

УДК 621.382.323

М.В. Тиханський, Р.Р. Крисько
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра напівпровідникової електроніки

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ КЕРУЮЧИХ ІМПУЛЬСІВ НА СТАБІЛЬНІСТЬ РОБОТИ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛОГІКИ “НЕ”

© Тиханський М.В., Крисько Р.Р., 2012

M.V. Tyhanskyi, R.R. Krysko

THE INFLUENCE OF THE CONTROLLING PULSES' PARAMETERS ON THE OPERATIONAL STABILITY OF JOSEPHSON LOGICAL ELEMENTS “NOT”

© Tyhanskyi M.V., Krysko R.R., 2012

Запропоновано схему та принцип роботи цифрових логічних елементів “НЕ” на основі джозефсонівських кріотронів. Керування логічним станом таких елементів логіки здійснювалось за допомогою зовнішніх імпульсів магнітного потоку. Створено математичну модель перехідних процесів у джозефсонівських логічних елементах “НЕ” під час зміни їх логічного стану під дією керуючих сигналів та розраховано перехідні характеристики. Досліджено вплив параметрів імпульсів керуючих сигналів на швидкість та стабільність роботи таких елементів логіки та оцінено час комутації для логічних переходів “1”→“0” та “0”→“1”.

Ключові слова: логічний елемент, джозефсонівський логічний елемент, перехідний процес, перехідна характеристика, логічний перехід, час комутації.

The scheme and the operational principle of digital logical elements “NOT” based on Josephson cryotrons were proposed in the given work. The control of the logical state of such logical elements was realized by means of external magnetic flux pulses. We developed a mathematical model of the transition processes in Josephson logical elements „NOT“ during the change of their logical state induced by controlling signals and calculated respective transition characteristics. We studied the influence of the controlling pulses' parameters on the operational speed and stability of these logical elements and estimated the commutation time for logical transitions “1”→“0” and “0”→“1”.

Key words: logical element, Josephson logical element, transition process, transition characteristic, logical transition, commutation time.

Вступ

Сучасні елементи цифрової логіки створені на основі напівпровідникових гетероструктур. Для збільшення їх швидкодії та покращення функціональних характеристик ведуться дослідження та розробки таких логічних елементів, принцип роботи яких базується на основі інших фізичних явищ. Одними з найперспективніших є логічні елементи на основі джозефсонівських кріотронів – джозефсонівські елементи логіки [1–4]. Проте в таких логічних елементах для здійснення логічних операцій використовується або декілька джозефсонівських тунельних переходів або СКВІДи, що ускладнює їх конструкцію та погіршує функціональні характеристики. Ми пропонуємо схему та

принцип роботи джозефсонівського логічного елемента, базою якого є окремий джозефсонівський тунельний перехід (ДТП), зокрема запропоновано схему логічного елемента "НЕ" на базі окремого ДТП, керування логічним станом якого можна здійснювати керуючими сигналами, які трансформовані в імпульси магнітного потоку.

Основними вимогами до всіх логічних елементів є стабільний режим роботи та висока швидкодія (малий час комутації). Інформацію про режим роботи та швидкодію можна отримати з їх перехідних характеристик (часових залежностей напруги на елементі під час зміни його логічного стану), визначених експериментально чи розрахованих теоретично. У попередніх роботах [5, 6] було створено математичну модель перехідних процесів в джозефсонівських логічних елементах "І" та "АБО". У цій роботі створено математичну модель перехідних процесів в джозефсонівських елементах логіки "НЕ" з метою отримання перехідних характеристик та доведення можливості ефективного функціонування запропонованих елементів логіки "НЕ" на основі окремих ДТП. Також досліджено вплив параметрів керуючих сигналів у формі імпульсів магнітного потоку на перехідні характеристики джозефсонівських логічних елементів "НЕ", їх швидкодію та стабільність режиму роботи.

Принцип роботи джозефсонівських елементів логіки "НЕ"

Запропонований принцип роботи джозефсонівських логічних елементів "НЕ" на базі окремих ДТП можна пояснити, використовуючи вольтамперну характеристику ДТП (рис. 1а) та залежність сили критичного струму ДТП I_c від магнітного потоку F (рис. 1б). Залежність сили критичного струму від магнітного потоку $I_c(F)$ описується загальновідомою формулою:

$$I_c(F) = I_c(0) \left| \frac{\sin \frac{pF}{F_0}}{\frac{pF}{F_0}} \right|, \quad (1)$$

де $I_c(0)$ – сила критичного струму у разі $F = 0$, F_0 – квант магнітного потоку. Робочою ділянкою на залежності $I_c(F)$ вибрано ділянку $F_0 < F < 1,5F_0$, де збільшення магнітного потоку F призводить до збільшення сили критичного струму I_c . Силу робочого струму I_p , який повинен протікати через джозефсонівський тунельний перехід (рис. 2), вибирають так, щоб його величина становила приблизно половину від сили струму $I_c(1,5F_0)$.

