

**РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ**

УДК 621.317

**В. М. Кичак<sup>1</sup>**  
**В. В. Кичак<sup>1</sup>****ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЩІЛЬНОСТІ  
ФЛУКТУАЦІЙ СТРУМУ НА ШИРИНУ ЛІНІЇ ГЕНЕРАЦІЇ  
ПЕРЕХОДУ ДЖОЗЕФСОНА**<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Досліджено вплив низькочастотної та високочастотної спектральних щільностей флуктуацій струму звичайних електронів та куперівських пар на ширину лінії генерації генератора на базі одиночного переходу Джозефсона (ПД).*

*Розглянута можливість зменшення ширини лінії генерації та підвищення вихідної потужності за рахунок оптимального розміщення кількох ПД в мікросмужковій надпровідній лінії (МСНЛ) та досліджено вплив кін електродинамічного зв'язку на ширину лінії генерації. Показано, що вибір оптимального розміщення ПД в МСНЛ та підбір параметрів кін електродинамічного зв'язку дає можливість підвищити потужність майже в 4 рази та зменшити ширину лінії генерації майже на порядок, при вмиканні 4 та 6 ПД в МСНЛ.*

**Ключові слова:** перехід Джозефсона, ширина лінії генерації, надпровідність, спектральна щільність флуктуацій.

**Вступ та постановка задачі досліджень**

Постійно зростаючі потреби в розширенні смуги робочих частот і підвищенні швидкодії безпровідних систем передачі даних все складніше забезпечувати в рамках традиційних технологій з несучими частотами в діапазоні 2...20 ГГц (Wi-Fi, Wi-Max, 3G, LTE), що підштовхує дослідників до розробки пристроїв безпровідної передачі даних в терагерцовому діапазоні хвиль [1].

Серед багатьох конкуруючих технологій найбільшою чутливістю характеризуються приймачі на базі надпровідників та (ПД), які являють собою джерела електромагнітних коливань в діапазоні хвиль від міліметрового до інфрачервоного, що здатні перелаштовуватись по частоті шляхом зміни напруги. Низька робоча температура таких пристроїв знижує теплові шуми, а вкрай висока нелінійність, характерна всім надпровідним детекторам, забезпечує високу квантову ефективність.

Одним з основних елементів таких систем передачі даних є генератори сигналів.

Головними перевагами генераторів на базі ПД є широкий діапазон перелаштування, обмежений лише діапазоном частотного узгодження генератора та навантаження, низьке енергоспоживання та можливість їх виготовлення в єдиному технологічному циклі на одній підкладці з антеною та змішувачем частот на ПД.

Тому, при розробці таких генераторів важливим є оцінювання впливу спектральної щільності флуктуацій струму на ширину лінії генерації, яка значною мірою визначає його нестабільність. Дослідження залежності ширини лінії генерації від флуктуацій струмів розглянуто в роботах [2, 3]. Проте, в них увагу приділено переважно залежності ширини лінії генерації від низькочастотної спектральної щільності флуктуацій струмів. Завданням цієї роботи є створення методу моделювання впливу низькочастотної та високочастотної спектральних щільностей флуктуацій струму звичайних електронів і куперівських пар на ширину лінії генерації та дослідження можливих шляхів її зменшення, а також підвищення вихідної потужності.

**Розв'язання задачі**

Як відомо[2], ширина лінії генерації для одноелементної джозефсонівської структури визначається за залежністю

$$\Delta f = \frac{1}{2} \left( \frac{2e}{\hbar} \right)^2 S_V(0).$$

Спектральна щільність низькочастотних флуктуацій напруги  $S_V(0)$  залежить від диференціального опору переходу Джозефсона в робочій точці та ефективної спектральної щільності низькочастотних флуктуацій струму

$$S_V(0) = R_d^2 S_I^*(0).$$

Диференціальний опір  $R_d$  в робочій точці можна розрахувати, враховуючи вираз для напруги на переході [4].

Ефективна спектральна щільність низькочастотних флуктуацій струму для випадку резистивної моделі ПД визначається за виразом

$$S_I^x(0) = S_I(0) + \left( \frac{I_0^2}{2I^2} \right) S_I(\omega), \quad (1)$$

де  $S_I(0)$  і  $S_I(\omega)$  — відповідно, низькочастотна та високочастотна спектральні щільності флуктуацій струму.

Визначимо високочастотну спектральну щільність флуктуацій струму.

