

УДК [621.319.5:538.945](045)

В. М. Кичак, М. Д. Гузь, В. І. Макогон, А. А. Коломієць

ГЕНЕРАТОР ТАКОВИХ ІМПУЛЬСІВ НА БАЗІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ ТА ПЕРЕХОДІВ ДЖОЗЕФСОНА

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Сучасний стан розвитку електронної техніки та стрімкий розвиток безпроводних систем передачі інформації вимагає пошуку нових технологій, які б задовольняли вимоги по збільшенню частоти передачі сигналу. У роботі розкрито ідею роботи генераторів тактових імпульсів як пристроїв цифрової обробки інформації, зокрема побудовано фізичну модель генератора тактових імпульсів на базі переходів Джозефсона. Найбільш перспективним та розповсюдженим у високотемпературних надпровідників матеріалом є з'єднання YBa_2CuO_{7-x} , яке забезпечує можливість формування переходів Джозефсона. Наведено схему генератора тактових імпульсів та зроблено її опис. Зроблено опис лінеаризації функції відгуку напруги двоконтрактного надпровідникового квантового інтерференційного сенсора (НКІС) з представленням розв'язку диференціального рівняння як функції залежності відгуку напруги від часу. На основі запропонованого розв'язку диференціального рівняння досліджено залежність зміни різниці фаз хвильових функцій від параметрів еквівалентної схеми ПД, результати досліджень подано у вигляді графіків.

Ключові слова: генератор тактових імпульсів, перехід Джозефсона, цифрова обробка інформації, високотемпературні надпровідники, квантовий інтерферометр.

Abstract. The current state of development of electronic technology and the rapid development of wireless information transmission systems requires the search for new technologies that would meet the requirements of increasing the frequency of signal transmission. The idea of the operation of clock pulse generators as devices of digital information processing is revealed in the work, in particular the physical model of the clock pulse generator on the basis of Josephson transitions is constructed. The scheme of the clock generator is given and its description is made. The linearization of the two-contact superconducting quantum interference sensors (SQIS) voltage response function is described with the representation of the solution of the differential equation as a function of the voltage response versus time. Based on the proposed solution of the differential equation, the dependence of the change in the phase difference of the wave functions on the parameters of the equivalent PD scheme is investigated, the research results are presented in the form of graphs.

Key words: clock generator, Josephson junction, digital information processing, high temperature superconductors, quantum interferometer.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-53-1-84-90>.

Вступ

Вступ до теми статті. Постійно зростаючі потреби в розширенні смуги робочих частот і підвищення швидкодії безпроводних систем передавання інформації та підвищення чутливості пристроїв приймання та оброблення радіосигналів все важче задовільнити в рамках традиційних технологій з несучими частотами в діапазоні $2 \div 5$ ГГц. Це сприяє проведенню досліджень та розробці пристроїв безпроводного передавання, приймання та оброблення сигналів у терагерцовому діапазоні, застосування якого дає можливість будувати телекомунікаційні системи з надвисокою пропускну здатністю [1, 2].

Актуальність

Серед багатьох технологій, які використовуються в теперішній час для розв'язання цих задач найбільш ефективним є застосування макроскопічних квантових ефектів у надпровідникових структурах.

Це дозволяє створювати високочутливі, швидкодіючі пристрої цифрового оброблення та передавання радіосигналів для сучасних телекомунікаційних систем в міліметровому та субміліметровому діапазоні хвиль [3,4].

Окрім високої чутливості, яка обумовлена низьким рівнем робочих температур, такі пристрої характеризуються вкрай малою енергією перемикавання, яка становить 10^{-18} Дж/біт (для напівпровідникових пристроїв мінімальне значення становить 10^{-13} Дж/біт) та високою швидкістю. Тактові частоти пристроїв на базі низькотемпературної надпровідності можуть становити кілька сотень ГГц, а у випадку високотемпературної надпровідності (в ВТНП) – 1ТГц і більше [5,6].

Одним із важливих елементів пристроїв цифрової обробки інформації є генератори тактових імпульсів, які широко використовуються при побудові аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів сигналів і в багатьох інших системах.