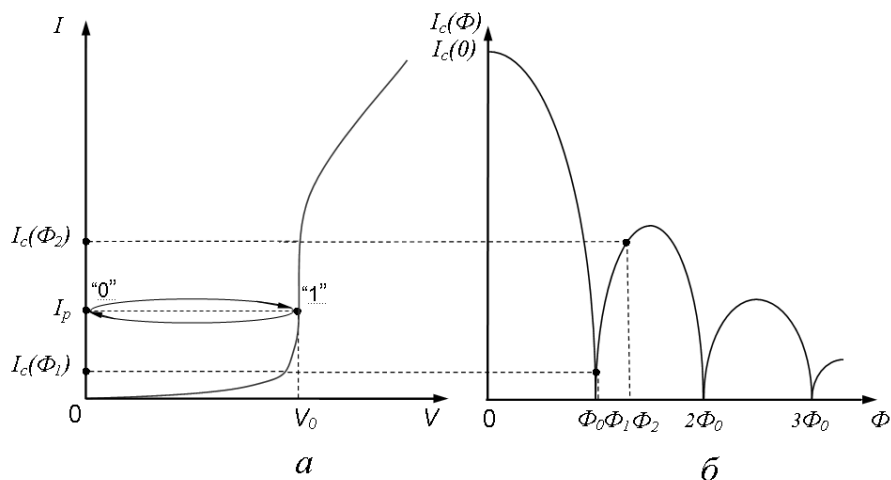


Рис. 1. ВАХ джозефсонівського тунельного переходу (а) та залежність сили критичного струму ДТП від магнітного потоку (б)

Початковим логічним станом для елемента “НЕ” є стан логічної “1”, тобто вихідний сигнал у вигляді напруги на елементі $V(t) = V_0$, коли вхідний сигнал у формі імпульсу струму $I(t)$ відсутній. Для реалізації початкового логічного стану “1” через надпровідну доріжку, яка розташована в безпосередній близькості до джозефсонівського тунельного переходу (рис. 2), потрібно пропускати постійний струм I_0 такої сили, щоб протікання цього струму призвело до виникнення в області ДТП магнітного потоку F_1 . Магнітний потік F_1 зменшить силу критичного струму ДТП до величини $I_c(F_1)$. Якщо виконуватиметься умова $I_c(F_1) < I_p$, то тунелювання куперівських пар у ДТП буде зруйнованим, на логічному елементі встановиться напруга V_0 , тобто елемент перебуватиме в стані логічної “1”. Як видно з рис. 1б, таких ділянок на кривій $I_c(F)$, де збільшення магнітного потоку F призводить до збільшення сили критичного струму I_c , є декілька, наприклад $2F_0 < F < 2,5F_0$, $3F_0 < F < 3,5F_0$. Вибір першої ділянки пояснюється двома причинами: по-перше, для встановлення початкового логічного стану “1” потрібно пропускати струм I_0 мінімальної сили; по-друге, чутливість критичного струму до зміни магнітного потоку на цій ділянці є максимальною.

Для того, щоб перевести логічний елемент “НЕ” із стану “1” в стан “0”, тобто здійснити логічний перехід “1” → “0”, потрібно подати вхідний керуючий сигнал у формі імпульсу струму $I(t)$, який протікатиме по тій самій надпровідній доріжці, по якій протікає постійний струм I_0 (рис. 2). Коли сила струму $I(t)$ досягне свого максимального значення, в області джозефсонівського тунельного переходу виникне магнітний потік F_2 , який збільшить силу критичного струму до величини $I_c(F_2)$. Якщо сила робочого струму I_p стане меншою за силу критичного струму $I_c(F_2)$, в ДТП відновиться надпровідне тунелювання куперівських пар. Вихідний сигнал у формі напруги $V(t)$ на логічному елементі з плином часу зникне, тобто $V(t) = 0$, а логічний елемент перейде в стан “0”. Зрозуміло, що припинення дії вхідного керуючого сигналу призведе до логічного переходу “0” → “1” і повернення елемента логіки “НЕ” в початковий логічний стан “1”.

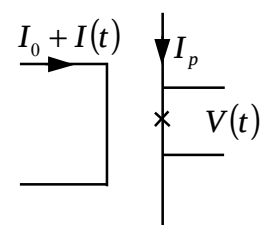


Рис. 2. Схема джозефсонівського логічного елемента “НЕ”

Математична модель перехідних процесів в джозефсонівських логічних елементах “НЕ”

Для моделювання і дослідження перехідних процесів в елементах логіки “НЕ” на основі окремих ДТП створено математичну модель, в основі якої лежить загальновідоме диференціальне рівняння:

$$I_p = I_c \sin j + \frac{Ch}{2e} \frac{d^2 j}{dt^2} + \frac{G(V)h}{2e} \frac{dj}{dt}, \quad (2)$$

де I_p – сила робочого струму в ДТП, I_c – сила критичного струму ДТП, C – ємність тунельного переходу, $G(V)$ – нормальна провідність тунельного переходу у разі одноелектронного тунелювання, яка в загальному випадку залежить від напруги на ДТП V , h – стала Планка, e – заряд електрона, $j(t)$ – функція, яка описує часову залежність різниці фаз хвильових функцій надпровідників. Функція $j(t)$ є невідомою функцією для диференціального рівняння (2). Визначивши функцію $j(t)$ та використавши відоме співвідношення для нестационарного ефекту Джозефсона:

$$V(t) = \frac{h}{2e} \frac{dj}{dt} = \frac{h}{2e} j', \quad (3)$$

ми визначали часову залежність напруги на елементі $V(t)$ під час зміни його логічного стану – перехідну характеристику логічного елемента.

