

Моделирование процессов коммутации в джозефсоновских элементах логики «И» и «ИЛИ»

М.В. Тиханский, Р.Р. Крысько

Национальний університет «Львівська політехніка», ул. С. Бандери, 12, г. Львів, 79013, Україна

E-mail: rostyslawk@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2012 г.

Предложен принцип создания элементов цифровой логики на основе джозефсоновских криотронов. Описан принцип работы цифровых логических элементов «И» и «ИЛИ», созданных на основе туннельных переходов «сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник». Созданы математические модели процессов коммутации в таких логических элементах, рассчитаны переходные характеристики при изменении логического состояния и определены основные параметры таких моделей. Показано, что реализовать элементы цифровой логики «И» и «ИЛИ» можно на отдельных джозефсоновских криотронах и управлять их логическим состоянием с помощью входных сигналов в виде импульсов тока. Такие логические элементы удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к цифровым элементам логики, и имеют время коммутации примерно 2–3 пс.

Запропоновано принцип створення елементів цифрової логіки на основі джозефсонівських криотронів. Описано принцип роботи цифрових логічних елементів «І» та «АБО», які створено на основі тунельних переходів «надпровідник–ізолятор–надпровідник». Створено математичні моделі процесів комутації в таких логічних елементах, розраховано перехідні характеристики при зміні логічного стану та визначено основні параметри таких моделей. Показано, що реалізувати елементи цифрової логіки «І» та «АБО» можна на окремих джозефсонівських криотронах і керувати їх логічним станом за допомогою вхідних сигналів у вигляді імпульсів струму. Такі логічні елементи задовільняють усім вимогам, які висуваються до цифрових елементів логіки і мають характерний час комутації приблизно 2–3 пс.

PACS: 74.50.+g Туннельные эффекты; эффекты Джозефсона;

85.25.Cr Джозефсоновские устройства;

85.25.Nv Сверхпроводящие логические элементы и устройства памяти, микроселектронные схемы.

Ключевые слова: джозефсоновский криотрон, логический элемент, переходная характеристика, переходный процесс, процесс коммутации.

Введение

Использование традиционных логических элементов в цифровой электронике обеспечивает многолетнее развитие различных электронных приборов и устройств. Параллельно ведутся исследования и разработки логических элементов на основе других нетрадиционных физических явлений или эффектов, в частности логических элементов на основе явления сверхпроводимости, перспектива использования которых состоит в сверхмалом потреблении энергии и сверхвысоком быстродействии [1,2]. В сверхпроводящих логических элементах используют различные джозефсоновские структуры, известные как джозефсоновские криотроны, в основе работы которых лежат стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона. На базе джо-

зефсоновских криотронов можно создавать джозефсоновские элементы компьютерной памяти [3–6] и джозефсоновские элементы цифровой логики [1,2].

Основные требования, предъявляемые к джозефсоновским криотронам, — стабильный режим работы и высокое быстродействие или малое время коммутации. Информацию о режиме работы и быстродействии дают нам переходные характеристики криотронов — временные зависимости напряжения на криотроне при изменении его логического состояния, которые можно получить экспериментально или рассчитать теоретически. Нами была создана математическая модель переходных процессов в джозефсоновских криотронах — элементах памяти [7,8]. Предложены способы управления логическим состоянием таких элементов, рассчитаны их переходные характеристики во время из-

менения логического состояния, исследованы особенности переходных характеристик, а также оценено время коммутации — характерное время, за которое на криотроне появляется или исчезает напряжение, когда его логическое состояние меняется.

В настоящей работе предложена реализация джозефсоновских логических элементов «И» и «ИЛИ» и создана математическая модель переходных процессов, которые протекают в таких элементах логики, с целью получения переходных характеристик во время изменения логического состояния под действием управляющих сигналов в форме внешних импульсов электрического тока.