Застосування високотемпературних надпровідників (ВТНП) забезпечує можливість формування джозефсонівських переходів (ПД) з більш високими значеннями характерної частоти, що є важливим для створення джозефсонівських генераторів в терагерцовому діапазоні. Проте, при виготовленні високоякісних ПД з відтворювальними параметрами на базі ВТНП виникає багато проблем, які не дають можливості використовувати традиційні технології, що застосовуються у випадку низькотемпературних ПД. Одним із основних методів, який забезпечує можливість формування ПД з досить високим відтворенням параметрів є використання ВТНП плівки, які вирощуються на бікристалевих підкладках [2, 6]. Проте із-за неоднорідності бікристалевої межі такої структури, використання традиційних зосереджених моделей тут неможливо.

Мета

Тому метою цієї статті є побудова фізичної моделі генератора тактових імпульсів на базі переходів Джозефсона з використанням високотемпературної надпровідності та дослідження його параметрів та характеристик.

Задачі

1. Розробити еквівалентну схему генератора тактових імпульсів з урахуванням резистивної моделі бікристалового переходу Джозефсона на базі високотемпературної надпровідності.
2. Дослідити залежність різниці фаз хвильових функцій та напруги на виході генератора від параметрів резистивної моделі бікристалового переходу Джозефсона.

Розв'язання задач

Найбільш перспективним та розповсюдженим ВТНП матеріалом є з'єднання YBa_2CuO_{7-x} . Епітаксialна плівка ВТНП, вирощена на бікристалевій підкладці є також бікристаловою з такою ж кристалграфічною орієнтацією, а її бікристалова межа характеризується слабкими джозефсонівськими зв'язками.

В праці [7] показано, що фізична модель ДП, сформованого на базі бікристалічної межі двох ВТНП може бути представлена у вигляді двох паралельно ввімкнених індуктивно зв'язаних джозефсонівських елементів, еквівалентну схему яких можна зобразити у вигляді простої резистивної моделі (рис. 1).

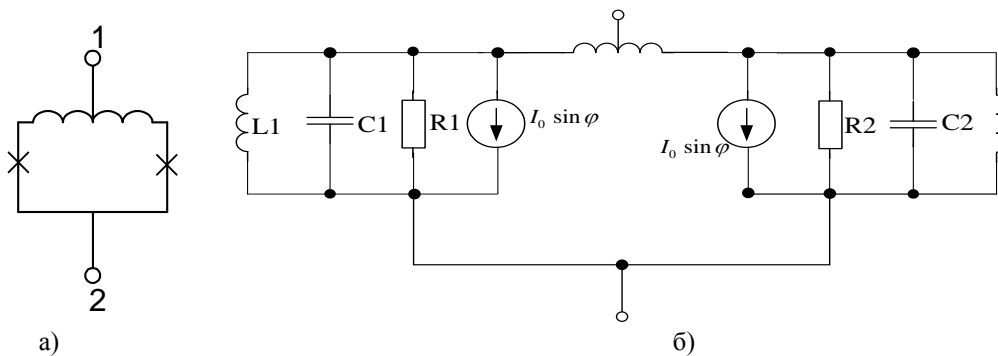


Рисунок 1 – Фізична модель бікристалового ДП (а) і його еквівалентна схема (б)

I_0 – критичний струм ПД; R – динамічний опір тунелювання квазічастинок; C – електростатична ємність ПД L – індуктивність ПД; Ψ – різниця фаз хвильових функцій.

Величина критичного струму залежить від типу надпровідника і його величину можна розрахувати за виразом

$$I_0 = \frac{\Delta}{2g R_n},$$

де R_n – опір переходу в нормальному ненадпровідниковому стані; 2Δ – ширина енергетичної щілини надпровідника.

Відмінність наведеної еквівалентної схеми ПД полягає в тому, що вона враховує індуктивність, величину якої можна розрахувати за виразом [7]

$$L = \frac{h}{2qI_0 \cos \Psi}, \quad (1)$$

Враховуючи, що нанорозмірні переходи на базі ВТНП не потребують зовнішнього шунтування для забезпечення демпфування, принципова схема генератора тактових імпульсів наведена на рис. 2 [8].