Початковими умовами для розв'язків рівняння (2) були: $t = 0$ і $V = V_0$. Залежність нормальної провідності ДТП від напруги $G(V)$ на основі формули (3) замінювалась на функцію $G(j')$, яка визначалась із вольтамперної характеристики при одноелектронному тунелюванні носіїв заряду. Для робочої температури логічного елемента $T = 4,2$ К вольтамперна характеристика ДТП $I(V)$ апроксимована простою математичною функцією [7]

$$I(V) = G_0 \cdot \left[0,933 \cdot V - \frac{0,001^1 \cdot 0,878 \cdot V}{1 + (0,054 \cdot V)^{15,5}} \right], \quad (4)$$

де G_0 – параметр, який можна було змінювати під час моделювання. Математично зміну сили критичного струму ДТП задавали так: $I_c = I_c(F_1) + I_c(t)$, де $I_c(F_1)$ – сила критичного струму для магнітного потоку F_1 – постійна складова величини I_c , $I_c(t)$ – змінна складова величини I_c . Часова залежність змінної складової $I_c(t)$ визначалась формою керуючих імпульсів струму $I(t)$ вхідних сигналів, які мали в нашій моделі такий математичний вигляд:

$$I(t) = \begin{cases} DI \exp\left(-\frac{(t-t_n)^4}{t^4}\right) & t \leq t_n \\ DI, & t_n < t < (t_n + Dt) \\ DI \exp\left(-\frac{[t-(t_n + Dt)]^4}{t^4}\right) & t \geq t_n + Dt \end{cases} \quad (5)$$

де DI – амплітуда керуючих імпульсів струму, t – час наростання та спадання керуючих імпульсів струму, Dt – тривалість керуючих імпульсів, t_n – час подачі n -го імпульсу струму. Ми вважали, що трансформація керуючих імпульсів струму $I(t)$ в зміну сили критичного струму $I_c(t)$ має лінійний характер, тобто $I_c(t) \sim I(t)$ і варіація сили критичного струму DI_c пропорційна до амплітуди керуючих імпульсів струму DI . Тому функцію $I_c(t)$ ми задавали аналогічно

$$I_c(t) = \begin{cases} DI_c \exp\left(-\frac{(t-t_n)^4}{t^4}\right) & t \leq t_n \\ DI_c, & t_n < t < (t_n + Dt) \\ DI_c \exp\left(-\frac{[t-(t_n + Dt)]^4}{t^4}\right) & t \geq t_n + Dt \end{cases} \quad (6)$$

У результаті підстановок було отримано остаточне робоче диференціальне рівняння для розрахунків перехідних характеристик логічних елементів "НЕ":

$$I_p = \frac{Ch}{2e} j'' + [0,933aj' - \frac{0,001^1 \cdot 0,878 \cdot (aj')}{1 + (0,054aj')^{15,5}}] G_0 + [I_c(F_1) + I_c(t)] \sin j. \quad (7)$$

Перехідні характеристики джозефсонівських логічних елементів "НЕ"

Для розрахунків перехідних характеристик та моделювання перехідних процесів в логічних елементах "НЕ", створених на основі окремих джозефсонівських кріотронів, використали цю математичну модель. Основними параметрами моделі були параметри ДТП: сила критичного струму за відсутності магнітного потоку $I_c(0)$, ємність тунельного переходу C та провідність тунельного переходу G_0 і параметри керуючих сигналів: варіація сили критичного струму DI_c та час наростання та спадання керуючих імпульсів струму t . Величину $I_c(0)$ вважали 160 мкА, що є типовим значенням для ДТП на основі високотемпературних надпровідників. З формули (1) випливає, що $I_c(1,5F_0) \approx 34$ мкА, тобто максимальне значення сили критичного струму $I_c(F_2)$ під

час моделювання не може перевищувати 34 мкА. Силу робочого струму I_p встановили 5 мкА, враховуючи такі співвідношення: $I_p \ll I_c(0)$ і $I_p \ll I_c(1,5F_0)$, що дає можливість моделювати збільшення сили критичного струму $I_c(F)$ в значних межах. Силу струму I_0 встановили такою, щоб понизити силу критичного струму $I_c(F)$ до величини $I_c(F_1) = 2$ мкА, оскільки в початковий момент часу $I_c(F_1)$ повинна бути меншою за силу робочого струму I_p .

Інші параметри моделі змінювались під час моделювання. Залежності від їх значень та комбінацій їх величин ми отримували перехідні характеристики джозефсонівських логічних елементів “НЕ”, які вказували, що: 1) режим роботи був не стабільним; 2) режим роботи був стабільним, але час комутації був набагато більшим, ніж можна було би досягти, провівши оптимізацію параметрів моделі. Проведено оптимізацію параметрів моделі і встановлено, що для параметрів моделі $C = 0,75 \cdot 10^{-4}$ пФ, $G_0 = 0,52 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹, $t = 1$ пс і $DI_c = 12$ мкА можна отримати перехідні характеристики, які відповідатимуть стабільному режиму роботи елементів і мінімальному часу комутації. На рис. 3 наведені часова залежність сили струму керуючого сигналу $I(t)$ та перехідна характеристика $V(t)$, отримана з використанням цих параметрів моделі.