Принцип работы элементов логики «И»

Логический элемент «И» предложено создать на основе джозефсоновского туннельного перехода (S–I–S джозефсоновского туннельного перехода), вольт-амперная характеристика (ВАХ) которого приведена на рис. 1. Принцип работы логического элемента «И»

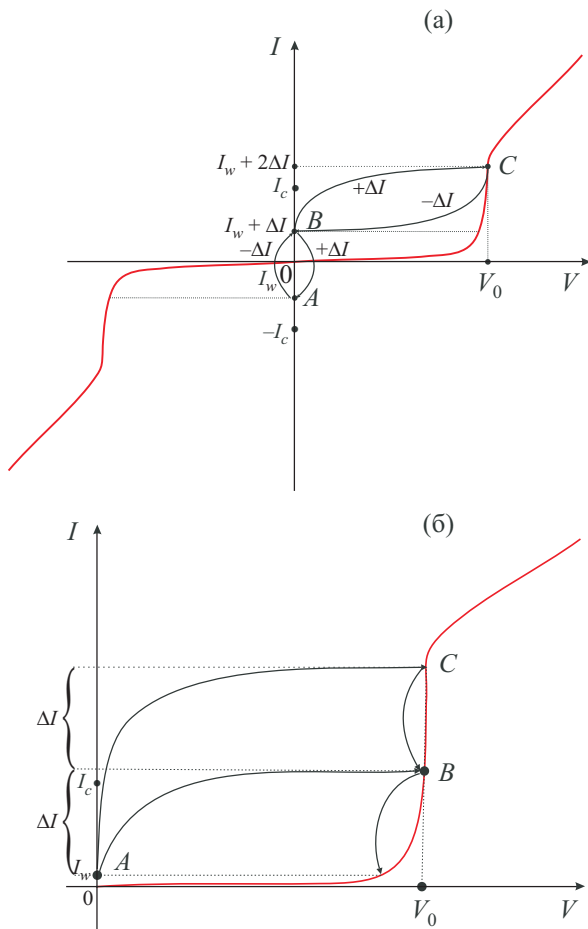


Рис. 1. ВАХ джозефсоновского S–I–S туннельного перехода и схема управления логическим состоянием элемента логики «И» (а) и элемента логики «ИЛИ» (б) сигналами в виде импульсов электрического тока.

заключается в следующем: когда сила тока I в туннельном переходе (контакте) меньше силы критического тока I_c , напряжение на контакте $V = 0$ вследствие бездиссипативного туннелирования куперовских пар, а если $I > I_c$, то бездиссипативное туннелирование куперовских пар разрушается и на контакте возникает напряжение $V \neq 0$, поскольку его ВАХ определяется одноэлектронным туннелированием носителей заряда. Состоянию логического «0» на ВАХ отвечает точка A , когда напряжение на контакте равно нулю. Для этого в элементе должен протекать электрический ток I такой силы, чтобы он не превышал значения I_c . Выбирая значение силы рабочего тока I_w , надо выполнить условие $I < I_c$ или $I_w > I_c$. Поскольку мы предлагаем пропускать отрицательный рабочий ток ($I_w < 0$), то для выполнения условия $V = 0$ надо, чтобы $|I_w| < I_c$.

Управление логическим состоянием элемента логики «И» осуществляется подачей двух управляющих сигналов в виде импульсов тока, каждый из которых увеличивает силу тока I на величину ΔI . Когда элемент находится в начальном логическом состоянии «0» и на него подан только один управляющий сигнал, сила общего тока I увеличивается на величину ΔI и достигает значения $I = I_w + \Delta I$, которое не сможет превысить силу критического тока I_c (точка B). Напряжение на элементе не изменится и будет равняться нулю, т.е. состояние логического «0» сохранится. Когда действие управляющего сигнала прекратится, сила общего тока I вернется к своему начальному значению I_w (точка A), и элемент дальше будет оставаться в состоянии логического «0». Точки A и B на вольт-амперной характеристике отвечают состоянию логического «0», потому что в обоих случаях модуль силы общего тока $|I|$ меньше силы критического тока I_c , а $V = 0$.

Чтобы перевести логический элемент «И» из состояния логического «0» в состояние логической «1», нужно на элемент одновременно подать два управляющих сигнала, вследствие чего сила общего тока достигнет величины $I = I_w + 2\Delta I$ и превысит силу критического тока I_c . Вследствие этого бездиссипативное туннелирование куперовских пар разрушится и на элементе появится ненулевое напряжение $V \approx V_0$ (точка C). Когда через некоторый промежуток времени действие хотя бы одного из управляющих сигналов прекратится, сила общего тока I снизится до $I_w + \Delta I$, станет меньше, чем сила критического тока I_c , то элемент вернется в состояние логического «0» (точка B), т.е. произойдет логический переход «1» → «0». После прекращения действия обоих управляющих сигналов сила общего тока I станет равной силе рабочего тока I_w (точка A), а элемент будет пребывать в состоянии логического «0».