Оскільки, через ПД тече струм як звичайних електронів, так і куперівських пар, то спектральну щільність флуктуацій цих струмів можна розрахувати за формулами

$$S_{in}(\omega) = 2q(I_{n1} + I_{n2});$$

$$S_{ip}(\omega) = 4q(I_{p1} + I_{p2}),$$

де  $I_{n1}, I_{n2}$  — струми звичайних електронів;  $I_{p1}, I_{p2}$  — струми куперівських пар.

Тут передбачається, що обидва струми можуть протікати через ПД в обох напрямках. Якщо врахувати ймовірність проходження носіїв заряду через ПД, то величину струмів можна розрахувати так:

$$I_{n1} + I_{n2} = I_n \operatorname{cth} \left( \frac{qU}{KT} \right);$$

$$I_{p1} + I_{p2} = I_p \operatorname{cth} \left( \frac{qU}{KT} \right), \quad (2)$$

де  $U$  — напруга на ПД;  $T$  — абсолютна температура;  $K$  — постійна Больцмана.

З урахуванням (2) спектральну щільність повного струму можна розрахувати за виразом:

$$\overline{S_I(\omega)} = \overline{S_{I_n}(\omega)} = \overline{S_{I_p}(\omega)} = 2qI \operatorname{cth} \left( \frac{qU}{2KT} \right) + 4qI \operatorname{cth} \left( \frac{qU}{KT} \right).$$

У випадку, коли ПД формуються на базі низькотемпературних надпровідників, можна вважати, що виконується умова  $qU \gg KT$ , тоді функція  $\operatorname{cth}$  прямує до 1 і вираз для спектральної щільності повного струму має вигляд

$$\overline{S_I(\omega)} = 2qI_n + 4qI_p = 2q(I_n + 2I_p). \quad (3)$$

У випадку застосування високотемпературних надпровідників виконується умова  $qU \ll KT$  і тому функція  $\operatorname{cth}$  апроксимується функцією зворотною її аргументу, а спектральна щільність повного струму визначається за виразом

$$\overline{S_I(\omega)} = 4KT \frac{I}{U}.$$

Для розрахунку низькочастотної спектральної щільності флуктуацій струму  $S_I(0)$  будемо використовувати вираз, наведений в роботі [3]

$$S_I(0) = \frac{1}{\pi U} \left[ KTI_n + \frac{hf}{2} \operatorname{cth} \frac{eU}{KT} \right] I_p, \tag{4}$$

де  $K$  — постійна Больцмана;  $f$  — частота;  $I_n, I_p$  — нормальна та надпровідна складові струму.

Підставляючи (4) і (3) в (1), отримаємо для випадку низькотемпературних надпровідників вираз для ширини лінії генерації у вигляді:

$$\Delta f = \frac{1}{2} \left( \frac{2e}{\hbar} \right)^2 R_D^2 \left\{ \frac{1}{\pi U} \left[ KTI_n + \frac{hf}{2} \operatorname{cth} \frac{eU}{KT} I_p \right] + \left( \frac{I_0^2}{2I^2} \right) 2q(I_n + 2I_p) \right\}. \tag{5}$$

У випадку високотемпературних надпровідників необхідно врахувати (2) і тоді вираз для ширини лінії генерації можна записати так:

$$\Delta f = \frac{1}{2} \left( \frac{2e}{\hbar} \right)^2 R_D^2 \left\{ \frac{1}{\pi U} \left[ KTI_n + \frac{hf}{2} \frac{KTI_S}{eU} I_p \right] + \left( \frac{I_0^2}{2I^2} \right) \frac{4KT(I_n + 2I_p)}{U} \right\},$$

де 
$$R_D = \frac{dU}{dI} = \frac{d}{dI} \left( \frac{RI_0 a^{-1} B}{(a^{-2} + 1) \cos^2 A + a^{-2} B \sin^2 A + 2a^{-2} B^{1/2} \sin A \cos A} \right), \tag{6}$$

$$\alpha = \frac{I}{I_0}, \quad b = \alpha^2 - 1, \quad A = \sqrt{\alpha^2 - 1} \cdot \eta(t - t_0), \quad \eta = \frac{qRI_0}{h}.$$

З використанням виразів (5) і (6) розрахована залежність ширини лінії генерації від струму, що протікає через ПД, опору навантаження та шунтуючого опору. Результати розрахунків наведені на рис. 2.

Аналіз отриманих результатів показує, що ширина лінії генерації становить десятки і навіть сотні МГц, тому виникає необхідність зменшувати її ширину.

Крім того, необхідно підвищувати потужність сигналів, оскільки в ряді пристроїв широко використовуються розгалужувачі, що приводять до зменшення рівня сигналів та ускладнює їх обробку.