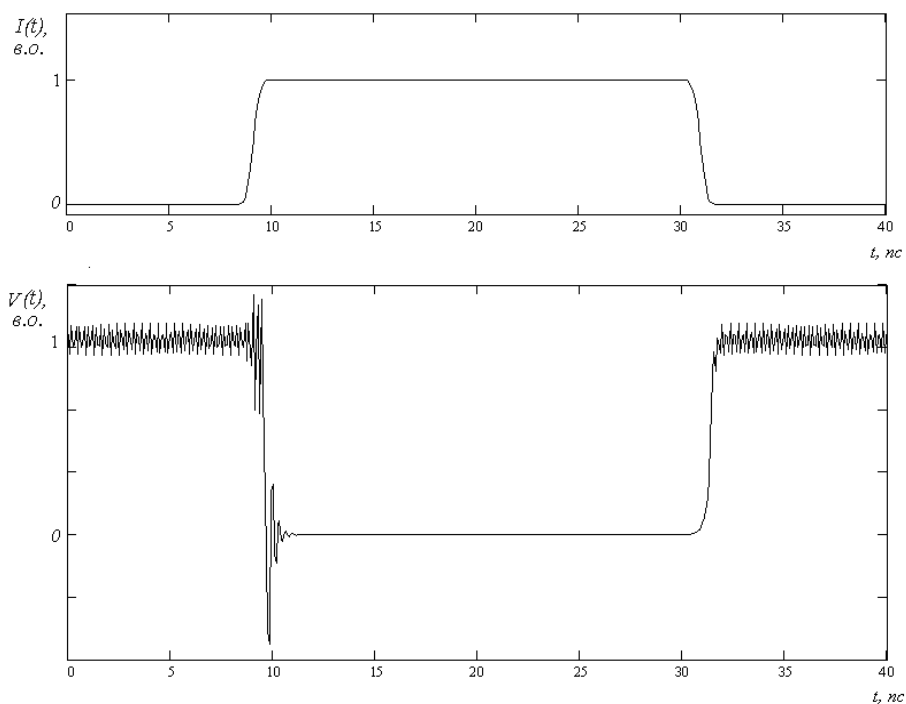


Рис. 3. Керуючий сигнал $I(t)$ та перехідна характеристика $V(t)$ для джозефсонівського логічного елемента “НЕ”

За відсутності вхідного керуючого сигналу джозефсонівський логічний елемент “НЕ” в початковий момент часу перебуває в стані логічної “1”, тобто $V(t) \approx V_0$ (у відносних одиницях $V(t) \approx 1$). У стані логічної “1” на перехідній характеристиці $V(t)$ спостерігались високочастотні коливання напруги з характерною частотою 1600 ГГц, які зумовлені загальновідомою джозефсонівською генерацією високочастотних електромагнітних хвиль, коли ДТП проявляє нестационарний ефект Джозефсона. Аналогічні коливання напруги спостерігались на перехідних характеристиках як джозефсонівських логічних елементів “АБО” і “І” [5,6], так і джозефсонівських елементів пам’яті [8]. Амплітуда коливань напруги набагато менша за постійну складову напруги V_0 , що дає змогу ідентифікувати цей стан як стан логічної “1”.

У момент часу $t = 10$ пс на логічний елемент подано вхідний керуючий сигнал у вигляді імпульсу струму $I(t)$. Моментом подачі керуючого сигналу вважатимемо той момент часу, коли сила струму досягне свого максимального значення DI . На перехідній характеристиці видно, що логічний стан елемента змінюється із стану логічної "1" на стан логічного "0", тобто відбувається логічний перехід "1"→"0". Тривалість цього логічного переходу (час комутації t_{10}) становила приблизно 2 пс, а зміна напруги від V_0 до 0 здійснювалась через згасаючі коливання напруги. Закінченням логічного переходу "1"→"0" вважали той момент часу, коли амплітуда коливань напруги була набагато меншою за величину V_0 , що давало змогу ідентифікувати цей стан як стан логічної "0". У момент часу $t = 30$ пс дія вхідного керуючого сигналу припинилась, в результаті чого напруга $V(t)$ змінилась і досягла свого початкового значення V_0 . Логічний стан елемента змінився із стану логічного "0" на стан логічної "1", тобто відбувся логічний перехід "0"→"1". Логічний перехід "0"→"1" відбувався швидше ніж логічний перехід "1"→"0" і час комутації t_{01} становив приблизно 1 пс. Згасаючих коливань напруги під час логічного переходу "1"→"0" не спостерігалось. Поведінка елементів логіки "НЕ" на основі окремих ДТП під час логічних переходів "1"→"0" та "0"→"1" схожа на поведінку елементів пам'яті на основі джозефсонівських кріотронів [8]. Отриманий результат, який свідчить, що час комутації $t_{10} = 2$ пс у два рази більший за $t_{01} = 1$ пс, пояснюється тим, що під час логічного переходу "1"→"0" відновлюється надпровідне тунелювання куперівських пар в ДТП, а під час логічного переходу "0"→"1" – руйнується. Зрозуміло, що на відновлення тунелювання пар потрібно більше часу ніж на руйнування, що і спостерігалось на наших перехідних характеристиках.