Принцип работы элементов логики «ИЛИ»

Джозефсоновские логические элементы «ИЛИ» также могут быть созданы на основе туннельного перехода «сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник». Принцип работы элемента логики «ИЛИ» можно объяснить с помощью схемы с использованием вольт-амперной характеристики S–I–S джозефсоновского перехода, которая приведена на рис. 1(б). Когда сила тока I в контакте меньше силы критического тока I_c , напряжение на контакте $V = 0$ вследствие туннелирования куперовских пар, а если $I > I_c$, то туннелирование пар разрушается, что приводит к появлению некоторого напряжения $V \neq 0$, поскольку ВАХ определяется одноэлектронным туннелированием носителей заряда через потенциальный барьер.

В точке A , где сила тока в элементе I равняется силе рабочего тока I_w , а напряжение на элементе равно нулю, потому что $I_w < I_c$, можно реализовать состояние логического «0». Состояние логической «1» реализовано в точках B и C , где $I > I_c$, а напряжение на элементе отлично от нулевого значения. Когда на элемент подается управляющий сигнал в виде одного или двух импульсов тока $+\Delta I$, вследствие чего общий ток ($I = I_w + \Delta I$ или $I = I_w + 2\Delta I$) превысит значение критического тока I_c и туннельный контакт перейдет в резистивное состояние, произойдет логический переход «0» → «1». На элементе появится напряжение $V \approx V_0$ (точка B или C), и он перейдет в стабильное состояние логической «1». Когда прекратится действие одного из двух управляющих сигналов, а другой будет продолжать действовать, сила общего тока I снизится до величины $I_w + \Delta I$ (точка B), что больше силы критического тока I_c . В этом случае элемент не вернется в состояние логического «0», а будет оставаться в стабильном состоянии логической «1». Когда прекратится действие обоих управляющих сигналов, сила общего тока I снизится до уровня рабочего тока I_w , что меньше силы критического тока I_c , элемент должен вернуться в состояние логического «0» (точка A), т.е. должен произойти логический переход «1» → «0».

Математическая модель переходных процессов в логических элементах «И» и «ИЛИ»

Математическая модель переходных процессов (процессов коммутации) в джозефсоновских логических элементах построена на основе дифференциального уравнения, которое использовалось для моделирования переходных процессов и расчетов переходных характеристик джозефсоновских элементов памяти [9]:

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

где $I(t)$ — сила тока в элементе, I_c — сила критического тока, C — емкость джозефсоновского туннель-

ного перехода, $G(V)$ — проводимость перехода в случае одноэлектронного туннелирования (в общем случае проводимость G зависит от напряжения V), \hbar — постоянная Планка, e — заряд электрона, $\varphi(t)$ — неизвестная функция, которая описывает временную зависимость разности фаз волновых функций сверхпроводников по обе стороны туннельного барьера (скачок фазы). Если рассчитать функцию $\varphi(t)$ и использовать известное соотношение для нестационарного эффекта Джозефсона

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

то можно получить переходную характеристику логического элемента $V(t)$, в которой содержится много информации о переходных процессах, что позволит определить время коммутации для логических переходов «0» → «1» или «1» → «0» и стабильность или нестабильность режима работы.

Устанавливая начальные условия для уравнения (1), мы считали, что в начальный момент времени ($t = 0$) логические элементы находились в состоянии «0» (точка A), сила тока $I = I_w$, а напряжение $V = 0$. Если $V = 0$, то, согласно формуле (2), $\varphi'(0) = 0$. Используя формулу (2), мы заменили зависимость нормальной проводимости туннельного перехода от напряжения $G(V)$ на функцию $G(\varphi')$, которую определяли из вольт-амперной характеристики туннельного перехода $I(V)$ в режиме одноэлектронного туннелирования. Рабочей температурой элементов логики была выбрана температура кипения гелия, для которой рассчитали вольт-амперную характеристику, а рассчитанную ВАХ аппроксимировали простой математической функцией [10]

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

где G_0 — нормальная проводимость (параметр, значение которого можно было изменять в процессе моделирования).