З метою зменшення ширини лінії генерації та підвищення вихідної потужності, пропонується використовувати багатоелементні синхронні джозефсонівські структури. Різні типи таких структур розглянуті у працях [2, 3, 5, 6].

Проте, у відомих працях, не розглянуто вплив кіл електродинамічного зв'язку на ширину лінії генерації, при застосуванні двоконтактної структури з  $LR$  — колом зв'язку [2, 5].

Для дослідження такого генератора будемо використовувати резистивну модель ПД. З урахуванням цього, побудуємо еквівалентну схему генератора, яка зображена на рис. 3.

Параметри елементів еквівалентної схеми вибирались таким чином:

$$L_{\Pi} = \frac{h}{2el}; \quad L \approx L_{\Pi} = \frac{\hbar}{2qI_0}; \quad R_{\Pi} = \frac{dU}{dI}; \quad R \approx R_{\Pi};$$

$$C = \frac{\beta G}{\omega_0}; \quad \omega_0 = \frac{2g I_0}{\hbar G}; \quad \beta = \frac{\omega_0 C}{G} = 1.$$

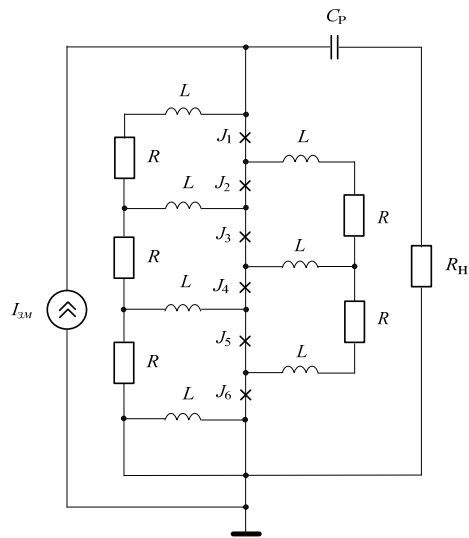


Рис. 1. Генератор на базі двоконтактної джозефсонівської структури

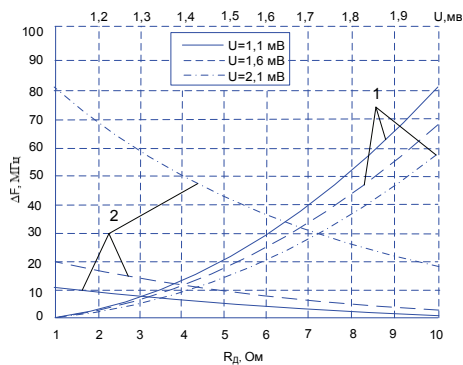


Рис. 2. Залежність ширини лінії генерації від динамічного опору та напруги на переході Джозефсона :  
1 —  $\Delta f = f(R)$ ; 2 —  $\Delta f = f(U)$

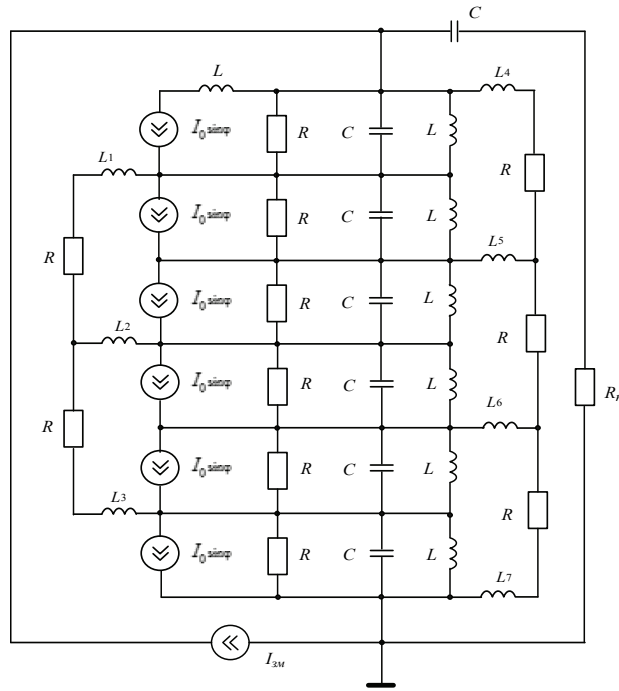


Рис. 3. Еквівалентна схема генератора на базі двоконтактної джозефсонівської структури

Дослідження проводились з використанням програмного пакету PASCN та надпровідного схемотехнічного редактора і симулятора «WinS». Оцінювався вплив кінг електродинамічного зв'язку на величину вихідної потужності та ширину лінії генерації. В цьому випадку допускалось, що всі ПД характеризуються абсолютно однаковими параметрами, а параметри кінг електродинамічного зв'язку вибирались за умови, що,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_n$ ,  $L_1 = L_2 = L_3 = L_n$ ,  $L_4 = L_5 = L_6 = L_7 = L_n$ . Результати досліджень показані на рис. 4, 5.

