи значення сили робочого струму I_p , треба виконати такі співвідношення $I < I_c$ чи $I_p < I_c$. Оскільки ми пропонуємо пропускати негативний робочий струм, тобто $I_p < 0$, то для виконання умови $V = 0$ треба, щоб $|I_p| < I_c$.

Керування логічним станом елемента логіки “І” здійснюється подачею двох керуючих сигналів у вигляді імпульсів струму, кожен з яких збільшує силу струму I на величину ΔI . Коли елемент перебуває в початковому логічному стані “0” і на нього подати тільки один керуючий сигнал, сила загального струму I збільшиться на величину ΔI і досягне значення $I = I_p + \Delta I$, яке не зможе перевищити силу критичного струму I_c (точка В). Напруга на елементі не зміниться і дорівнюватиме нулю, тобто стан логічного “0” збережеться.

Коли дія керуючого сигналу припиниться, сила загального струму I повернеться до свого початкового значення I_p (точка А) і елемент далі залишатиметься в стані логічного “0”. Точки А та В на вольтамперній характеристиці відповідають

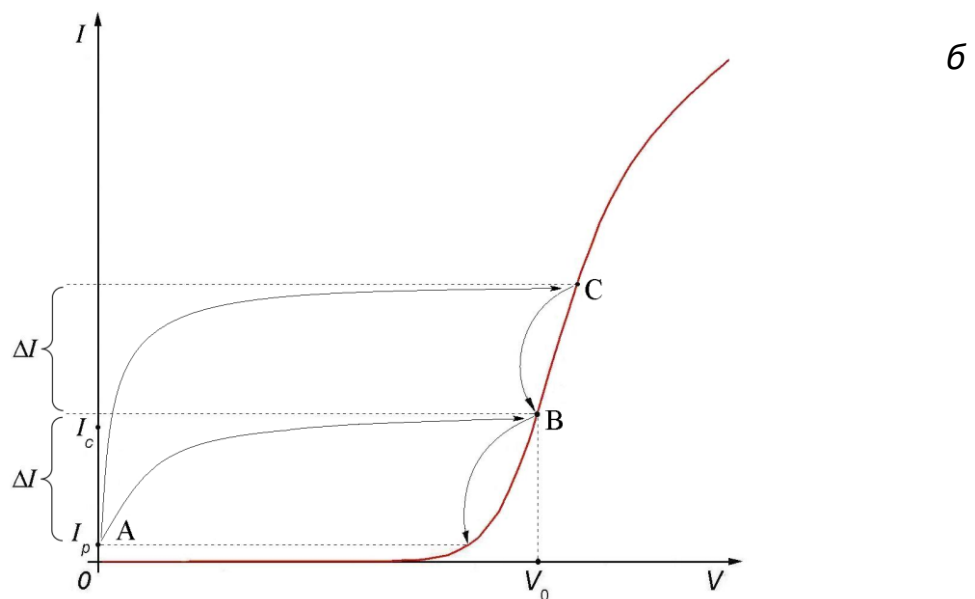
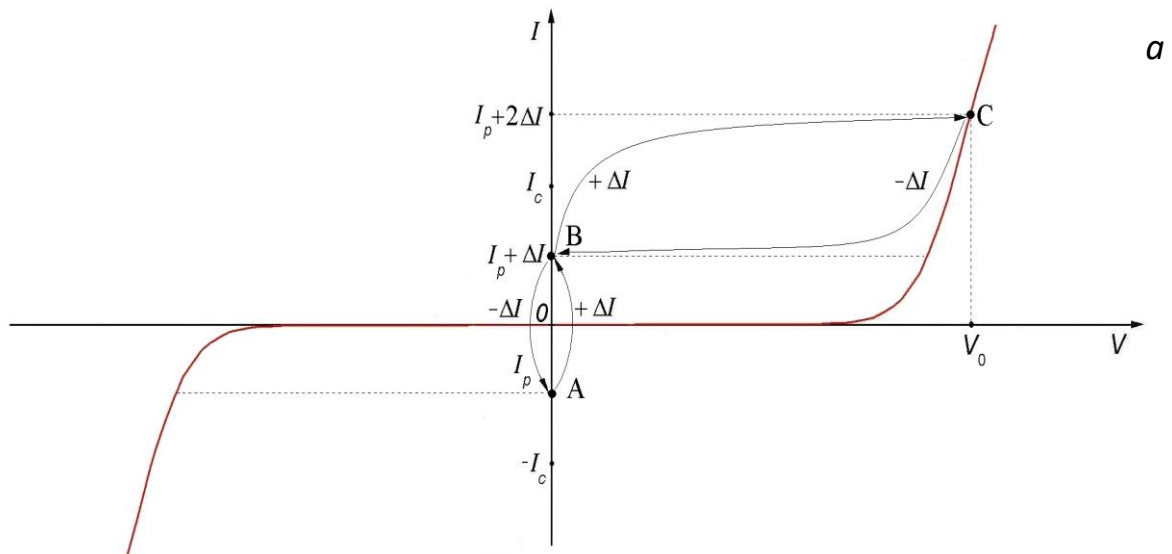