Моделирование действия управляющих сигналов в виде внешних импульсов тока на логические элементы осуществлялось с использованием следующей зависимости силы тока от времени:

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

где n — номер сигнала, который подается на логический элемент (n может принимать значение 1 или 2),

m — номер импульса тока в первом или втором сигнале (число $m = 1; 2; 3; \dots$), ΔI — амплитуда управляющих импульсов тока, t_0 — среднее время нарастания или спадания силы тока, t_{nm} — момент времени, когда на логический элемент подавали n -й сигнал m -го импульса тока, τ — продолжительность импульсов тока. Моментом подачи сигналов на логический элемент считали тот момент времени, когда сила тока в импульсе достигла максимального значения ΔI . Сила общего тока $I(t)$, который протекал в логическом элементе, записывалась как сумма силы рабочего тока I_w , силы тока в импульсе первого сигнала $I_{1m}(t)$ и силы тока в импульсе второго сигнала $I_{2m}(t)$:

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

Моделирование процессов коммутации и получение переходных характеристик логических элементов $V(t)$ заключалось в решении методом Рунге–Кутты составленного нами дифференциального уравнения:

$$I_w + I_{1m}(t) + I_{2m}(t) = \frac{C\hbar}{2e} \varphi'' + \left[0,933(\alpha\varphi') - \frac{0,878(\alpha\varphi')}{1 + (0,054\alpha\varphi')^{15.5}} \right] G + (I_c) \sin \varphi. \quad (6)$$

Переходные характеристики логических элементов

Для моделирования переходных процессов в логических элементах «И» и «ИЛИ» и для расчетов переходных характеристик мы использовали математическую модель, основными параметрами которой были как физические характеристики криотронов (сила критического тока I_c , емкость джозефсоновского туннельного перехода C и нормальная проводимость перехода G_0), так и параметры управляющих сигналов (сила рабочего тока I_w , амплитуда управляющих импульсов тока ΔI и продолжительность импульсов тока τ). Все приведенные выше параметры модели и их комбинации существенно влияли на полученные переходные характеристики $V(t)$. Комбинации случайным образом установленных параметров не обеспечивали стабильный режим работы логических элементов: действия управляющих сигналов или не приводили к логическому переходу «0» → «1», или не возвращали элемент из состояния «1» в состояние «0». Методом подбора нами устанавливались такие параметры, при которых можно было бы моделировать работу логических элементов в стабильном режиме, а потом параметры изменялись так, чтобы режим работы оставался стабильным, а время коммутации уменьшалось бы, т.е. возрастало быстродействие элементов. В результате нами получены как диапазоны параметров модели для стабильного режима работы, так и значения параметров, при которых быстродействие элементов могло бы быть максимальным.

Для логического элемента «И» установлены следующие параметры модели, при которых режим работы был стабильным, а быстродействие максимальным: сила критического тока $I_c = 9$ мкА, емкость джозефсоновского туннельного перехода $C = 0,58 \cdot 10^{-4}$ пФ, нормальная проводимость перехода $G_0 = 0,94 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹, сила рабочего тока $I_w = -4$ мкА, амплитуда управляющих импульсов тока $\Delta I = 9$ мкА. Продолжительность импульсов тока τ существенно на переходные характеристики не влияла, кроме случаев, когда $\tau < 10$ пс, поэтому мы задавали $\tau = 20$ пс. Результаты моделирования процессов коммутации в логическом элементе «И» и рассчитанные переходные характеристики приведены на рис. 2. Для удобства нами приведены нормированные переходные характеристики $V(t)/V_0$, где V_0 — напряжение на элементе в состоянии логической «1».

Суть моделирования состояла в подаче в разные моменты времени на логический элемент «И» обоих управляющих сигналов в виде импульсов электрического тока. На промежутке времени $0 \text{ пс} \leq t \leq 40 \text{ пс}$ управляющие сигналы не действовали на логический элемент, сила общего тока $I(t)$ определялась силой рабочего тока $I_w = -4$ мкА, который по модулю меньше силы критического тока $I_c = 9$ мкА. Поэтому элемент сохранял свое начальное состояние «0», а напряжение на нем $V(t) = 0$ (рис. 2(г)). В моменты времени $t = 40$ пс и $t = 80$ пс на элемент подавались в отдельности импульсы первого управляющего сигнала $I_1(t)$ (рис. 2(а)) и второго управляющего сигнала $I_2(t)$ (рис. 2(б)) соответственно. Амплитуда каждого импульса $\Delta I = 8$ мкА. Сила общего тока ($I(t) = I_w + \Delta I = 4$ мкА) не превышала силы критического тока $I_c = 9$ мкА. На рис. 2(г) видно, что в обоих случаях на элементе возникали импульсы напряжения, но их амплитуда была настолько малой, что логический элемент не менял своего логического состояния и оставался в начальном состоянии «0». Такие же импульсы напряжения возникали на элементе и в моменты времени $t = 60$ пс и $t = 100$ пс, когда прекращалось действие управляющих сигналов, но полярность импульсов напряжения была другой.