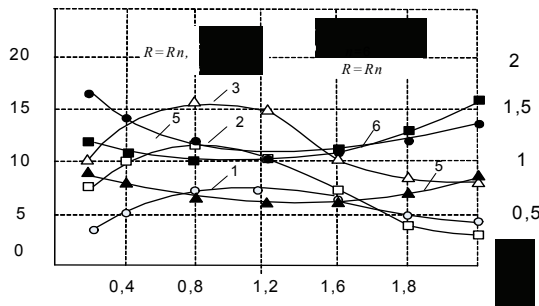


Рис. 4. Залежності вихідної потужності від величини індуктивності кінг електродинамічного зв'язку: 1 —  $\frac{L_4}{L_n} = 0,8$ ; 2 —  $\frac{L_4}{L_n} = 1,0$ ; 3 —  $\frac{L_4}{L_n} = 1,2$  та приведеної ширини лінії генерації від індуктивностей кінг зв'язку: 4 —  $\frac{L_4}{L_n} = 0,8$ ; 5 —  $\frac{L_4}{L_n} = 1,0$ ; 6 —  $\frac{L_4}{L_n} = 1,2$

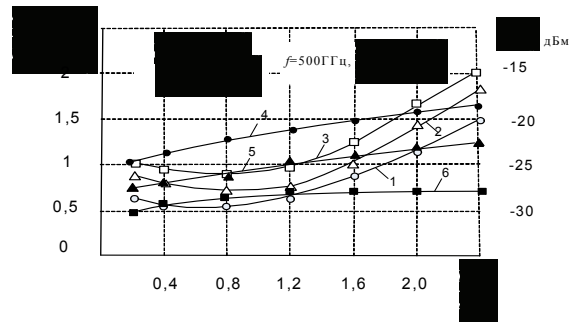


Рис. 5. Залежність ширини лінії генерації від активного опору кола електродинамічного зв'язку: 1 —  $\frac{R_4}{R_n} = 1,0$ ; 2 —  $\frac{R_4}{R_n} = 1,6$ ; 3 —  $\frac{R_4}{R_n} = 2$  та вихідної потужності від активного опору кола електродинамічного зв'язку: 4 —  $\frac{L_1}{L_n} = 1,2$ ; 5 —  $\frac{L_1}{L_n} = 1,0$ ; 6 —  $\frac{L_1}{L_n} = 0,8$

Аналіз отриманих результатів показує, що максимальне значення потужності можна отримати коли індуктивності кінг зв'язку  $L_1 \dots L_3$  дорівнюють індуктивності переходу Джозефсона (рис. 4) і індуктивності  $L_4 \dots L_7$  приблизно дорівнюють  $1,2L_n$  (рис. 4, 5). Збільшення активних опорів кінг електродинамічного зв'язку приводить до збільшення вихідної потужності, яка виділяється на опорі навантаження (рис. 5). Це зумовлено тим, що зі збільшенням опорів, величина струму, що тече в колах зв'язку, зменшується, а тому, збільшується струм, який тече в колі навантаження, за

рахунок зменшення коефіцієнта відбиття, що зумовлено кращим узгодженням виходу генератора з хвильовим опором МСНЛ. Ширина лінії генерації досягає мінімального значення, коли індуктивності кіл електродинамічного зв'язку знаходяться в межах від  $0,8L_n$  до  $1,2L_n$ . Зі зростанням активних опорів кіл електродинамічного зв'язку ширина лінії генерації зростає (рис. 5).

Порівняння отриманих результатів, з показаними на рис. 1, вказує на те, що збільшення кількості переходів до 6 приводить до зменшення ширини лінії генерації приблизно в 5—6 разів. Дослідження залежності ширини лінії генерації та вихідної потужності від критичного струму та динамічного опору показують, що у разі зміни індуктивності кіл електродинамічного зв'язку в межах від  $0,8L_n$  до  $1,2L_n$  зміна критичного струму та динамічного опору в межах 20 % не приводить до значної зміни ширини лінії генерації.

### Висновки

1. Проведено моделювання впливу флуктацій струму на ширину лінії генерації переходу, який враховує вплив низькочастотної та високочастотної спектральних щільностей струмів звичайних електронів та куперівських пар, дає можливість адекватно оцінити вплив флуктацій на ширину лінії генерації для одиночного переходу.