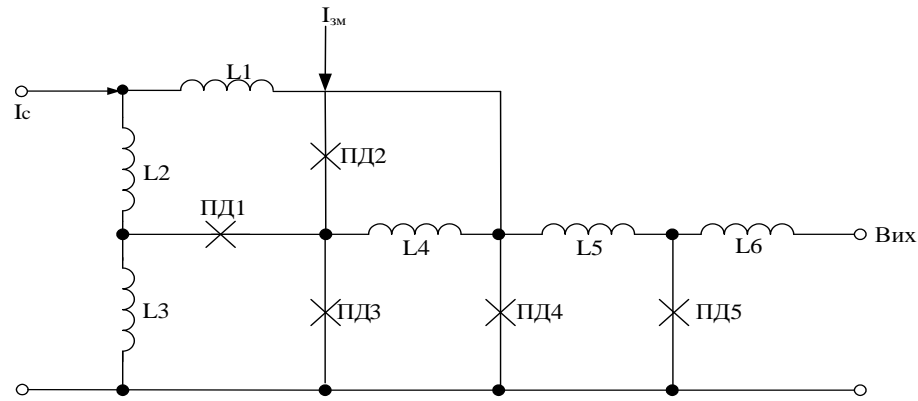


Рисунок 2 – Фрагмент принципової схеми генератора тактових імпульсів

З урахуванням вищевказаного фрагменту фізичної еквівалентної схема генератора наведена на рис. 3.

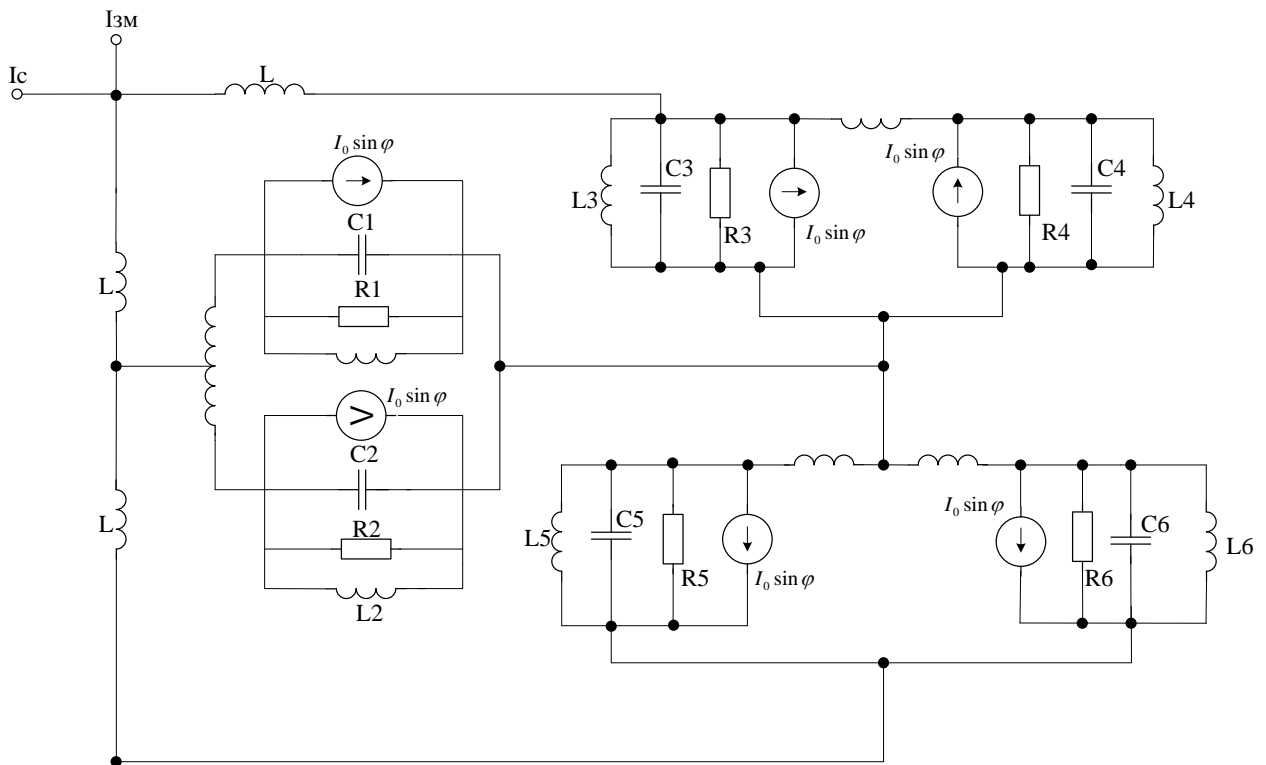


Рисунок 3 – Фрагмент еквівалентної схеми генератора тактових імпульсів на базі ПД

Генератор тактових імпульсів складається із надпровідникового квантового інтерферометра (НКІ) (L3, ПД1, ПД3) та формувача імпульсів (L4, ПД4, L5, ПД5).