В момент времени $t = 120$ пс подавались одновременно первый и второй управляющие сигналы $I_1(t)$ и $I_2(t)$ с одинаковыми амплитудами $\Delta I = 8$ мкА. Сила общего тока в логическом элементе $I(t)$ возросла до величины $I_w + 2\Delta I = 12$ мкА (рис. 2(в)), т.е. сила общего тока в элементе превысила уровень критического тока I_c , поэтому на элементе появилось напряжение $V(t) = V_0$, а нормированная переходная характеристика $V(t)/V_0$ достигла 1. Элемент изменил свое логическое состояние и перешел в состояние логической «1», т.е. произошел логический переход «0» → «1», что видно на нормированной переходной характеристике $V(t)/V_0$. Через промежуток времени $\tau = 20$ пс действие обоих управляющих сигналов прекратилось,

сила общего тока $I(t)$ снизилась до уровня рабочего тока $I_w = -4$ мкА, вследствие чего начало выполняться соотношения $|I_w| < I_c$. Это привело к восстановлению сверхпроводящего туннелирования куперовских пар, и на логическом элементе установилось напряжение $V(t) = 0$; элемент вернулся в состояние логического «0», т.е. испытал логический переход «1» → «0».

Для проверки правильности нашей модели и принципа работы логических элементов «И» мы смоделировали ситуацию, когда управляющие сигналы подавались не одновременно, а действовали одновременно только на протяжении некоторого промежутка времени. В момент времени $t = 160$ пс на элемент был подан импульс первого сигнала (рис. 2(а)). С некоторой задержкой в момент времени $t = 170$ пс, когда на элемент уже действовал первый управляющий сигнал $I_1(t)$ амплитудой $\Delta I = 8$ мкА и сила общего тока представляла $I(t) = I_w + \Delta I = 4$ мкА, был подан второй управляющий сигнал амплитудой $\Delta I = 8$ мкА (рис. 2(б)). Сила общего тока $I(t)$ в элементе стала равной $I_w + 2\Delta I = 12$ мкА и превысила значение критического тока I_c , поэтому на элементе установилось напряжение $V(t) = V_0$, логический элемент перешел в состояние логической «1» (рис. 2(г)). В момент времени $t = 180$ пс действие первого управляющего сигнала прекратилось, сила общего тока $I(t)$ стала равной $I_w + \Delta I = 4$ мкА, что меньше значения критического тока I_c . Элемент возвратился из состояния логической «1» в состояние логического «0», что видно на нормированной переходной характеристике $V(t)/V_0$ (рис. 2(г)).

Для оценки быстродействия элемента логики «И», определения времени коммутации и исследования особенностей протекания процессов коммутации во время логических переходов «0» → «1» и «1» → «0» нами были получены переходные характеристики в расширенном временном масштабе. На рис. 2(е) приведена нормированная переходная характеристика $V(t)/V_0$ для логического элемента «И», которая описывает двойное изменение логического состояния «0» → «1» → «0», когда на элемент действовали одновременно импульсы тока обоих управляющих сигналов. Видно, что во время логического перехода «0» → «1» и логического перехода «1» → «0» на фоне изменения напряжения имели место затухающие колебания напряжения. Колебания напряжения увеличивают время коммутации Δt , их можно рассматривать как некий негативный фактор с точки зрения эффективности работы логических элементов, но как было установлено для джозефсоновских элементов памяти [11], такие колебания напряжения являются и положительным фактором, потому что их устранение ухудшает стабильность работы. Используя полученные переходные характеристики, мы оценили время коммутации $\Delta t_{01} \approx 2$ пс для логических переходов «0» → «1». Для логических переходов «1» → «0» время коммутации Δt_{10} было прибли-