2. Проведено дослідження впливу параметрів кіл електродинамічного зв'язку та їх розміщення на вихідну потужність та ширину лінії генерації. Показано, що вибір оптимального розміщення ПД в МСНЛ та підбір параметрів кіл електродинамічного зв'язку дає можливість підвищити потужність майже в 4 рази та зменшити ширину лінії генерації майже на порядок, при вмиканні 4 та 6 переходу Джозефсона в мікросмужковій надпровідній лінії.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Филлипенко Л. В. Интегральные сверхпроводниковые приемные структуры на основе высококачественных туннельных переходов : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Л. В. Филлипенко. — М., 2009.
2. Арзуманов А. В. Многоэлементные синхронные джозефсоновские структуры : дис.. канд. физ.-мат. наук / А. В. Арзуманов. — М. : МГУ, 2007.
3. Торгашин М. Ю. Разработка и исследование джозефсоновских генераторов терагерцового диапазона на основе распределенных туннельных переходов : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.03 / М. Ю. Торгашин ; ИРЕ РАН им. В. М. Котельникова. — М., 2013. — 140 с.
4. Генератори допоміжних сигналів на базі переходів Джозефсона / [В. М. Кичак, М. Д. Гузь, В. В. Кичак, А. В. Вергелюк] // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». — Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». — 2014. — № 57. — С. 121—127.
5. Сверхпроводниковые джозефсоновские структуры с высокой линейностью преобразования магнитного сигнала в напряжение / [И. И. Соловьев, В. К. Корнев, Н. В. Кленов, О. А. Муханов] // ФТТ. — 2010. — № 52. — С. 11.
6. First In-Field Application of a Full Photonic local Oscillator to Terahertz Astronomy / Mayorga I. C., Schmitz A., Klein T., Leinz C., Gusten R. // IEEE Trans. THz Sci. and Tech. — 2012. — Vol. 2. — No. 4. — P. 393—399.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем і телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.10.2015

**Кичак Василь Мартинович** — д-р техн. наук, професор, декан факультету радіотехніки, зв'язку та приладобудування, e-mail: vvkychak@gmail.com;

**Кичак Володимир Васильович** — старший викладач кафедри телекомунікаційних систем і телебачення. Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. M. Kychak<sup>1</sup>  
V. V. Kychak<sup>1</sup>

## Estimation of Current Fluctuation Spectral Density Impact on Josephson Junction Generation Line Width

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*Impact of low-frequency and high-frequency current fluctuation spectral density of ordinary electrons and a Cooper pair on single Josephson junction generation line width has been researched.*

*An opportunity to reduce the generation line width and to increase output power due to optimal allocating several Josephson junctions in a microstrip superconducting line has been considered. Influence of electrodynamic coupling circuits on the generation line width has been examined. It has been shown that a choice of Josephson junctions optimal allocation in microstrip superconducting line and electrodynamic coupling circuit parameter selection permitted to increase power almost in 4 times and to reduce the generation line width almost by an order when putting 4 and 6 Josephson junctions in the microstrip superconducting line.*

**Kychak Vasyl M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Dean of the Department of the Radio Engineering, Connection and Instrument-making;

**Kychak Volodymyr V.** — Senior Lecturer of the Chair of Telecommunication Systems and Television

**В. М. Кичак<sup>1</sup>**  
**В. В. Кичак<sup>1</sup>**

## **Оценка влияния спектральной плотности флуктуаций тока на ширину линии генерации перехода Джозефсона**

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Проведено исследование влияния низкочастотной и высокочастотной спектральных плотностей флуктуаций тока обычных электронов и куперовских пар в ширину линии генерации генератора на базе единичного перехода Джозефсона (ПД).*

*Рассмотрена возможность уменьшения ширины линии генерации и повышения выходной мощности за счет оптимального размещения нескольких ПД в микрополосовой сверхпроводящей линии (МСНЛ) и исследовано влияние цепей электродинамической связи на ширину линии генерации. Показано, что выбор оптимального размещения ПД в МСНЛ и подбор параметров цепей электродинамической связи дает возможность повысить мощность почти в 4 раза и уменьшить ширину линии генерации почти на порядок, при включении 4 и 6 перехода Джозефсона в микрополосовой сверхпроводящей линии.*

**Ключевые слова:** переход Джозефсона, ширина линии генерации, сверхпроводимость, спектральная плотность флуктуаций.

**Кичак Василий Мартынович** — доктор технических наук, профессор, декан факультета радиотехники, связи и приборостроения, e-mail: vvkychak@gmail.com;

**Кичак Владимир Васильевич** — старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и телевидения