Для дослідження впливу амплітуди керуючих сигналів на роботу джозефсонівських логічних елементів "НЕ" розраховували їх перехідні характеристики, змінюючи значення амплітуди керуючих сигналів DI . Зміна величини DI призводила до зміни варіації сили критичного струму DI_c і зміни співвідношення між силою робочого струму I_p і силою критичного струму $I_c(F_2)$. Використовували число n , яке чисельно характеризує співвідношення між I_p і $I_c(F_2)$:
$$n = \frac{DI_c}{I_p - I_c(F_1)}$$

або
$$n = \frac{I_c(F_2) - I_c(F_1)}{I_p - I_c(F_1)}$$
. Значення величин I_p і $I_c(F_1)$ під час моделювання були незмінними і

становили відповідно $I_p = 5$ мкА та $I_c(F_1) = 2$ мкА. Якщо число $n < 1$ або $DI_c < 3$ мкА, то згідно з принципом роботи цього елемента логіки логічних переходів "1"→"0" відбуватись не повинно, що спостерігалось на отриманих перехідних характеристиках. Очікали, що такі логічні переходи можуть відбуватись, якщо число $n \geq 1$. На рис. 4а наведена перехідна характеристика для випадку $n = 1$, де видно, що в момент часу $t = 80$ пс, коли почав діяти керуючий сигнал, логічного переходу "1"→"0" не відбулось, а тільки збільшилась амплітуда коливань напруги, зумовлених джозефсонівською генерацією. У момент часу $t = 100$ пс, коли дія керуючого сигналу припинилась, елемент повернувся в свій початковий стан, не змінюючи свого логічного стану. Таку поведінку логічного елемента називаємо нестабільним режимом роботи, та елемент логіки "НЕ" не виконує своїх функцій відповідно до таблиці істинності для цих логічних елементів. Аналогічна поведінка наших елементів спостерігалась на їх перехідних характеристиках для випадків відповідно $n = 2$ і $n = 3$ (рис. 4б) і (рис. 4в). Видно, що моменти часу $t = 80$ пс логічних переходів "1"→"0" не відбувалось, а із зростанням числа n збільшувалась амплітуда коливань напруги. Очевидно, що для логічного переходу "1"→"0" чи для відновлення надпровідного тунелювання куперівських пар у ДТП потрібні коливання напруги певної амплітуди. Можна вважати, що відновлення тунелювання є складним процесом і цей процес відбувається не монотонно, а у вигляді періодичних спроб.

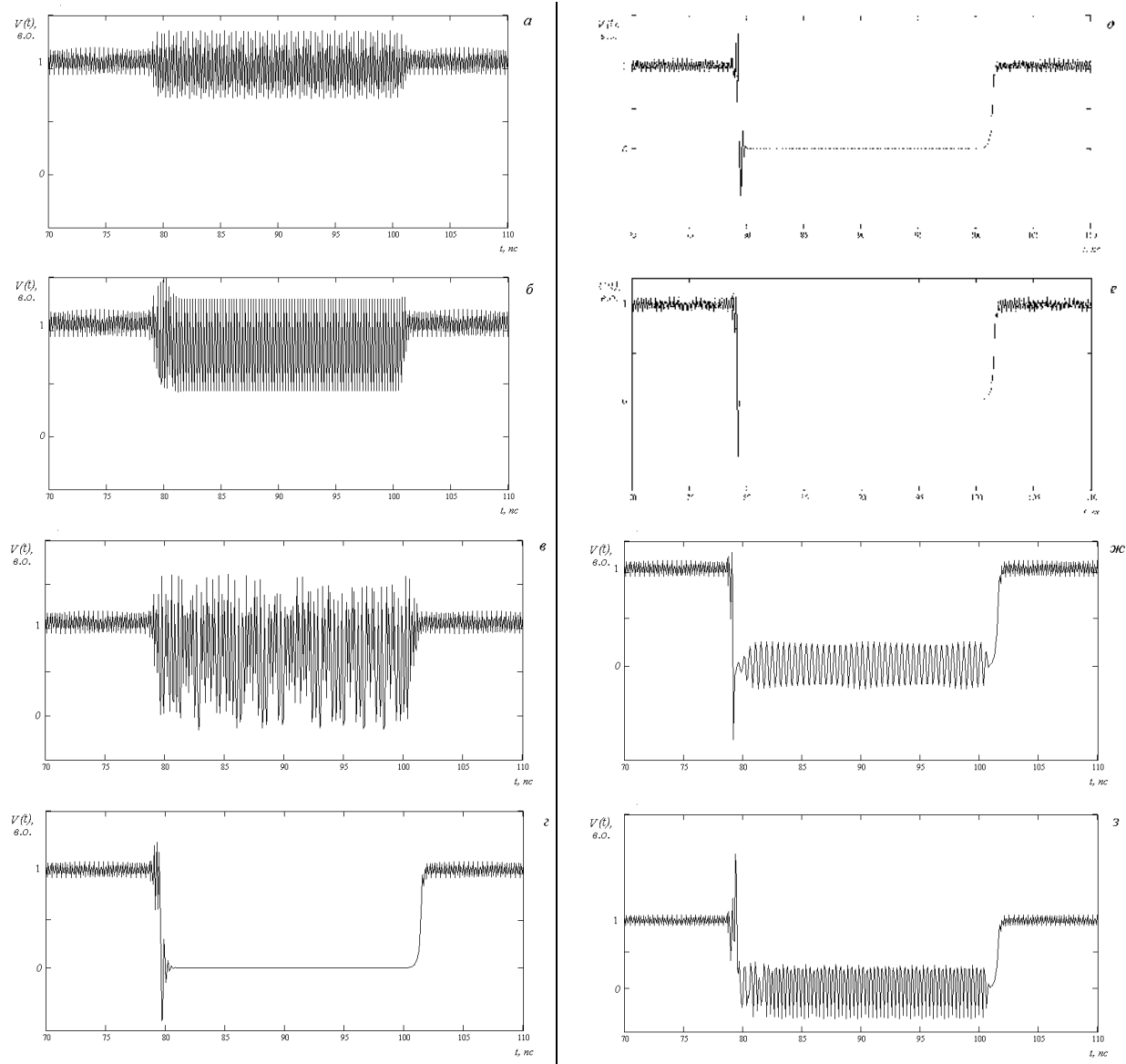


Рис. 4. Перехідні характеристики джозефсонівського логічного елемента "HE" під час подачі керуючих сигналів з різними значеннями числа n : а) $n = 1$; б) $n = 2$; в) $n = 3$; г) $n = 4$; д) $n = 5$; е) $n = 10$; ж) $n = 11$; з) $n = 12$