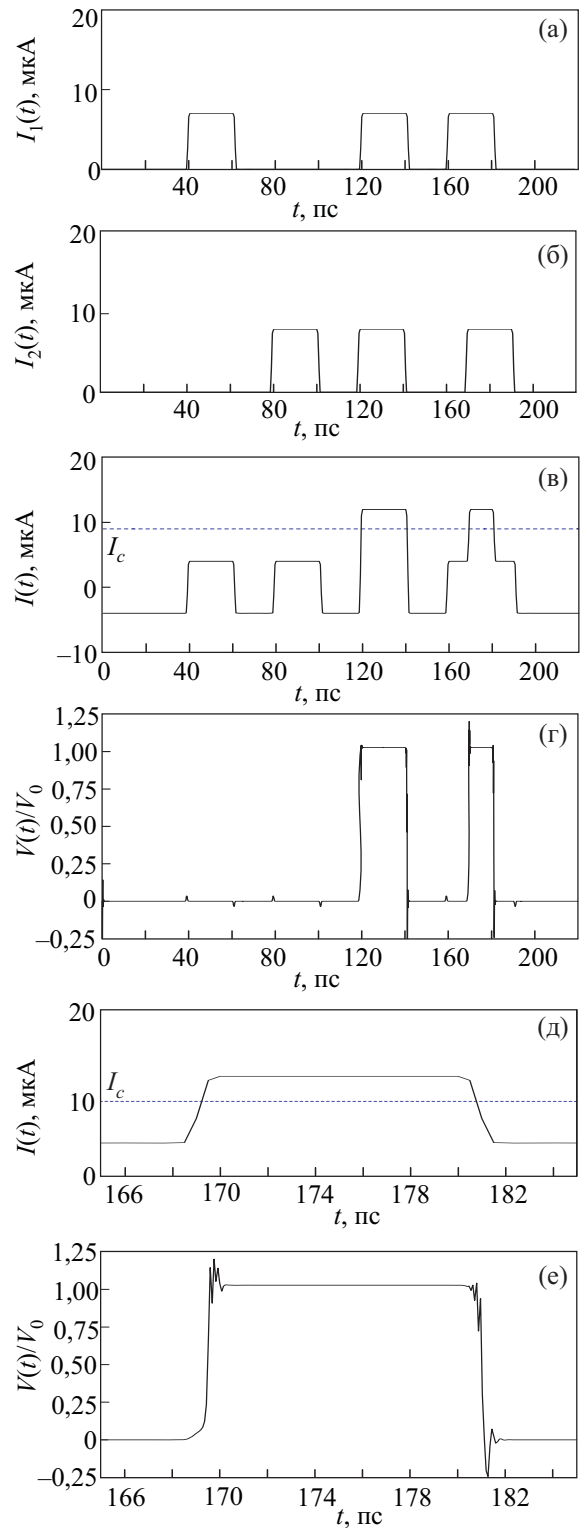


Рис. 2. Переходные характеристики логического элемента «И»: временная зависимость силы тока для первого управляющего сигнала (а), временная зависимость силы тока для второго управляющего сигнала (б), временная зависимость силы общего тока (в), нормированная переходная характеристика (г), фрагменты кривых $I(t)$ (д) и $V(t)/V_0$ (е) в расширенном временном масштабе. Пунктирная линия соответствует уровню критического тока.

тельно таким же. Приблизительное равенство времен коммутации Δt_{01} и Δt_{10} было получено только для джозефсоновских элементов логики, в то время как для джозефсоновских элементов памяти [12] время коммутации Δt_{10} было в 5–10 раз большим, чем время Δt_{01} . В работе [11] приводится объяснение таких результатов. Полученный результат для логических элементов «И», который указывает, что время Δt_{01} , приблизительно равно времени Δt_{10} , мы объяснить не можем.

Для логического элемента «ИЛИ» параметры модели, при которых его режим работы стабилен, а время коммутации минимально, установлены такие: $I_c = 18$ мкА, $C = 0,75 \cdot 10^{-4}$ пФ, $G_0 = 0,52 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹, $I_w = 2$ мкА, $\Delta I = 18$ мкА, $\tau = 50$ пс. Результаты моделирования процессов коммутации в логическом элементе «ИЛИ» и рассчитанные переходные характеристики приведены на рис. 3. До момента времени $t = 50$ пс на элемент не подавалось никаких управляющих сигналов, сила общего тока $I(t)$ равнялась силе рабочего тока $I_w = 2$ мкА, который меньше силы критического тока $I_c = 18$ мкА, поэтому элемент находился в состоянии логического «0», а $V(t) = 0$.