Рис. 1. ВАХ джозефсонівського S-I-S тунельного переходу та схема керування логічним станом елемента логіки “І” (а) та елемента логіки “АБО” (б) сигналами у вигляді імпульсів електричного струму

стану логічного “0”, бо для обидвох випадків сила загального струму $|I|$ менша за силу критичного струму I_c , а напруга на елементі $V = 0$.

Щоб перевести логічний елемент “1” із стану логічного “0” в стан логічної “1”, потрібно на елемент одночасно подати два керуючі сигнали, внаслідок чого сила загального струму зростає до величини $I = I_p + 2\Delta I$ і перевищить силу критичного струму I_c . В наслідок цього бездисипативне тунелювання куперівських пар буде зруйнованим і на елементі з’явиться ненульова напруга $V \approx V_0$ (точка С). Коли через деякий проміжок часу дія хоча б одного керуючого сигналу припиниться, то сила загального струму I понизиться до величини $I_p + \Delta I$, що є меншим за силу критичного струму I_c , то елемент повернеться у стан логічного “0” (точка В), тобто матиме місце логічний перехід “1”→”0”. Після припинення дії обидвох керуючих сигналів сила загального струму I понизиться до сили робочого струму I_p (точка А) і елемент залишатиметься в стані логічного “0”.

3. ПРИНЦИП РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ ЛОГІКИ “ АБО ”

Джозефсонівські логічні елементи “АБО” також можуть бути створені на основі тунельного переходу «надпровідник-ізолятор-надпровідник». Принцип роботи такого елемента можна пояснити за допомогою схеми з використанням вольтамперної характеристики S-I-S джозефсонівського тунельного контакту, яка приведена на рис. 1б. Коли сила струму I через контакт є меншою за силу критичного струму I_c , напруга на ньому $V = 0$ внаслідок тунелювання куперівських пар, а якщо $I > I_c$, то тунелювання пар руйнується, що призводить до появи деякої напруги, тобто $V \neq 0$, оскільки ВАХ визначається одноелектронним тунелюванням носіїв заряду через потенціальний бар’єр.

В точці А сила струму через елемент I дорівнює силі робочого струму I_p , а напруга на елементі $V = 0$, бо $I_p < I_c$, можна реалізувати стан логічного “0”. Стан логічної “1” реалізовано в точках В і С, де $I > I_c$, а напруга на елементі є ненульовою. Коли на елемент подається керуючий сигнал у вигляді одного чи двох імпульсів струму $+\Delta I$, внаслідок чого загальний струм ($I = I_p + \Delta I$ або $I = I_p + 2\Delta I$) перевищить значення критичного струму I_c і тунельний контакт перейде в резистивний стан, здійсниться логічний перехід “0”→”1”. На елементі з’явиться напруга $V \approx V_0$ (точка В чи С) і він перейде у стабільний стан логічної “1”. Коли припиниться дія одного з двох керуючих сигналів, а інший діятиме далі, сила загального струму I понизиться до величини $I_p + \Delta I$ (точка В), яка є більшою за силу критичного струму I_c . В цьому випадку елемент не повернеться в стан логічного “0”, а залишатиметься в стабільному стані логічної “1”. Коли припиниться дія обидвох керуючих сигналів, сила загального струму I понизиться до значення сили робочого струму I_p , яке є меншим за силу критичного струму I_c , елемент повинен повернутись у стан логічного “0” (точка А), тобто повинен мати місце логічний перехід “1”→”0”.