Коли амплітуду керуючих сигналів DI збільшили настільки, що число n досягло значення $n = 4$ (рис. 4г), на перехідній характеристиці елемента логіки чітко можна спостерігати і логічні переходи "1"→"0" і логічні переходи "0"→"1". Це означає, що режим роботи елемента є стабільним. Перехід від нестабільного режиму до стабільного спостерігався, коли $n \approx 3,5$. Подальше збільшення числа n до $5 \leq n \leq 10$ на перехідні характеристики елементів практично не впливало (рис. 4д) і (рис. 4е), режим роботи залишався стабільним, а часи комутації t_{10} і t_{01} не змінювались. У разі збільшення числа n до $n \geq 11$ на перехідних характеристиках логічного елемента "HE" (рис. 4ж) і (рис. 4з) спостерігались логічні переходи "1"→"0" і "0"→"1", але у стані логічного "0" видно коливання напруги, амплітуда яких співрозмірна з напругою V_0 , яка відповідає стану логічної "1". Такі коливання напруги не дають змоги ідентифікувати цей стан як стан логічного "0". Тому в такому разі режим роботи елемента логіки "HE" вважаємо нестабільним.

Результати математичного моделювання показали, що швидкість зміни логічного стану джозефсонівських елементів логіки "НЕ" (швидкодія чи час комутації) істотно залежала від часу t , який характеризує наростання та спадання керуючих сигналів. На рис. 5 наведені перехідні характеристики, розраховані для різних часів t : $t = 1$ пс, $t = 2$ пс, $t = 3$ пс і $t = 4$ пс. Видно, що час комутації t_{01} для логічних переходів "0"→"1" практично не залежав від розмитості керуючих сигналів у часі і становив $t_{01} = 1 - 2$ пс. З іншого боку, час комутації t_{10} і характер логічних переходів "1"→"0" істотно залежав від величини t і змінювався від $t_{10} = 3$ пс для $t = 1$ пс (рис.5а) до $t_{10} = 6$ пс для $t = 4$ пс (рис.5г). Причина такої поведінки елементів логіки зрозуміла – розмиття в часі керуючих сигналів ускладнює і розтягує в часі відновлення надпровідного тунелювання куперівських пар в ДТП.