В момент времени $t = 50$ пс на элемент был подан первый импульс первого управляющего сигнала $I_1(t)$ амплитудой $\Delta I = 18$ мкА (рис. 3(а)), а сила тока второго управляющего сигнала $I_2(t) = 0$ (рис. 3(б)). Сила общего тока $I(t) = I_w + \Delta I$ достигла значения 20 мкА и превысила уровень I_c (рис. 3(в)), поэтому на элементе появилось напряжение $V(t) = V_0$ или $V(t)/V_0 = 1$. Вследствие этого элемент перешел в состояние логической «1», что видно на нормированной переходной характеристике $V(t)/V_0$ (рис. 3(г)). В момент времени $t = 100$ пс прекратилось действие первого управляющего сигнала, элемент вернулся из состояния логической «1» в состояние логического «0», что видно на переходной характеристике. Такое же поведение проявлял логический элемент «ИЛИ» 150 пс $\leq t \leq 200$ пс, когда на него действовал только импульс $I_2(t)$ (рис. 3(б)), а $I_1(t) = 0$.

В момент времени $t = 250$ пс на элемент одновременно были поданы два управляющих сигнала: второй импульс первого сигнала и второй импульс второго сигнала (рис. 3(а) и 3(б)). Амплитуда каждого импульса тока $\Delta I = 18$ мкА, поэтому сила общего тока $I(t) = I_w + 2 \Delta I$ достигла значения 38 мкА. Несмотря на то, что сила общего тока $I(t)$ была почти в два раза больше, чем сила тока в двух предыдущих случаях, как показали результаты моделирования (рис. 3(г)), напряжение на логическом элементе также было равно V_0 . Такое напряжение на элементе отвечает состоянию логической «1». Когда действие обоих сигналов прекратилась в момент времени $t = 300$ пс, логический элемент вернулся в состояние логического «0». Такое поведение элемента соответствует стабильному режиму работы элементов логики «ИЛИ».