Через НКІ пропускається постійний струм, ненабагато менший критичного струму, та струм синхронізації I_c , який визначає частоту та фазу послідовності тактових імпульсів. При передаванні тактових імпульсів по надпровідникових шинах, амплітуда імпульсу зменшується і він розтягується у часі. Для збереження форми імпульсу використовується формувач імпульсів, на який подається струм змищення, величина якого чуть менша критичного струму. Тому, якщо на вхід формування імпульсів поступає "розмитий" тактовий імпульс, то на виході має місце короткий одноквантовий імпульс напруги. В деяких випадках виникає необхідність в розширенні одноквантових імпульсів напруги.

Для розв'язання цієї задачі можуть використовувати методи, запропоновані в праці [9]. Слід відзначити, що надпровідникові квантові інтерференційні сенсори (НКІС) постійного струму, які являють собою надпровідникове кільце з ввімкненими в нього двох ПД (L3, ПД1, ПД3) добре відомі та широко використовуються, як високочутливі перетворювачі магнітного сигналу в напругу. Проте вони характеризуються дуже обмеженою лінійністю відтвореної напруги [9]. У випадку низькочастотних при-

строїв на базі НКІС висока лінійність і значний динамічний діапазон досягається за рахунок введення кола слідкуючого зворотного зв'язку. У випадку міліметрового діапазону хвиль такий зовнішній зворотний зв'язок реалізувати неможливо, тому на схемі, наведеній на рис.2, для реалізації формувачів імпульсів пропонується використовувати бі-НКІС, запропоновані в праці [9].

Для лінеаризації функції відгуку напруги двоконтактного НКІС паралельно основній індуктивності вмикається третій ПД, який завжди перебуває у надпровідниковому стані та грає роль нелінійної індуктивності. Додатково введений ПД і головна індуктивність утворюють однокотактний НКІС, який здійснює нелінійне перетворення магнітного потоку в різницю фаз хвильових функцій ПД, $\Delta\Psi = \Psi_1 - \Psi_2$ двоконтактного НКІС до наступного нелінійного перетворення різниці фаз $\Delta\varphi$ в постійну складову напруги. Таким чином ми отримуємо результуюче лінійне перетворення вхідного сигналу в напругу.

Величину напруги на ПД можна розрахувати за виразом

$$U = \frac{\hbar}{2q} \cdot \frac{d\psi(t)}{dt}, \quad (2)$$

де $\psi(t)$ – різниця фаз хвильових функцій на ПД, яку можна визначити використовуючи рівняння для струму, що протікає через ПД у випадку резистивної моделі (рис.1б).

$$i(t) = I_0 \sin \psi(t) + c \frac{dU(t)}{dt} + GU(t) + L \int_0^t U(t) dt \quad (3)$$

Враховуючи (1) і (2) вираз (3) можна переписати так

$$\frac{I}{I_0} = \sin \psi(t) + \frac{c\hbar}{I_0 2q} \frac{d^2\psi(t)}{dt^2} + \frac{G\hbar}{I_0 2q} \frac{d\psi(t)}{dt} + \frac{\hbar^2}{4q^2 I_0^2 \cos \psi(t)} \psi(t) \quad (4)$$

Для розв'язку рівняння (8) будемо використовувати метод Рунге-Куты та апроксимацію поліномом сьомого порядку. Поліноміальний ряд для розрахунку різниці фаз хвильових функцій має вигляд

$$\varphi(t) = P_0 t^0 + P_1 t^1 + P_2 t^2 + P_3 t^3 + P_4 t^4 + P_5 t^5 + P_6 t^6 + P_7 t^7$$

При розв'язанні цього рівняння використовувались такі вихідні дані $C = 0,01 \cdot 10^{-12}$ Ф, $G=5/7$ См, $I = 2 \cdot 10^{-3}$ А, $I_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ А, $t = 2 \cdot 10^{-12}$ с, $\varphi = 90^\circ$ – початкова фаза.