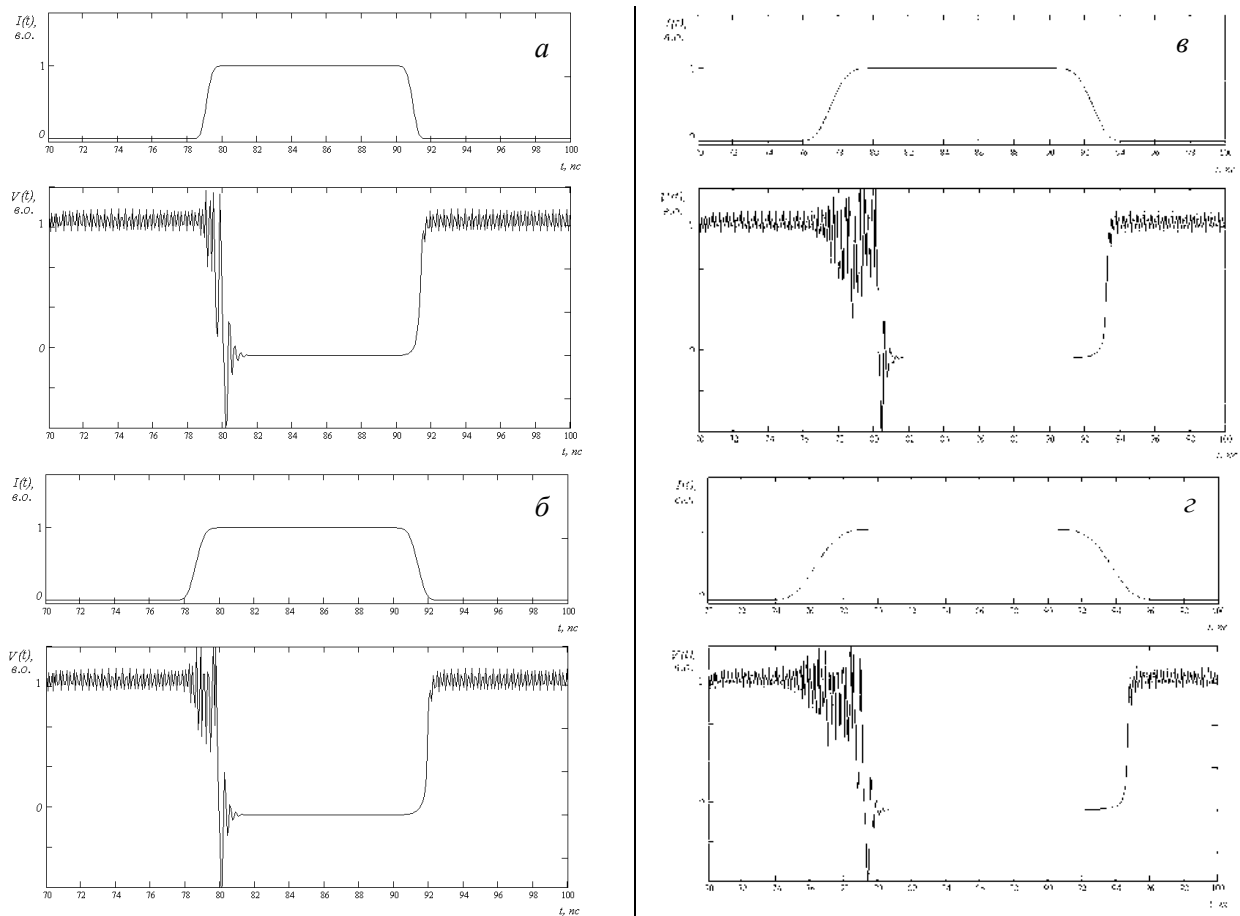


Рис. 5. Перехідні характеристики джозефсонівського логічного елемента "НЕ" під час подачі керуючих сигналів з різними часами наростання та спадання t : а) $t = 1$ пс; б) $t = 2$ пс; в) $t = 3$ пс; г) $t = 4$ пс

Для визначення мінімального часу тривалості керуючих сигналів, за якого в логічному елементі відбуватимуться послідовні логічні переходи "1"→"0" і "0"→"1", проводилось моделювання перехідних процесів через подачу на елемент в різні моменти часу керуючих сигналів різної тривалості. Тривалість керуючих імпульсів задавалась таким параметром моделі, як Dt . На рис. 6а наведено перехідну характеристику, розраховану під час моделювання подачі п'яти послідовних керуючих сигналів різної тривалості: $Dt = 20$ пс, $Dt = 10$ пс, $Dt = 5$ пс, $Dt = 2$ пс і $Dt = 1$ пс. Видно, що тільки у разі подачі останнього п'ятого сигналу тривалістю $Dt = 1$ пс стан логічного "0" не встановився, тобто елемент проявив нестабільний режим роботи. В інших

випадках можна вважати режим роботи стабільним, а тривалість керуючих сигналів $Dt = 2$ пс – межею між стабільним та нестабільним режимами роботи для таких логічних елементів.

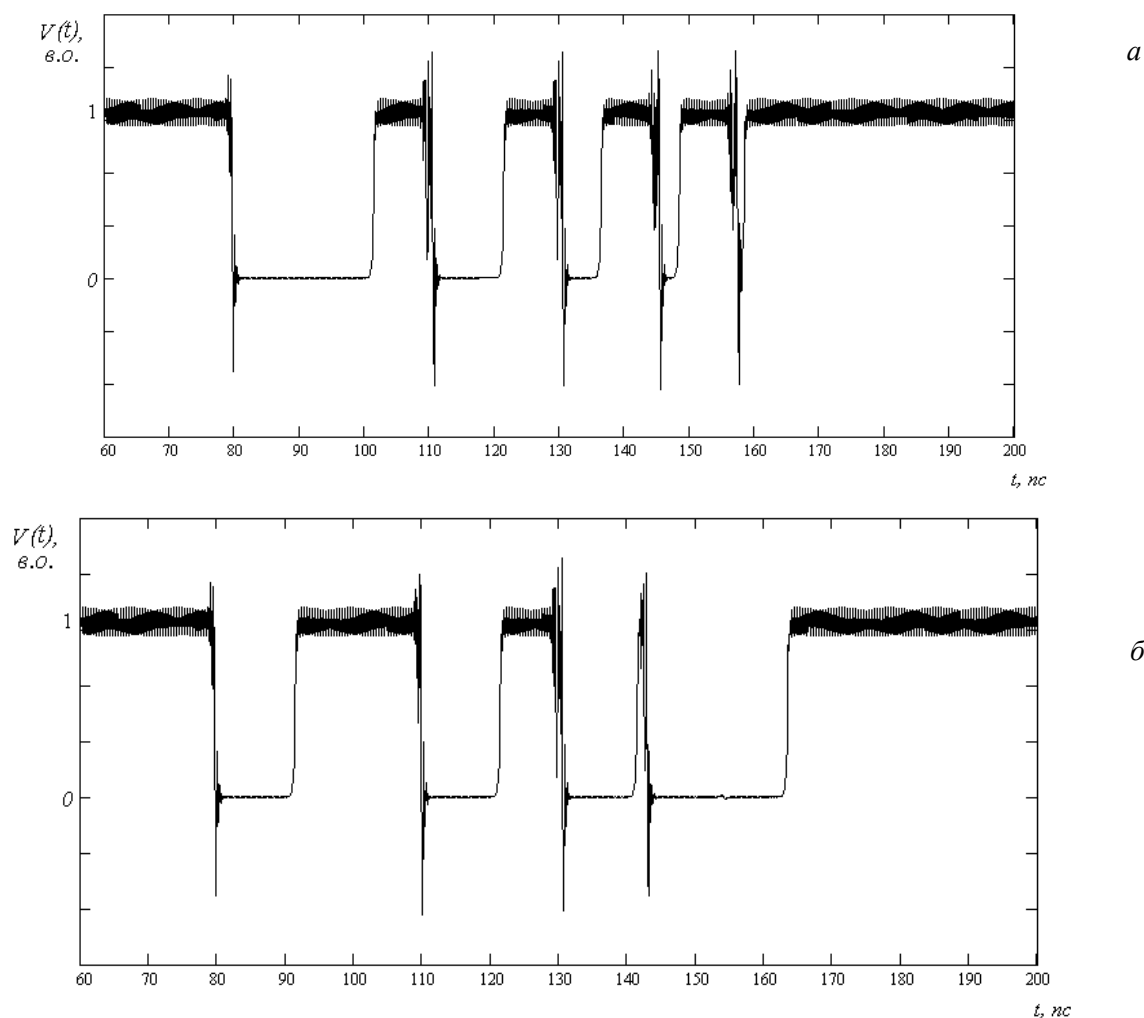


Рис. 6. Перехідні характеристики джозефсонівського логічного елемента “НЕ” під час подачі керуючих сигналів різної тривалості (а) та під час подачі керуючих сигналів через різні проміжки часу (б)