4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ “1” ТА “АБО”

За основу математичної моделі перехідних процесів (процесів комутації) в джозефсонівських логічних елементах було взято диференціальне рівняння, яке використовувалось для моделювання перехідних процесів і розрахунків перехідних характеристик джозефсонівських елементів пам'яті [9]:

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

де $I(t)$ – сила струму, що протікає через елемент, I_c – сила критичного струму, C – ємність джозефсонівського тунельного переходу, $G(V)$ – провідність переходу в разі одноелектронного тунелювання (в загальному випадку провідність G залежить від напруги V), \hbar – стала Планка, e – заряд електрона, $\varphi(t)$ – невідома функція, яка описує часову залежність різниці фаз хвильових функцій надпровідників з обох боків від тунельного бар'єру (стрибок фази). Якщо розрахувати функцію $\varphi(t)$ і використати відоме співвідношення для нестационарного ефекту Джозефсона:

$$V(t) = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{\hbar}{2e} \varphi', \quad (2)$$

то можна отримати перехідну характеристику логічного елемента $V(t)$, яка містить всю інформацію про перехідні процеси, дозволяє визначати час комутації для логічних переходів “0” → “1” чи “1” → “0” і вказує на стабільність чи нестабільність режиму роботи.

Для встановлення початкових умов для рівняння (1) ми вважали, що в початковий момент часу ($t = 0$) логічні елементи перебували у стані “0” (точка А), сила струму $I = I_p$, а напруга $V = 0$. Якщо $V = 0$, то згідно з формулою (2), $\varphi'(0) = 0$. Залежність нормальної провідності тунельного переходу від напруги $G(V)$ на основі формули (2) замінювали на функцію $G(\varphi')$, яку визначали з вольтамперної характеристики тунельного переходу $I(V)$ в режимі одноелектронного тунелювання. Робочою температурою елементів логіки було вибрано температуру кипіння гелію $T = 4,2$ К, для якої було розраховано вольтамперну характеристику, а розраховану ВАХ апроксимовано простою математичною функцією [10]

$$I(V) = G_0 \cdot \left[0,933 \cdot V - \frac{0,878 \cdot V}{1 + (0,054 \cdot V)^{15,5}} \right], \quad (3)$$

де G_0 – нормальна провідність - параметр, значення якого змінювали під час моделювання.

Для моделювання подачі керуючих сигналів у формі зовнішніх імпульсів струму на логічні елементи, використовувалась така часова залежність сили струму:

$$I_{nm}(t) = \begin{cases} \Delta I \exp\left(-\frac{(t-t_{nm})^4}{t_0^4}\right), & t \leq t_{nm} \\ \Delta I, & t_{nm} \leq t \leq (t_{nm} + \tau) \\ \Delta I \exp\left(-\frac{[t-(t_{nm} + \tau)]^4}{t_0^4}\right), & t \geq t_{nm} \end{cases}, \quad (4)$$

де n – номер сигналу, що подається на логічний елемент (число n може приймати значення 1 або 2), m – номер імпульсу струму в першому чи другому сигналі (число $m = 1; 2; 3; \dots$), ΔI – амплітуда керуючих імпульсів струму, t_0 – середній час наростання чи спадання імпульсів струму, t_{nm} – момент часу, коли на логічний елемент подавали n – сигнал m – імпульс струму, τ – тривалість імпульсів струму. Моментом подачі сигналів на логічний елемент вважали той момент часу, коли сила струму в імпульсі досягла максимального значення ΔI . Сила загального струму $I(t)$, який протікав через логічний елемент, задавалась як сума сили робочого струму I_p , сили імпульсів струму першого сигналу $I_{1m}(t)$ та сили імпульсів струму другого сигналу $I_{2m}(t)$:

$$I(t) = I_p + I_{1m}(t) + I_{2m}(t). \quad (5)$$

Моделювання процесів комутації та отримання перехідних характеристик логічних елементів $V(t)$ полягало в розв'язуванні методом Рунге-Кутта складеного нами диференціальне рівняння:

$$I_p + I_{1m}(t) + I_{2m}(t) = \frac{C\hbar}{2e} \varphi'' + \left[0,933(\alpha\varphi') - \frac{0,878(\alpha\varphi')}{1 + (0,054\alpha\varphi')^{15,5}} \right] \cdot G + (I_c) \sin \varphi. \quad (6)$$

5. ПЕРЕХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Для моделювання перехідних процесів в логічних елементах “І” та “АБО” і для розрахунків їх перехідних характеристик використали створену математичну модель. Основними параметрами моделі були як фізичні характеристики кріотронів (сила критичного струму I_c , ємність джозефсонівського тунельного переходу C і нормальна провідність переходу G_0), так і параметри керуючих сигналів (сила робочого струму I_p , амплітуда керуючих імпульсів струму ΔI і тривалість імпульсів струму τ). Всі наведені вище параметри моделі та їх комбінації суттєво впливали на розраховані перехідні характеристики $V(t)$. Комбінації наугад встановлених параметрів не забезпечували стабільний режим роботи логічних елементів: дія керуючих сигналів або не призводила до логічного переходу “0” → “1” або не повертала елемент із стану “1” в стан “0”. Методом підбору нами встановлювались такі параметри моделі, за яких можна було би моделювати роботу логічних елементів у стабільному режимі, а потім параметри змінювались так, щоб режим роботи зберігався стабільним, а час комутації зменшувався би, тобто зростала швидкодія елементів. В результаті ми отримували як діапазони параметрів моделі за стабільного режиму роботи, так і значення параметрів, за яких швидкодія елементів могла би бути максимальною.

Для логічного елемента “І” параметри моделі, за яких режим роботи був стабільним, а швидкодія – максимальною, встановлені такі: сила критичного струму $I_c = 9$ мкА, ємність джозефсонівського тунельного переходу $C = 0,58 \cdot 10^{-4}$ пФ, нормальна провідність переходу $G_0 = 0,94 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹, сила робочого струму $I_p = -4$ мкА, амплітуда керуючих імпульсів струму $\Delta I = 9$ мкА. Тривалість імпульсів струму τ суттєво на перехідні характеристики не впливала, крім випадків, коли $\tau < 10$ пс, тому було задано, що $\tau = 20$ пс. Результати моделювання процесів комутації в логічному елементі

“1” та розраховані його перехідні характеристики приведено на рис. 2. Для зручності ми приводимо нормовані перехідні характеристики $V(t)/V_0$, де V_0 – напруга на елементі в стані логічної “1”.

Моделювання полягало в подачі в різні моменти часу на логічний елемент “1” обидвох керуючих сигналів у вигляді імпульсів електричного струму. На проміжку часу $0 \leq t \leq 40$ пс на елемент керуючі сигнали не діяли, сила загального струму $I(t)$ визначалась силою робочого струму $I_p = -4$ мкА, який за абсолютною величиною є меншим за силу критичного струму $I_c = 9$ мкА. Тому елемент залишався в початковому стані логічного “0”, а напруга на ньому $V(t) = 0$ (рис. 2г). В моменти часу $t = 40$ пс та $t = 80$ пс на елемент подавались окремо імпульси першого керуючого сигналу $I_1(t)$ (рис. 2а) та другого керуючого сигналу $I_2(t)$ (рис. 2б) відповідно. Амплітуда кожного імпульсу $\Delta I = 8$ мкА. Сила загального струму ($I(t) = I_p + \Delta I = 4$ мкА) не перевищувала значення критичного струму $I_c = 9$ мкА. На рис. 2г видно, що в обох випадках на елементі виникали імпульси напруги, але їх амплітуда була настільки малою, що логічний елемент не змінював свого логічного стану і залишався в початковому логічному стані “0”. Аналогічні імпульси напруги виникали на елементі і моменти часу $t = 60$ пс та $t = 100$ пс, коли припинялась дія керуючих сигналів, але їхня полярність була іншою.

В момент часу $t = 120$ пс подавались одночасно перший керуючий сигнал $I_1(t)$ та другий керуючий сигнал $I_2(t)$ амплітудою $\Delta I = 8$ мкА. Сила загального струму на логічному елементі $I(t)$ зросла до величини $I_p + 2\Delta I = 12$ мкА (рис. 2в), тобто сила загального струму в елементі перевищила рівень критичного струму I_c , тому на елементі появилася напруга $V(t) = V_0$ чи $V(t)/V_0 = 1$. Логічний елемент змінив свій стан і перейшов в стан логічної “1”, тобто відбувся логічний перехід “0” → “1”, що видно на нормованій перехідній характеристиці $V(t)/V_0$. Через проміжок часу $\tau = 20$ пс дія обидвох керуючих сигналів припинилася, сила загального струму $I(t)$ повернулася до рівня робочого струму $I_p = -4$ мкА, внаслідок чого стало виконуватись співвідношення $|I_p| < I_c$. Це призвело до відновлення надпровідного тунелювання куперівський пар і на логічному елементі встановилася напруга $V(t) = 0$; елемент повернувся в стан логічного “0”, тобто відбувся логічний перехід “1” → “0”.

Для перевірки правильності нашої моделі та принципу роботи логічних елементів “1” ми змодельовали ситуацію, коли керуючі сигнали подавались не одночасно, а діяли одночасно тільки протягом деякого проміжку часу. В момент часу $t = 160$ пс на елемент подали імпульс першого сигналу (рис. 2а). З деякою затримкою в момент часу $t = 170$ пс, коли на елемент вже діяв перший керуючий сигнал $I_1(t)$ амплітудою $\Delta I = 8$ мкА і сила загального струму становила $I(t) = I_p + \Delta I = 4$ мкА, було подано другий керуючий сигнал $I_2(t)$ амплітудою $\Delta I = 8$ мкА (рис. 2б). Сила загального струму $I(t)$ в елементі стала рівною $I_p + 2\Delta I = 12$ мкА і перевищила значення критичного струму I_c , тому на елементі встановилася напруга $V(t) = V_0$, логічний елемент перейшов в стан логічної “1” (рис. 2г). В момент часу $t = 180$ пс дія першого керуючого сигналу припинилася, сила загального струму $I(t)$ стала рівною

$I_p + \Delta I = 4$ мкА, що є меншим за значення критичного струму I_c . Елемент повернувся із стану логічної “1” в стан логічного “0”, що видно на нормованій перехідній характеристиці $V(t)/V_0$ (рис. 2г).

Для оцінки швидкодії елементів, визначення часу комутації та дослідження особливостей протікання процесів комутації під час логічних переходів “0” → “1” і “1” → “0” були отримані перехідні характеристики в іншому часовому масштабі. На рис. 2е приведено нормовану перехідну характеристику $V(t)/V_0$ для логічного елемента “Г”, яка описує подвійну зміну логічного стану “0” → “1” → “0”, коли на елемент діяли одночасно імпульси струму обидвох керуючих сигналів. Видно, що під час логічного переходу “0” → “1” і логічного переходу “1” → “0” на фоні зміни напруги мали місце згасаючі коливання напруги. Коливання напруги збільшували час комутації Δt , їх можна розглядати як негативний фактор з точки зору ефективності роботи логічних елементів, але як було встановлено для джозефсонівських елементів пам’яті [11], такі коливання напруги є і позитивним фактором, бо їх усунення погіршує стабільність роботи. Використовуючи отриману перехідну характеристику, ми оцінили час комутації $\Delta t_{01} \approx 2$ пс для логічних переходів “0” → “1”. Для логічних переходів “1” → “0” час комутації Δt_{10} був приблизно таким самим і дорівнював $\Delta t_{10} \approx 2$ пс. Приблизна рівність часів комутації Δt_{01} і Δt_{10} була отримана тільки для джозефсонівських елементів логіки, в той час як для джозефсонівських елементів пам’яті [12,13] час комутації Δt_{10} був у 5 – 10 разів більшим за Δt_{01} . В роботі [11] є пояснення таких результатів. Отриманий результат, що для логічних елементів “Г” Δt_{01} приблизно рівне Δt_{10} , ми пояснити не можемо.