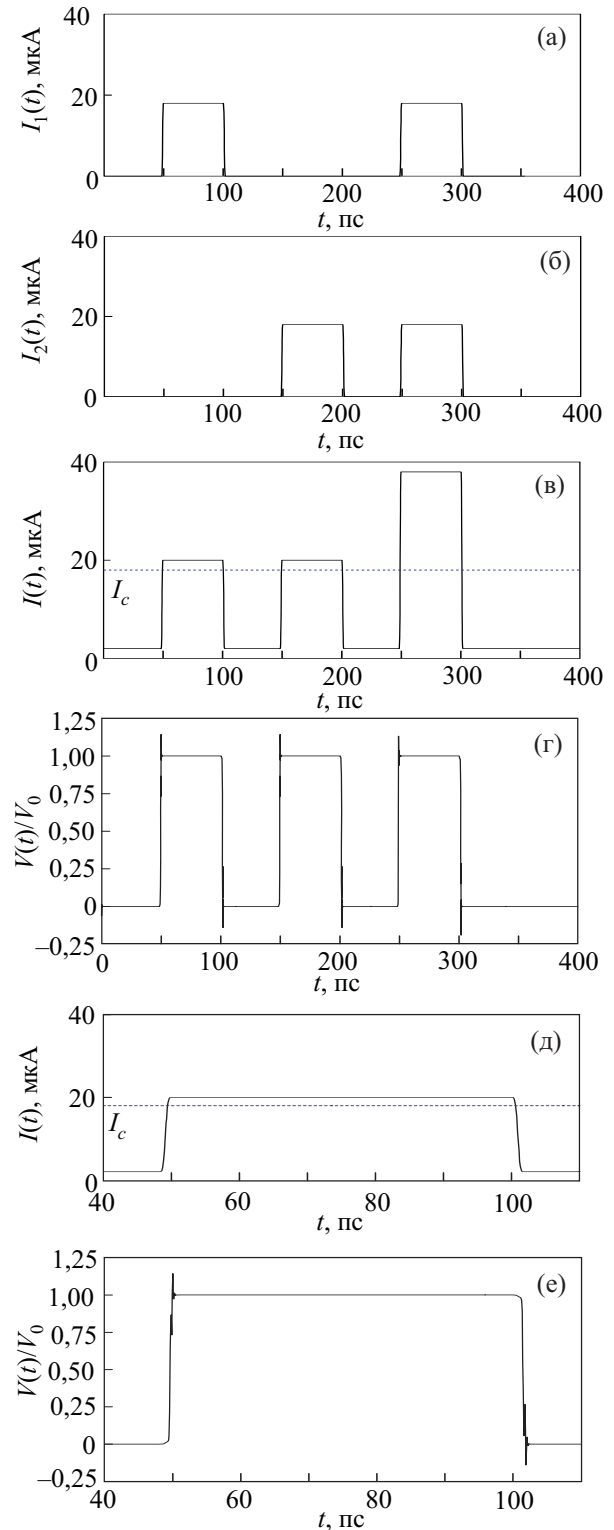


Рис. 3. Переходные характеристики логического элемента «ИЛИ»: временная зависимость силы тока для первого управляющего сигнала (а), временная зависимость силы тока для второго управляющего сигнала (б), временная зависимость силы общего тока (в), нормированная переходная характеристика (г), фрагменты кривых $I(t)$ (д) и $V(t)/V_0$ (е) в расширенном временном масштабе. Пунктирная линия соответствует уровню критического тока

Для оценки быстродействия элементов логики «ИЛИ» и исследования особенностей протекания процессов коммутации во время логических переходов «0» → «1» и «1» → «0» были получены переходные характеристики в расширенном временном масштабе. На рис. 3(е) приведена нормированная переходная характеристика логического элемента «ИЛИ» $V(t)/V_0$, рассчитанная для случая, когда на элемент действовал первый импульс первого управляющего сигнала. Видно, что, как и в случае логических элементов «И», изменение логического состояния сопровождалось затухающими колебаниями напряжения. Оценено время коммутации $\Delta t_{01} \approx 2,5$ пс для логических переходов «0» → «1», а для переходов «1» → «0» $\Delta t_{10} \approx 2$ пс.

Выводы

Создана математическая модель переходных процессов в логических элементах «И» и «ИЛИ», которые можно реализовать на основе джозефсоновских туннельных переходов. Установлены оптимальные параметры модели и рассчитаны переходные характеристики элементов логики «И» и «ИЛИ», которые описывают их поведение во время изменения логического состояния вследствие логических переходов «0» → «1» и «1» → «0». Показано, что управление состоянием логических элементов «И» и «ИЛИ» действием управляющих сигналов в виде импульсов электрического тока удовлетворяет всем требованиям, которые должны выполняться в таких элементах логики, а сами элементы могут работать в стабильном режиме. Оценено время коммутации в логических элементах «И» и «ИЛИ», составляющее 2–3 пс, что говорит о высоком быстродействии таких элементов логики.

1. K.K. Likharev, and V.K. Semenov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1**, 3 (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* **46**, 479 (2006).

6. Y. Mizugaki, Y. Namatame, and M. Maezawa, *Supercond. Sci. Technol.* **20**, 315 (2007).
7. Т. Ван Дузер, *Физические основы сверхпроводящих устройств*, Радио и связь, Москва (1984).
8. A.I. Partyka and M.V. Tyhanskyi, *Supercond. Novel Magnetism*, DOI: 10.1007/s10948-010-0925-3.
9. М.В. Тиханський, А.І. Партика, *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології* № 4, 10 (2007).
10. М.В. Тиханський, Ф.М. Шуригін, К.М. Тиханська, *Вісник НУ «Львівська політехніка», Електроніка* № 482, 152 (2003).
11. М.В. Тиханський, А.І. Партика, *Вісник НУ «Львівська політехніка», Електроніка* № 646, 164 (2009).
12. М.В. Тиханський, А.І. Партика, *Електроніка і зв'язь*, Ч.2., №4-5 11 (2009).

Modeling of commutation processes in Josephson logical elements “AND” and “OR”

M.V. Tyhanskyi and R.R. Krysko

The paper considers a possibility of creating elements of digital logic using Josephson cryotrons. Here described is the principle of digital logic elements “AND” and “OR” created by tunneling «superconductor–insulator–superconductor». Mathematical models of the commutation processes in the logical elements were developed, the basic parameters of these models were determined and the transition characteristics were calculated under changes of the logic state. It is shown that of the elements of digital logic “AND” and “OR” can be realized on individual Josephson cryotrons and of their condition can be controlled with the control inputs in the form of current pulses. Such logic elements satisfy all the requirements for digital logic elements and have switching time of about 2–3 ps.

PACS: **74.50.+r** Tunneling phenomena; Josephson effects;
 85.25.Cp Josephson devices;
 85.25.Hv Superconducting logic elements and memory devices; microelectronic circuits.

Keywords: Josephson cryotron, logical element, the transition characteristics, transition process, process of commutation.