Для визначення мінімального проміжку часу між подачею керуючих сигналів проведено моделювання подачі керуючих сигналів однакової тривалості $Dt = 10$ пс з постійним зменшенням проміжку часу між двома послідовними сигналами (рис. 6б). Керуючі сигнали подавались в моменти часу $t_1 = 80$ пс, $t_2 = 110$ пс, $t_3 = 130$ пс, $t_4 = 143$ пс та $t_5 = 155$ пс. Часовий інтервал між подачею першого та другого керуючого сигналів (проміжок часу між моментом закінчення першого сигналу та початком другого) становить 20 пс, другого та третього – 10 пс, третього та четвертого – 3 пс і четвертого та п’ятого – 2 пс. Видно, що після припинення дії першого та другого сигналів в моменти часу $t = 90$ пс і $t = 120$ пс на елементі встановлюється напруга $V(t) \approx V_0$. Це свідчить про те, що елемент здійснює логічні переходи “0”→“1” і працює в стабільному режимі роботи. Після припинення дії третього сигналу в момент часу $t = 140$ пс логічний перехід “0”→“1” почався, напруга на елементі стала зростати, але стан логічної “1” не встиг встановитись до того, як почав діяти наступний четвертий керуючий сигнал. А коли припинив свою дію четвертий сигнал в момент часу $t = 153$ пс логічний перехід “0”→“1” навіть не почався, бо під дією наступного п’ятого сигналу в момент часу $t = 155$ пс елемент залишався в стані логічного “0”. Режим роботи в

останніх двох випадках вважаємо нестабільним, а проміжок часу між подачею двох послідовних керуючих сигналів 3 пс – межею між стабільним та нестабільним режимами роботи для логічних елементів "НЕ".

Враховуючи отримані результати моделювання, які свідчать про те, що мінімальна тривалість керуючих сигналів становила 2 пс, а мінімальні проміжки між подачею двох послідовних керуючих сигналів були 3 пс для стабільної роботи елементів логіки "НЕ", можемо зробити висновок, максимальна характерна частота подачі керуючих сигналів може бути 200 ГГц.

Висновки

Запропоновано схему та принцип роботи логічних елементів "НЕ" на основі окремого джозефсонівського тенельного переходу. Створено математичну модель та розраховано перехідні характеристики таких логічних елементів під час зміни їх логічного стану. Досліджено вплив амплітуди та тривалості імпульсів керуючих сигналів на стабільність та швидкодію логічних елементів "НЕ". Встановлено, що для стабільної роботи логічних елементів "НЕ" амплітуда керуючих сигналів повинна перевищувати силу робочого струму елемента в 2 – 6 разів, мінімальна тривалість керуючих сигналів становила 2 пс, а мінімальний інтервал між подачею імпульсів – 3 пс. Збільшення часу наростання та спадання керуючих сигналів призводило до збільшення часу комутації логічних переходів. Оцінено час комутації логічних елементів "НЕ" та отримано, що час комутації може становити 1 – 5 пс, що свідчить про їх високу швидкодію.

1. Shaju P.D., Kuriakose V.C. Logic gates using stacked Josephson junctions. *Physica C: Superconductivity*, V. 322, Is. 3–4, 1999.
2. Seung-Beck L., Hutchinson G.D., Williams D.A., Hasko D.G. and Ahmed H. Superconducting nanotransistor based digital logic gates. *Nanotechnology* 14, 188, 2003.
3. Xiao-Ling He, Chui-Ping Yang, Sheng Li, Jun-Yan Luo, and Siyuan Han. Quantum logical gates with four-level superconducting quantum interference devices coupled to a superconducting resonator. *Phys. Rev. A* 82, 024301, 2010.
4. Brock D.K., Track, E.K., Rowell J.M. Superconductor ICs: the 100-GHz second generation. *Spectrum, IEEE*, 37, 12, 2000.
5. Тиханський М.В., Крисько Р.Р. Перехідні характеристики джозефсонівських елементів логіки "І". *Вісн. НУ "ЛП"*, №708, 2011.
6. Krysko R.R., Tyhanskyi M.V. The modeling of commutation processes in Josephson logical elements "AND" and "OR" *Inter. Conf. Young Sc. "Low Temp. Phys."* Kharkiv, 2011.
7. Тиханський М.В., Шуригін Ф.М., Тиханська К.М. Моделювання перехідних процесів у джозеф-сонівських елементах пам'яті з використанням реальних ВАХ тунельних переходів. *Вісн. НУ "ЛП"*, № 482, 2003.
8. Partyka A., Tyhanskyi M. Mathematical model for transitional processes in Josephson cryotrons based on tunnel junctions. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 24, 5, 2011.