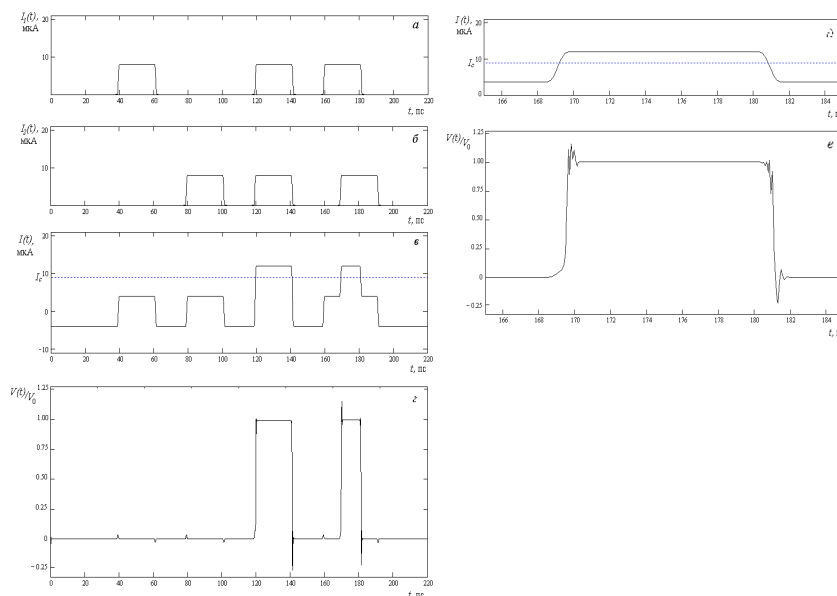


Рис. 2. Перехідні характеристики логічного елемента “Г”: часова залежність сили струму для першого керуючого сигналу (а), часова залежність сили струму для другого керуючого сигналу (б), часова залежність сили загального струму (в), нормована перехідна характеристика (г), фрагменти кривих $I(t)$ (д) та $V(t)/V_0$ (е) в розширеному часовому масштабі

Для логічного елемента “АБО” параметри моделі, за яких його режим роботи був стабільним, а час комутації – мінімальним, встановлені такі: сила критичного струму $I_c = 18$ мкА, ємність джоєфсонівського тунельного переходу $C = 0,75 \cdot 10^{-4}$ пФ, нормаль-на провідність переходу $G_0 = 0,52 \cdot 10^{-3}$ Ом $^{-1}$, сила робочого струму $I_p = 2$ мкА, амплітуда керуючих імпульсів струму $\Delta I = 18$ мкА. Тривалість імпульсів струму $\tau = 50$ пс. Результати моделювання процесів комутації в логічному елементі “АБО” та розраховані його перехідні характеристики приведені на рис. 3. До моменту часу $t = 50$ пс на елемент не подавалось жодного керуючого сигналу, сила загального струму $I(t)$ дорівнювала силі робочого струму $I_p = 2$ мкА, який є меншим за силу критичного струму $I_c = 18$ мкА, тому елемент перебував в стані логічного “0”, а напруга на ньому $V(t) = 0$.

В момент часу $t = 50$ пс на елемент подано перший імпульс першого керуючого сигналу $I_1(t)$ амплітудою $\Delta I = 18$ мкА (рис. 3а), а другий керуючий сигнал $I_2(t)$ відсутній (рис. 4б). Сила загального струму $I(t)$ стала рівною $I_p + \Delta I = 20$ мкА і перевищила значення I_c (рис. 3в), тому на елементі появилась напруга $V(t) = V_0$ чи $V(t)/V_0 = 1$. Внаслідок того елемент перейшов в стан логічної “1”, що видно на нормованій перехідній характеристиці $V(t)/V_0$ (рис. 3г). В момент часу $t = 100$ пс припинилась дія першого керуючого сигналу, елемент повернувся із стану логічної “1” в стан логічного “0”, що видно на перехідній характеристиці. Аналогічну поведінку проявляв логічний елемент “АБО” на проміжку часу $150 \leq t \leq 200$ пс, коли на нього діяв імпульс тільки одного другого керуючого сигналу $I_2(t)$ (рис. 3б), а сила струму першого керуючого сигналу $I_1(t) = 0$.

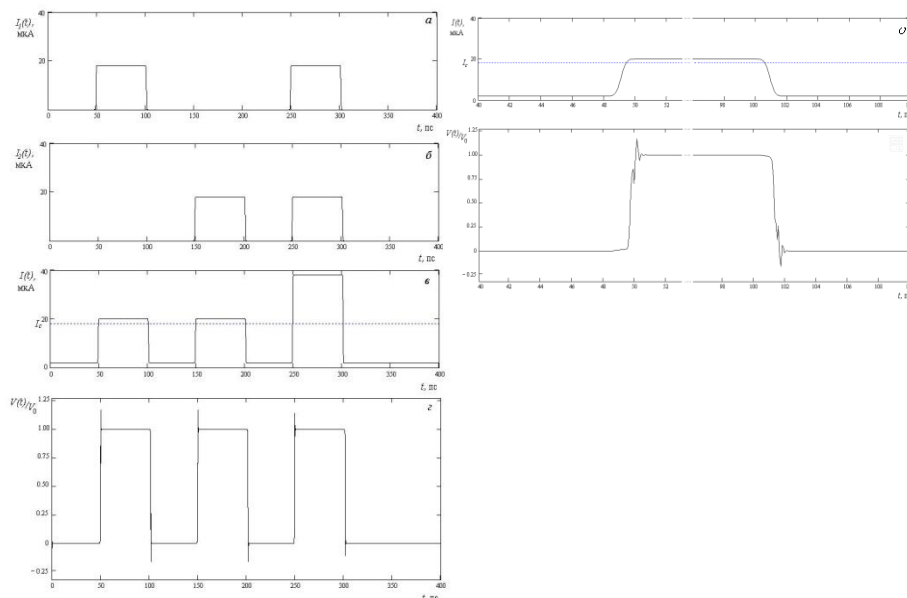


Рис. 3. Перехідні характеристики логічного елемента “АБО”: часова залежність сили струму для першого керуючого сигналу (а), часова залежність сили струму для другого керуючого сигналу (б), часова залежність сили загального струму (в), нормована перехідна характеристика (г), фрагменти кривих $I(t)$ (д) та $V(t)/V_0$ (е) в розширеному часовому масштабі



В момент часу $t = 250$ пс на елемент одночасно подано два керуючих сигнали: другий імпульс першого сигналу та другий імпульс другого сигналу (рис. 3а і 3б). Амплітуда кожного імпульсу струму $\Delta I = 18$ мкА, тому сила загального струму $I(t) = I_p + 2\Delta I = 38$ мкА. Незважаючи на те, що сила загального струму $I(t)$ була майже у два рази більшою за силу струму у двох попередніх випадках, як показали результати моделювання (рис. 3г), напруга на логічному елементі також була рівною V_0 . Така напруга на елементі відповідає стану логічної "1". Коли дія обох сигналів припинилась в момент часу $t = 300$ пс, логічний елемент повернувся в стан логічного "0". Така поведінка логічного елемента відповідає стабільному режиму роботи елементів логіки "АБО".

Для оцінки швидкодії елементів "АБО" та дослідження особливостей протікання процесів комутації під час логічних переходів "0" \rightarrow "1" і "1" \rightarrow "0" були отримані перехідні характеристики в іншому часовому масштабі. На рис. 3е приведено нормовану перехідну характеристику логічного елемента $V(t)/V_0$, розраховану під час подачі першого імпульсу першого керуючого сигналу. Видно, що як і у випадку логічних елементів "І" зміна логічного стану супроводжувалась згасаючими коливаннями напруги. Оцінено, що час комутації $\Delta t_{01} \approx 2,5$ пс для логічних переходів "0" \rightarrow "1", а для переходів "1" \rightarrow "0" $\Delta t_{10} \approx 2$ пс.

6. ВИСНОВКИ

Створено математичну модель перехідних процесів в логічних елементах "І" та "АБО", які можна реалізувати на основі джозефсонівських тунельних переходів. Встановлені оптимальні параметри моделі та розраховані перехідні характеристики логічних елементів "І" та "АБО", які описують їх поведінку під час зміни логічного стану внаслідок логічних переходів "0" - "1" та "1" - "0". Показано, що керування станом логічних елементів "І" та "АБО" внаслідок дії керуючих сигналів у вигляді імпульсів електричного струму задовольняє всі вимоги, які повинні виконуватись в таких елементах логіки, і елементи можуть працювати в стабільному режимі. Оцінено час комутації логічних елементів "І" та "АБО" та отримано, що час комутації може складати 2-3 пс, що говорить про їх високу швидкодію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [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. Pyin, 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. Москва: Радио и связь, 1984.
- [8] A. Partyka, M. Tyhanskyi, Superconductivity and Novel Magnetism, DOI: 10.1007/s10948-010-0925-3.
- [9] М. Тиханський та А. Партика, Sensor Electronics and Microsystem Technologies, №4, 2007.
- [10] М. Тиханський, Ф. Шуригін та К. Тиханська, Вісник НУ «Львівська політехніка», Електроніка, № 482, 2003.
- [11] М. Тиханський та А. Партика, Вісник НУ "Львівська політехніка", Електроніка, № 646, 2009.
- [12] М. Тиханський та А. Партика, Електроніка и связь, №4-5, 2009.
- [13] Р. Крисько, А. Партика та М. Тиханський, Матеріали VII українсько-польської науково-практичної конференції «Електроніка та інформаційні технології», Львів, 2016.

**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

Rostyslaw R. Krysko

OrcID: 0000-0001-5624-1506
rostyslawk@gmail.com

INCREASING THE SWITCHING RATE OF THE AND AND OR LOGICAL OPERATIONS BASED ON JOSEPHSON JUNCTIONS

Abstract. Using of traditional logic elements in digital electronics has ensured the development of a wide range of electronic devices for many years. In parallel, research and development of logical elements are carried out on the basis of other non-traditional physical phenomena or effects, in particular logic elements based on the phenomenon of superconductivity, the prospect of which is the use of very small energy consumption and ultrahigh performance. For superconducting logic elements, using various Josephson cryoelectronic structures, known as Josephson cryotrons, based on the stationary and non-stationary effects of Josephson. On the basis of the Josephson cryotrons, one can create Josephson elements of computer memory, and Josephson elements of digital logic. The main requirements for the Josephson cryotrons are a stable operating mode and high speed or short switching time. Information about the mode of operation and the speed give us the transition characteristics of the cryotrons - the time dependence of the voltage on the cryotron while changing its logical state, which can be obtained either experimentally, or theoretically. This work aims at a search for new ways of increasing the switching rate of digital logical operators by employing physical structures other than the traditional semiconductor-based schemes. We propose the principles of designing digital logical operators based on Josephson cryotrons, whose operation utilizes the stationary and dynamical Josephson effects, and describe the operational principles of the logical elements "AND" and "OR" bases on tunneling Josephson junctions "superconductor-insulator-superconductor". Our proposed mathematical models for the commutation processes in such logical elements allowed us to calculate their transition characteristics during the switching and to determine the main parameters in such models. It was shown that the logical elements "AND" and "OR" can be implemented on individual cryotrons and that their logical state can be controlled by input signals in a form of current pulses. Such logical elements meet all the requirements for digital logical elements and have switching time of about 2-3 ps, which indicates their significantly increased switching rate.

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

REFERENCES

- [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, [Physical bases of superconducting devices], Moskva: Radio i svjaz' (1984).
- [8] A. Partyka, M. Tyhanskyi, Superconductivity and Novel Magnetism, DOI: 10.1007/s10948-010-0925-3.
- [9] M. Tyhanskyi and A. Partyka, Sensor Electronics and Microsystem Technologies, №4, 2007.
- [10] M. Tyhanskyi, F. Shuryhin and K. Tyhanska, Visnyk NU «Lvivska politehnika», Elektronika, №482, 2003.
- [11] M. Tyhanskyi and A. Partyka, Visnyk NU «Lvivska politehnika», Elektronika, № 646, 2009.
- [12] M. Tyhanskyi and A. Partyka, Jelektronika i svjaz', №4-5, 2009.
- [13] R. Krysko, A. Partyka and M. Tyhanskyi, Materialy VII ukraïnsko-polskoi naukovy-praktychnoi konferentsii «Elektronika ta informatsiini tekhnolohii», Lviv, 2016



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