Розв'язок рівняння має вигляд:

$$\varphi(t) = -0,007911 + 0,008742 \cdot t + 0,053569 \cdot t^2 + (-0,013860) \cdot t^3 + (-0,199074) \cdot t^4 + (-0,606032) \cdot t^5 + (-0,010983) \cdot t^6 + 2,323014 \cdot t^7$$

З використанням такого представлення розв'язку диференціального рівняння досліджено залежність зміни різниці фаз хвильових функцій від параметрів еквівалентної схеми ПД. Результати досліджень наведені на рис. 4, 5 та 6.

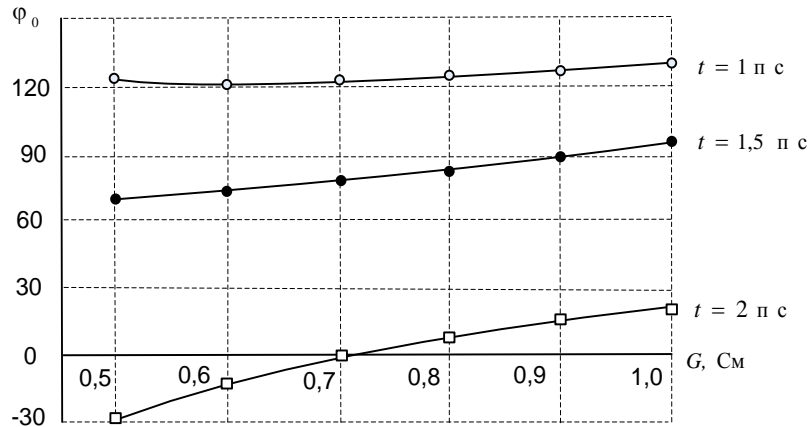


Рисунок 4 – Залежність напруги на переході від динамічного опору переходу Джозефсона

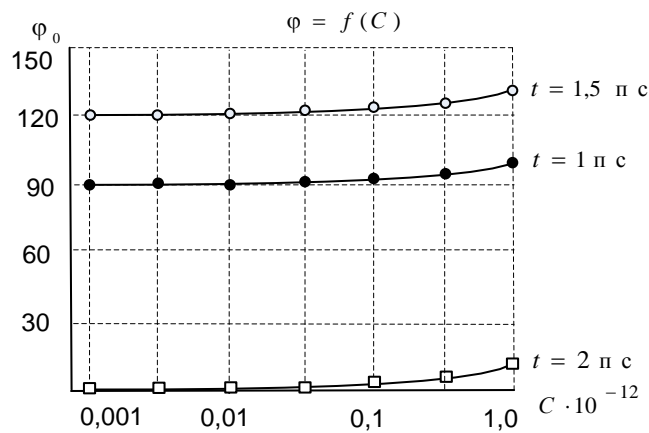


Рисунок 5 – Залежність різниці фаз хвильових функцій від електростатичної ємності

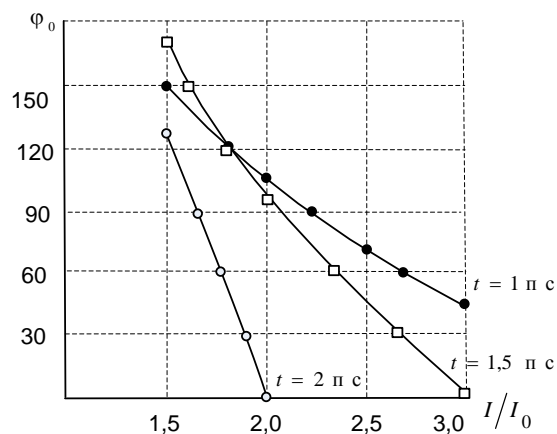


Рисунок 6 – Залежність різниці фаз хвильових функцій від критичного струму

Аналіз результатів показує, що зміна ємності переходу до 0,1 пФ практично не впливає на різницю фаз хвильових функцій, а зміна динамічного опору приводить до значної зміни різниці фаз хвильових функцій. Зміна критичного струму також призводить до значної зміни різниці фаз хвильових функцій, що ще раз підтверджує необхідність врахування індуктивності переходу при розрахунках пристроїв на базі ПД.

На рисунку 7 наведена залежність напруги на переході від нелінійної провідності для різних значень ємності переходу. Як видно із графіків, зменшення ємності переходу приводить до збільшення напруги на переході. Це зумовлено тим, що зменшення ємності приводить до збільшення струму, а, відповідно, і напруги.

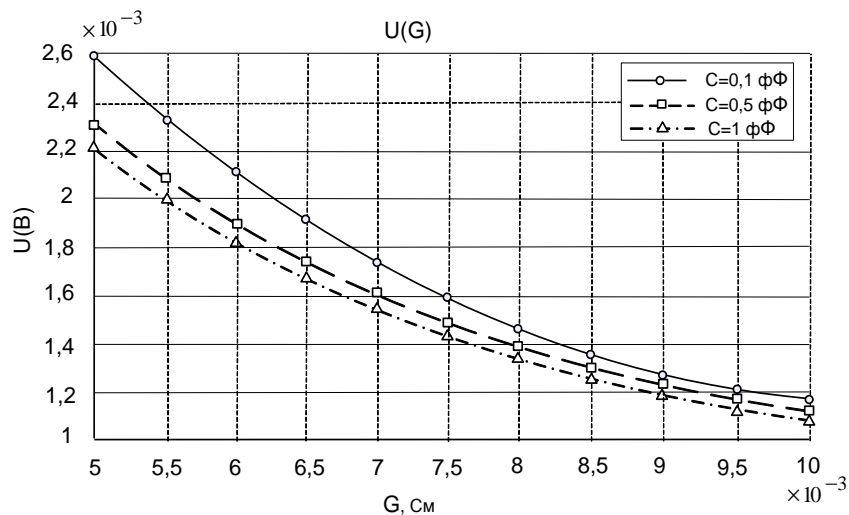


Рисунок 7 – Залежність напруги на переході від нелінійної провідності при різних значеннях ємності

На рисунку 8 наведена залежність напруги на переході Джозефсона від ємності для різних значень диференціальної провідності.

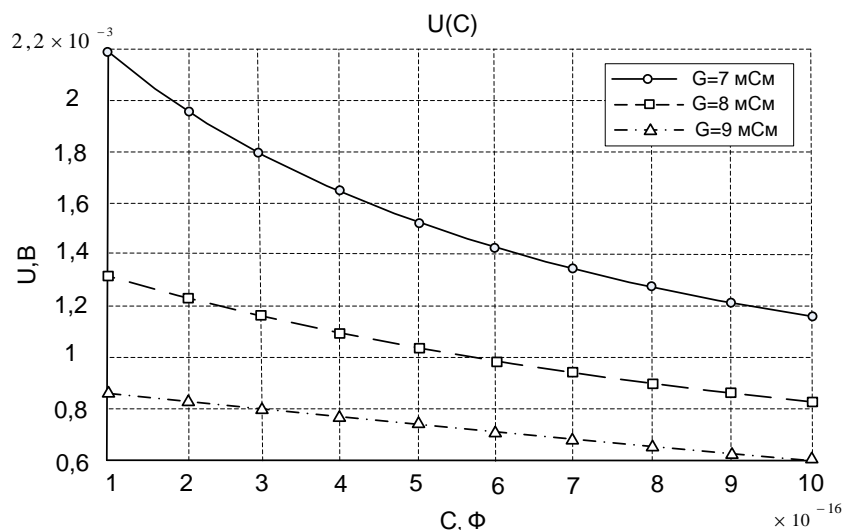


Рисунок 8 – Залежність напруги на переході від ємності переходу

Висновки

1. Запропоновано математичну модель переходу Джозефсона, яка, на відміну від відомих, враховує індуктивність переходу, що дало можливість оцінити її вплив на різницю фаз хвильових функцій і амплітуду вихідної напруги та забезпечує кращу збіжність теоретичних результатів і експериментальних досліджень.

2. З використанням запропонованої моделі проведені розрахунки залежності змінної напруги на переході від параметрів еквівалентної схеми переходу Джозефсона, які показали, що її величина має такий же порядок, як і експериментальні результати, наведені у відомих працях вітчизняних та зарубіжних авторів.

3. Як видно із графіків, при збільшенні ємності напруга зменшується, і тому, при виготовленні переходів Джозефсона, для збільшення напруги необхідно вибирати діелектрики зі значно меншим значенням відносної діелектричної проникності ϵ .

Список літератури

- [1] М. Ю. Ільченко, та С. О. Кравчук, *Телекомунікаційні системи. Монографія*. Київ, Україна: Наукова думка, 2017.

- [2] М. Ю. Торгашин, “Разработка и исследование джозефсоновских генераторов терагерцевого диапазона на основе распределенных туннельных переходов”, дис. канд. наук. Москва, РФ, 2013.
- [3] М. М. Будник, Ю. В. Пустовіт, та О. В. Прокопенко. *Надпровідникова електроніка: Електронний навчальний посібник*. Київ, Україна: ФРЕКС КНУ імені Тараса Шевченка, 2020.
- [4] И. И. Соловьев, “Сверхпроводящие квантовые интерферометры для устройств приема сигнала и обработки информации”, дис. док. наук. Москва, РФ, 2018.
- [5] C. Bell, G. Burnell, C.W. Leung, E. J. Tarte, D.-J. Kang, and M.G. Blamire, *Appl. Phys. Lett.* 84, 1153 (2004).
- [6] К. В. Калашников, А. В. Худченко, А. М. Барышев, и В. П. Кошелец “Гармонический смеситель на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник”, *Радиотехника и электроника*, т.56, №6, с. 755-759, 2011.
- [7] А. В. Арзуманов, “Многоэлементные синхронные джозефсоновские структуры”, дис. канд. физ.-матем. наук, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ, 2003.
- [8] И. Д. Войтович, и В. М. Корсунский, *Нанoeлектронная элементная база информатики. Науч. пособие*. Москва, РФ: БИНОМ, 2013.
- [9] В. К. Корнев, И. И. Соловьев, А. В. Шарафиев, и Н. В. Кленов, *От одно- и двухконтактного сквидов к би-сквиду*. Москва, РФ: Труды МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011.

Стаття надійшла: 20.01.2022.

References

- [1] M. YU. Il'chenko, S.O. Kravchuk. *Telekomunikatsiyini systemy*. Monohrafiya. Kyiv. Naukova dumka. 2017, 736 s. [in Ukrainian].
- [2] M. Yu. Torgashin *Razrabotka i issledovaniye dzhozefsonovskikh generatorov teragertsevykh diapazonov na osnove raspredelennykh tunnel'nykh perekhodov*: dis. kand. nauk M.: 2013, 140 s. [in Russian]
- [3] M. M. Budnyk, YU. V. Pustovit, O. V. Prokopenko. *Nadprovidnykova elektronika: Elektronnyy navchal'nyy posibnyk*. Kyiv, FREKS KNU imeni Tarasa Shevchenka, 2020. 205s. [in Ukrainian].
- [4] I. I. Solov'yev. *Sverkhprovodyashchiye kvantovyeye interferometry dlya ustroystv priyema signala i obrabotki informatsii*. dis. dok-ra nauk. M., 2018, 350 [in Russian].
- [5] C. Bell, G. Burnell, C.W. Leung, E. J. Tarte, D.-J. Kang, and M.G. Blamire, *Appl. Phys. Lett.* 84, 1153 (2004).
- [6] K. V. Kalashnikov, A. V. Khudchenko, A. M. Baryshev, V. P. Koshelets, “Garmonicheskiy smesitel' na tunnel'nom perekhode sverkhprovodnik-izolyator-sverkhprovodnik”, *Radiotekhnika i elektronika*, т.56, №6, с.755-759, 2011 [in Russian].
- [7] A. V. Arzumanov, *Mnogoelementnyye sinkhronnyye dzhozefsonovskiyе структуры: dis. kand. fiz.-matem. nauk*: 01.04.03. MGU im. M.V. Lomonosova. M. RF. 2007, 122 s. [in Russian].
- [8] I. D. Voytovich, V. M. Korsunskiy *Nanoelektronnaya elementnaya osnova informatiki*. Nauch. posobiye M. RF: BINOM, 2013, 643 s. [in Russian].
- [9] V. K. Kornev, I. I. Solov'yev, A. V. Sharafiyev, N. V. Klenov, *От одно- и двухконтактных сквидов к би-сквиду*. M. RF: Trudy MGU im. M. V. Lomonosova, 2011, 17 s. [in Russian].

Відомості про авторів

Кичак Василь Мартинович – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

Гузь Максим Дмитрович – інженер кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

Макогон Віталій Іванович – кандидат технічних наук, асистент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

Коломієць Альона Анатоліївна – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри вищої математики.

V. M. Kychak, M. D. Huz, V. I. Makohon, A. A. Kolomiets

GENERATOR OF TACTICAL IMPULSES ON THE BASIS OF THE HIGH – TEMPERATURE NUCLEAR VOLTAGE OF JOSEPHSON JUNCTIONS

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia