

УДК 621.396.6

[https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3\(31\).51-58](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3(31).51-58)

**О. І. ФИК**, доктор технічних наук, доцент  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6735-6229>  
(Національна академія Національної гвардії України, м. Харків)

**Д. Б. КУЧЕР**, доктор технічних наук, професор  
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>

**Л. В. КУЧЕР**, кандидат технічних наук  
<https://orcid.org/0000-0002-4873-1270>  
(Інститут Військово-Морських Сил Національного університету "Одеська морська академія", м. Одеса)

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕМИКАННЯ НА ОСНОВІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАДПРОВІДНИКА

Результати експериментальних досліджень, викладених у відомих роботах, засвідчили, що у високотемпературному надпровіднику під дією вхідного НВЧ-сигналу, коли створюється магнітне поле, рівень якого перевищує пороговий ( $H > H_{кр2}$ ), відбувається фазовий перехід надпровідника з надпровідного  $S$  в нормальний (резистивний) стан  $N$  (так званий процес перемикавання (переключення)). Встановлено, що можливо управляти амплітудно-частотною характеристикою надпровідника напругою або струмом, що протікає. Тобто, можливо будувати перемикачі-обмежувачі на основі надпровідників, які знайдуть застосування у антенах, вхідних колах охолоджуваних надвисокочастотних трактів тощо.

Найбільш практичними є пристрої на основі високотемпературних надпровідників, тому що їх робоча температура – це температура рідкого азоту, а швидкість перемикавання становить менше 1 наносекунди. Однак, використання надпровідних систем потребує врахування питань сумісності їх зі штатними пристроями та урахування іншої низки особливостей будови НВЧ систем. Тобто, є сенс спершу окремо проаналізувати функціонування таких перемикачів, а потім в структурі будови штатної НВЧ системи.

У статті проводиться дослідження властивостей лише окремих перемикачів (фільтрів вимикачів та обмежувачів) на основі високотемпературних надпровідних тонких плівок з метою вироблення принципів та критеріїв, які можуть бути основою здійснення автоматизованого проектування розглянутих швидкодіючих надпровідних НВЧ-пристроїв.

Для вирішення поставленої розрахункової задачі використовується алгоритм аналізу резонансних систем комутації та визначаються відповідні параме-

три та критерії: коефіцієнти пропускання, модуляції, загасання; параметр якості; резонансні характеристики (частота, смуга, добротність).

Результати розрахунків свідчать про необхідність застосування в сучасних НВЧ системах високотемпературних надпровідних швидкодіючих широкосмужових пристроїв (фазообертачів, обмежувачів, ліній затримки, комутаторів, тощо), що дозволить зменшити втрати енергії в приймально-передавальному тракті, збільшити швидкість управління променем антени в просторі, збільшити відношення сигнал-шум, підвищити захисні властивості прийомних трактів від електромагнітної поразки.

У статті приведені результати розрахунків характеристик перемикачів, виконаних на основі надпровідникових мікрополоскових ліній передачі. Показана можливість побудови швидкодіючих (час спрацьовування менше одиниць наносекунд) перемикачів на основі надпровідності плівок в діапазоні частот 1 – 10 ГГц з часовими (швидкодія спрацьовування, часвідновлення) енергетичними параметрами (енергії переключення  $10^{-10}$  Дж) та резонансними характеристиками (частота, смуга, добротність), які значно кращі відповідних параметрів аналогічних пристроїв на основі напівпровідників.

**Ключові слова:** надпровідник, мікрополоскова лінія, резонатор, приймач, коефіцієнт пропускання, коефіцієнт модуляції, коефіцієнт загасання, напівпровідник.

### ВСТУП

Результати експериментальних досліджень [1] засвідчили, що у високотемпературному надпровіднику під дією вхідного НВЧ-сигналу, коли створюється магнітне поле, рівень якого перевищує пороговий ( $H > H_{кр2}$ ), відбувається фазовий перехід надпровідника з надпровідного  $S$  в нормальний (резистивний) стан  $N$  (так званий процес перемикавання (переключення)). Встановлено, що можливо управляти амплітудно-частотною характеристикою надпровідника напругою або струмом, що протікає. Тобто, можливо будувати швидкодіючі (час спрацьовування менше одиниць наносекунд) перемикачі-обмежувачі електромагнітної енергії на основі високотемпературних надпровідників, які можна застосовувати у антенах, вхідних колах охолоджуваних надвисокочастотних трактів тощо.

Аналіз процесів швидкісного переходу високотемпературного надпровідника з надпровідного ( $S$ -стан) в резистивний стан ( $N$ -стан) у надвисокочастотному діапазоні частот доводить, що можливо будувати антенно-фідерні пристрої на надпровідниках, які з одного боку забезпечують високе відношення сигнал – завада, а з іншого боку можуть діяти як швидкодіючий вимикач сигналу, що спрацьовує при проходженні потужного електромагнітного сигналу (природного або штучного походження). Проблема є комплексною і одним з її важливих недоліків є забезпечення узгодження надпровідної частини тракту та штатних НВЧ-систем, крім того, важливим є забезпечення охолодження надпровідникової частини тракту. Однак, перелічені проблеми зараз вже вирішуються [1], тому актуальним є визначення параметрів та діапазону їх змінювання при функціонуванні надпровідникових сис-

тем-фільтрів, які можуть значно обмежувати вплив через антену на приймальну систему потужного електромагнітного імпульсу як природного, так і штучного походження.

### ОГЛЯД ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Визначенню аспектів, спрямованих на ефективну реалізацію функції переключення (обмеження) на основі застосування надпровідникових технологій, пов'язаних із процедурами вибору, обґрунтуванню необхідності їх застосування та аналізу організації переключення (обмеження) в НВЧ-системах, присвячено роботу [1]. Перспективами їх подальших досліджень є пошук нових, максимально ефективних способів параметричного опису процесу електромагнітного переключення, вдосконалення систем фільтрації широкосмугових сигналів на основі покращення реалізації функції надпровідників щодо обмеження (виключення) паразитних позасмугових сигналів або блокування (виключення) проходження потужних електромагнітних уражаючих впливів на приймач, виявлення нових напрямів і підходів до розвитку надвисокочастотних надпровідних систем (фільтри, фазообертачі, лінії затримки, атенюатори, тощо) [3 – 5].

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Результати аналізу сучасного стану досліджень у сфері використання високотемпературних надпровідників [1 – 5] доводять, що можливо побудувати резонатори високої ненавантаженої добротності. Так, завдяки переходу елементів фільтра з надпровідного в нормальний стан (так зване  $S \rightarrow N$  переключення) можливо управляти амплітудно-частотною характеристикою.  $S \rightarrow N$  переключення може створюватись як управляючим впливом (транспортний струм, магнітне поле, лазерне випромінювання), так і НВЧ сигналом, рівень якого перевищує критичне значення. Такі властивості надпровідника дозволяють розроблювати на їх основі фільтри-вимикачі (ФВ) та фільтри-обмежувачі (ФО), які можуть використовуватись у вхідних колах охолоджувальних приймачів.

На думку спеціалістів, важливою перевагою таких пристроїв є можливість практичного використання таких швидкодіючих надпровідних широкосмугових фільтрів в сучасних електромагнітночутливих НВЧ-системах за рахунок використання дешевої азотної системи охолодження або сучасних систем сходиноквого охолодження, які основані на ефекті Пелтьє [2, 4].

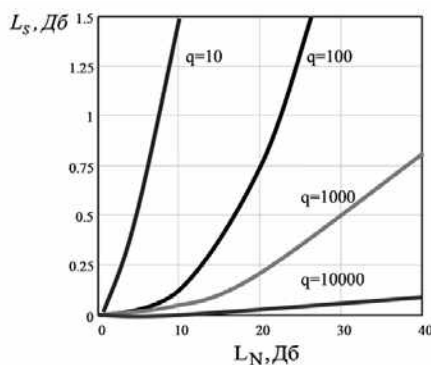


Рис. 1. Ослаблення в  $S$ -стані для різних значень  $q$

Загалом, можна стверджувати, що рішення проблеми визначення системи параметрів, які дозволять якісно охарактеризувати процес перемикання надпровідникового пристрою – це головна складова автоматичного проектування та процесу налагодження промислового виготовлення фільтрів обмежувачів не тільки для космічних систем, де система охолодження не потрібна, а і для штатних НВЧ систем як цивільного, так і військового значення, де можна використовувати як азотну систему охолодження, так і системи охолодження, основані на ефекті Пелтьє.

Метою статті є вибір системи параметрів, які можливо використовувати при побудові ФО та ФВ на основі високотемпературного надпровідника, та визначити напрямки застосування ФО та ФВ у системі електромагнітного захисту приймальних систем.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Рациональний вибір параметрів та діапазону їх значень, які пропонується використовувати при побудові ФО і ФВ на основі високотемпературного надпровідника забезпечує ефективний захист приймальних систем від електромагнітного ураження через антенний тракт.

**Параметри надпровідного мікрополоскового резонатора як добротного перемикача-обмежувача**

Функціонування будь-якого вимикача характеризують сукупністю параметрів [1]:

$$m = \frac{|T_N| - |T_S|}{|T_N| + |T_S|}; \quad (1)$$

$$q = \frac{|T_N|^{-1} - 1}{|T_S|^{-1} - 1}; \quad (2)$$

$$\bar{L} = -20 \lg \frac{|T_N| + |T_S|}{2}, \quad (3)$$

де  $|T_S|$  і  $|T_N|$  – модулі коефіцієнтів пропускання надпровідника для  $S$  і  $N$  станів перемикання елементів фільтрів.

Параметр  $q$  є параметром комутаційного співвідношення,  $m$  – коефіцієнт модуляції, а  $L$  – середнього ослаблення. На рис. 1 наведені залежності ослаблення в  $S$ -стані  $L_S = -20 \lg |T_S|$  для різних значень параметру  $q$ . На рис. 2 показані залежності  $m(q)$  (суцільні криві) і  $L(q)$  (штрихові) для  $L_S = 0,25; 0,5; 1,0$  і  $1,5$  дБ (криві 1 – 4 відповідно). Для ідеальних вимикачів величина  $m=1$ , а  $L=6$  дБ, що реалізується лише при  $|T_S|=1$  і  $q \rightarrow \infty$ .

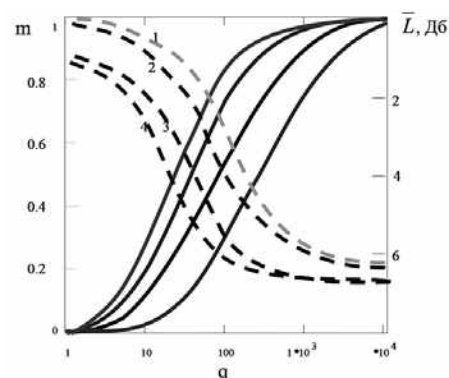


Рис. 2. Залежності  $m(q)$  (суцільні криві) і  $L(q)$  (штрихові) для  $L_S = 0,25; 0,5; 1,0$  і  $1,5$  дБ

Ключові елементи в НВЧ-пристроях характеризуються параметром якості  $K$ , який визначається виразом

$$K + \frac{1}{K} = \frac{r_1}{r_2} + \frac{r_2}{r_1} + \frac{(x_2 - x_1)^2}{r_1 r_2}, \quad (4)$$

де  $r$  і  $x$  – активна і реактивна складові імпедансу для двох положень ключа з зосередженими параметрами [2]. Можна показати, що в оптимізованій за значеннями  $[TS]$  і  $[TN]$  конструкції вимикача виконуються співвідношення:  $q=K$  [3].

Оцінимо досяжні значення  $K$  для плівкового надпровідного ключа. Максимальним співвідношенням НВЧ-поверхневих опорів  $R$  в  $N$  і  $S$  станах  $\alpha=R_N/R_S$  характеризуються плівки з товщиною  $d \leq \lambda_L$  ( $\lambda_L$  – лондонівська глибина проникнення). Для таких плівок  $\alpha \sim (\delta_{ck}/\lambda)^4$ , де  $\delta_{ck}$  – скін-глибина проникнення поля в  $N$  стані. На рис. 3 наведені експериментальні частотні залежності  $R_N$  і  $R_S$  для плівки  $YBa_2Cu_3O_7$  з товщиною  $d=200$  нм на підкладці з  $MgO$  (криві  $S$  і  $N$ ).

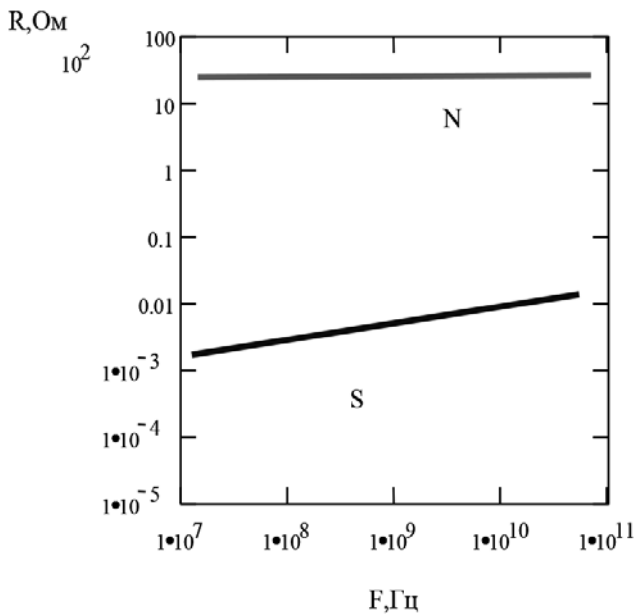


Рис. 3. Частотні залежності поверхневого опору  $R$  в  $S$  і  $N$  станах для плівки  $YBa_2Cu_3O_7$

Криві  $S$  і  $N$  належать до температури  $T=20,65$  і  $100$  К. Слід відмітити, що  $R_S \sim \omega^{0,6}$  для плівки  $YBa_2Cu_3O_7$ , що пов'язано з наявністю включень з фазою нормальної провідності [1].

Можна показати, що параметр якості ключа  $K$  на основі надпровідникової плівки з товщиною  $d \ll \lambda$  практично збігається з  $\alpha$ . Для ключів на основі р-і-п діодів  $K \sim 10^3$  на частоті  $10$  ГГц і  $K < 10^2$  на частотах вище  $24$  ГГц [5]. Враховуючи експериментальні результати, наведені на рис. 3, можна зробити висновок, що в міліметровому діапазоні довжин хвиль для плівок  $YBa_2Cu_3O_7$  показник якості  $K \sim 10^2$ .

Оцінимо досяжні значення добротностей ненавантажених кіл в  $S$ -стані для можливих реалізацій резонаторів в НВЧ-діапазоні. На частоті  $f \sim 1$  ГГц найбільш зручний резонатор (рис. 4) на основі коротких (порівняно з довжиною хвилі  $\lambda$  відрізках) мікрополоскових ліній (МПЛ).

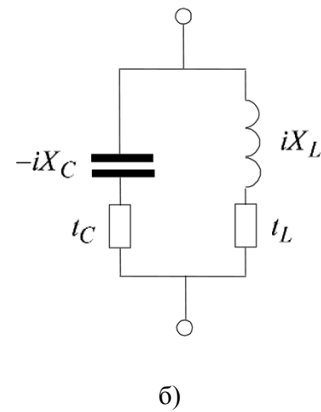
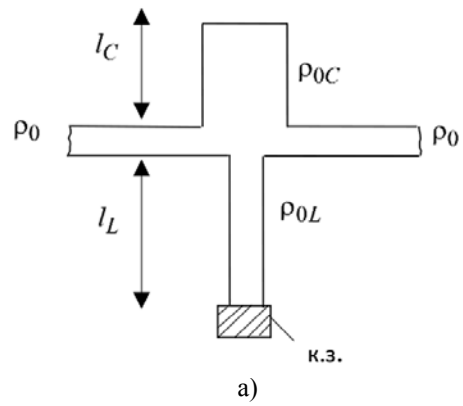


Рис. 4. Резонансний контур на основі відрізків МПЛ (а) та його еквівалентна схема (б)

Індуктивним елементом є більш вузький відрізок МПЛ з хвильовим опором  $\rho_{ol}$  і довжиною  $l_L$ , ємнісним – відрізок МПЛ з  $\rho_{oc}$  і довжиною  $l_C$  ( $\rho_{ol} > \rho_{oc}$ ) (значення реактивних опорів елементів можуть бути визначені за наступним наближеним співвідношенням [6]):

$$X_L \approx 2\pi \frac{\rho_{ol}}{\lambda_g} l_L; \quad X_C \approx \frac{\rho_{oc} \lambda_g}{2\pi l_C}. \quad (5)$$

Активний опір індуктивного елемента  $r_L = R l_L / W_L$ , де  $W_L$  – ширина індуктивного елемента. За припущенням  $r_C \ll r_L$ , яке практично завжди має місце при використанні діелектриків з малими втратами, вираз для визначення власної добротності резонатора буде мати вигляд:

$$Q_0 = \frac{\rho_k}{r_L} \sqrt{1 - (r_L / \rho_k)^2}, \quad (6)$$

де  $\rho_k = \sqrt{X_L X_C}$  – характеристичний опір контуру. В  $S$ -стані  $r_L \ll \rho_k$ , тому  $Q_{0s} \approx \rho_k / r_L$ . Для визначення величини  $\rho_0$  використаємо вираз апроксимації:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \frac{H}{WM}, \quad (7)$$

$$M = [1 + 1,73 \epsilon_r^{-0,0724} (W/H)^{0,836}]. \quad (8)$$

де

$H, \epsilon_r$  – товщина та відносна діелектрична проникність діелектрика. У результаті маємо



нансна частота реального контуру з втратами відрізняється від  $\omega_0$  контуру без втрат не більше ніж на 10 %, якщо  $r_L/\rho_k < 0,44$ , при цьому відповідно (6)  $Q_0 < 2$  та вирази (13) – (15) не приводять до великих похибок. Для проведення дослідження роботи ФВ у всьому діапазоні зміни  $r_L/\rho_k$  використаємо методику розрахунку  $\Gamma$ ,  $T$  і  $P$  за допомогою хвильових матриць передачі [9]. На рис. 6 наведені розраховані за цією методикою залежності  $|\Gamma_0|^2$  (криві 1),  $|T_0|^2$  (2) та  $P$  (3) фільтра від відношення  $R_L/\rho_0$  при перемиканні індуктивного елемента контуру з поверхневим опором  $S \rightarrow N$  при  $f=1$  ГГц,  $n = 1$  і  $=1, 4, 8$  (криві а, б, в відповідно).

Наявність мінімумів на залежностях  $|T_0|^2$  пов'язана з переходом контуру в аперіодичний режим.

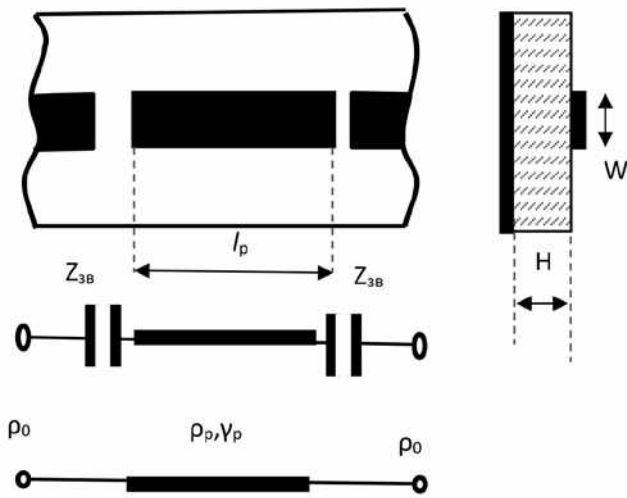


Рис. 7. Фільтр-вимикач (обмежувач) на основі МПР з ємнісними елементами зв'язку та його еквівалентна схема

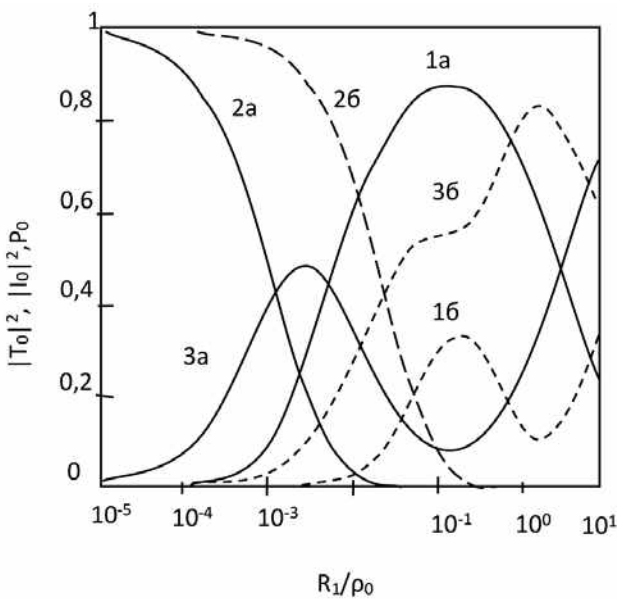


Рис. 8. Залежності квадратів модулів коефіцієнтів відбиття  $|\Gamma_0|^2$ , пропускання  $|T_0|^2$  та  $P$  відносної потужності, яка поглинається на резонансній частоті від відношення  $R_1/\rho_0$

Наведені залежності дозволяють визначити параметри  $q$ ,  $m$  та  $L$  ФВ при різних значеннях  $R_L$  ключового елемента для фіксованих  $\rho_0$  та  $\rho_k$ . Згідно рис. 6 зміна  $R_L$  на три порядки при  $S \rightarrow N$  переключенні забезпечує перепад послаблення НВЧ-сигналу від 0,1 до 20 дБ тільки за умови  $\rho_0/\rho_k \geq 8$ .

**Фільтри-вимикачі та фільтри-обмежувачі на лініях з розподіленими параметрами**

Визначимо  $|\Gamma_0|^2$ ,  $|T_0|^2$  та  $P_0$  напівхвильового мікропоскокового резонатора, який включений симетрично за допомогою елементів зв'язку з імпедансом  $Z_{3B} = r_{3B} + iX_{3B}$  в лінію передачі з малими втратами та хвильовим опором  $\rho_0$ . МПР та його еквівалентна схема для випадку ємнісного зв'язку ( $r_{3B} = 0$ ) наведені на рис. 7, де

$$\rho_p = \sqrt{\frac{R_0 + i\omega L_0}{i\omega C_0}}; \quad \gamma_p = \sqrt{i\omega C_0(R_0 + i\omega L_0)}; \quad (17)$$

$$l_p \approx \lambda_p/2; \quad C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r W M}{H}; \quad Z_{3B} = i(\omega C_0)^{-1}, \quad (18)$$

де  $l_p, \rho_0$  – хвильовий опір та резонансна довжина МПР;  $\gamma_p$  – постійна розповсюдження електромагнітної хвилі в МПР;  $C_0$  – ємність МПР на одиницю довжини.

Вираз та побудовані графіки дозволяють визначити  $C_0$  [7]. Розглянемо випадок зміни параметрів МПР в момент, коли відбувається  $S \rightarrow N$  переключення. Врахуємо, що в момент знаходження МПР в  $S$  стані його параметри визначаються згідно (12), а в  $N$  стані також виразом (12), однак, слід замінити  $R_{1S}$  на  $R_{1N}$ , а  $\lambda$  на  $\delta_{ck}$ . Розглянемо випадок узгодженого включення ( $\rho_0 = \rho_p$ ) при  $R_0 = 0$ . На рис. 8 представлені результати розрахунку  $|\Gamma_0|^2$ ,  $|T_0|^2$  (криві 1а, 1б; 2а, 2б; 3а, 3б) в залежності від ставлення  $RP$ , отримані на основі аналізу еквівалентної схеми за допомогою хвильових матриць передачі.

При розрахунку обрані наступні параметри:

$f=10$  ГГц,  $\beta = \frac{X_{ce}}{\rho_0} = 11,2$  і  $2,1$  (криві а і б відповідно). Зауважимо, що величина  $\beta$  визначає відносну смугу пропускання  $\Delta f/f$  ФВ (ФО) в режимі малих втрат ( $S$  стан):  $\Delta f/f = 0,01$  і  $0,2$  при  $\beta = 11,2$  і  $2,1$ . Згідно рис. 8 зміна на три порядки поверхневого опору смуги МПР при  $S \rightarrow N$ -

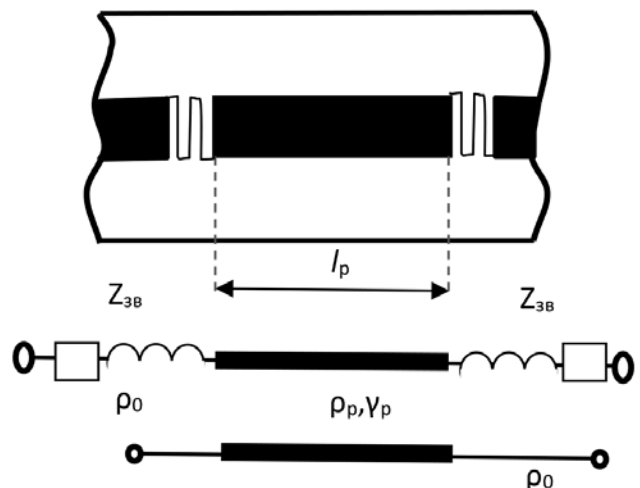


Рис. 9. Фільтр-вимикач (обмежувач) на основі МПР з індуктивними елементами зв'язку та його еквівалентна схема

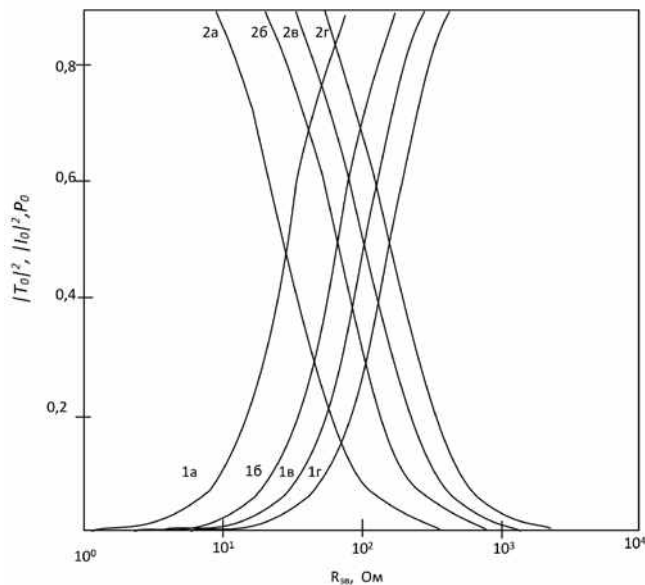


Рис. 10. Залежності квадратів модулів коефіцієнтів відбиття і пропускання  $|T_0|^2$  та  $P_0$  відносної потужності, яка поглинається на резонансній частоті від  $R_{36}$

ремиканні дозволяє забезпечувати перепад послаблень СВЧ-сигналу з 0,1 до 20 дБ. Слід звернути увагу на те, що вузькосмуговий ФВ (ФО) забезпечує 90 % відбиття потужності в  $N$  стані ключа, тоді як широкосмуговий – практично повністю (85 %) поглинає подвійну потужність. Ці особливості зв'язані з переходом контуру в апериодичний режим.

У розглянутій раніше реалізації ФВ (ФО) для переводу ключових елементів з  $S$  і  $N$  станів необхідно відносно високий рівень потужності управління (вхідний сигнал). Пониження цього рівня може бути забезпечено використанням зосереджених ключових елементів з малим рівнем спрацювання, деяким чином включених в МПР. В якості прикладу розглянемо реалізацію ФВ (ФО) на основі МПР, в котрих таким ключовим елементом є індуктивний елемент зв'язку (рис. 9), виконаний у вигляді вузького меандру. Для МПР (рис. 1) маємо:

$$Z_{36} = r_{36} = i\omega L_{36}; r_{36} = R_{36} l_{36} / W_{36},$$

де  $R_{36}$  – поверхневий опір надпровідникової плівки, з якої виконаний елемент зв'язку, а  $l_{36}$  та  $W_{36}$  – довжина та ширина меандру. Параметри  $\rho_p$ ,  $\gamma_p$ ,  $i_p$ ,  $C_p$  та  $L_0$  визначені вище: (17) – (18),  $R_{36}$  – формулою (12). Величина  $L_{36}$  визначається визначеною смугою пропускання ФВ (ФО) та  $S$  стану, при цьому  $\omega L_{36} > r_{36}$  та  $L_{36}$  можна знайти згідно виразу, за яким проводиться апроксимація, приклад якого показаний в [10]. На рис. 10 показаний розрахунок залежності  $|T_0|^2$  (крива 1) та  $|T_0|^2/P_0$  (крива 2) від величини  $R_{36}$  при  $f = 10$  ГГц;  $R_{1S} = R_{2S} = 10^{-4}$  Ом;  $\rho_0 = \rho_p = 50$  Ом;  $W_{36} = 10$  мкм;  $l_{36} = 2,39; 1,01; 0,67$  і  $0,42$  мм (криві в – г відповідно).

Вибрані значення  $l_{36}$  відповідають  $\Delta f/f = 0,01; 0,05; 0,1$  та  $0,2$  (зауважимо, що в цій реалізації ФВ (ФО) відносна потужність, що поглинається, мала в усіх діапазонах зміненої величини  $R_{36}$  і тому на рис. 10 не показана). Згідно рис. 10 перепад послаблень зменшеного СВЧ-сигналу

від 0,1 до 20 дБ забезпечується змінами величини  $R_{36}$  при  $S \rightarrow N$  перемиканні всього на 2 порядки. Однак при цьому потрібно відносно більше значення  $R_{36}$  в  $N$  стані. На сьогоднішній день цій вимозі задовольняє лише плівка NbN.

## ВИСНОВКИ

У статті показана можливість побудови швидкодіючих (час спрацювання менше одиниць наносекунд) перемикачів на основі надпровідності плівок в діапазоні частот 1–10 ГГц з часовими (швидкодія спрацювання, час відновлення) енергетичними параметрами (енергія переключення ( $10^{-10}$  Дж)) та резонансними характеристиками (частота, смуга, добротність). Комплексне дослідження електрофізичних характеристик надпровідникових плівок, насамперед НВЧ поверхневого опору в трьох станах енергетичних, часових параметрів процесу  $S-N$  перемикання [11], з однієї сторони, та проведення в цій роботі параметричного аналізу, з іншої, дозволяє зробити висновок про можливість реалізації в діапазоні частот 1–10 ГГц фільтрів-обмежувачів та фільтрів-вимикачів на основі як низько-, так і високотемпературних надпровідників, найбільш важливі параметри яких перевищують відповідні аналогічних приладів, побудованих на основі напівпровідників.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Интегральные схемы и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках / под ред. проф. В.Н. Алфеева. М.: Радио и связь. 1995.
2. Хижга Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова О.А. СВЧ-фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь. 1984.
3. СВЧ-устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет / ред. И.В. Мальского, Б.В. Сестрорецкого. М.: Сов. Радио. 1969.
4. Fyk, O.I., Kucher, D.B., Kucher, L.V., Gonchar, R.O., Antonets, V.V., Fyk, M.I. & Besyedin, Y.O. (2018). Analyze technology of manufacture of a high-temperature microbole super-transmission device for electromagnetic protection of receivers. Eastern-european j. of enterprise technologies. № 5(95). P. 38 – 47. (J. indexing: Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144125>.
5. Fyk, O.I., Kucher, D.B. & Gonchar, R.O. (2017). Experimental research of microstrip aerial as protective device of receiver from electromagnetic defeat. EUREKA: Physics and Engineering (Tallin, Estonia). No 5. Pp. 54 – 53. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00436>.
6. Santos, De Los, H. (2002). RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications: Artech House. 250 p.
7. Проектирование СВЧ устройств с помощью ЭВМ: учеб. пособие / под ред. А.Д. Григорьева. Л.: ЛЭТИ. 1987.
8. Устройства СВЧ и антенны: учебник / под ред. А.А. Филонова. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т. 2014. 492 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364513>.
9. Фельдштейн А.Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ. М.: Связь. 1971.

10. Webinar Decadal Plan for Semiconductors: New Trajectories for Analog Electronics. Date: June 10, 2021. Time: 11 am – 12:30 pm EDT. Available at: [https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/Decadal-Plan-for-Semiconductors\\_New-Trajectories-for-Analog-Electronics\\_reduced-size.pdf](https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/Decadal-Plan-for-Semiconductors_New-Trajectories-for-Analog-Electronics_reduced-size.pdf).
11. Vendik, O.G. et al. (1988). In: Proc. 18th Europ. Microwave Conf. Microwave Exhib. and Publish. Ltd. P. 27.

#### REFERENCES

1. “Integralnye skhemy i mikroelektronnye ustroystva na sverkhprovodnikakh” [Integrated circuits and micro-electronic devices based on superconductors] / ed. prof. V.N. Alfeeva, Radio and communication. M. 1995.
2. Khizha, G.S., Vendik, I.B. & Serebryakova, O.A. “SVCh-fazovrashhateli i pereklyuchateli” [Microwave phase shifters and switches], Radio and communication. M. 1984.
3. “SVCh-ustroystva na poluprovodnikovikh diodakh. Proektirovanie i raschet” [Microwave devices based on semiconductor diodes. Design and calculation] / ed. I.V. Malsky, B.V. Sestroretsky, Sov. Radio. M. 1969.
4. Fyk, O.I, Kucher, D.B., Kucher, L.V., Gonchar, R.O., Antonets, V.V., Fyk, M.I. & Besyedin, Y.O. (2018). Analyze technology of manufacture of a high-temperature microbole super-transmission device for electromagnetic protection of receivers. Eastern-european j. of enterprise technologies. No. 5 (95). Pp. 38-47. (J. indexing: Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144125>.
5. Fyk, O.I, Kucher, D.B. & Gonchar, R.O. (2017). Experimental research of microstrip aerial as protective device of receiver from electromagnetic defeat. EUREKA: Physics and Engineering (Tallin, Estonia). No 5. Pp. 54–53. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00436>.
6. Santos, De Los, H. (2002). RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications: Artech House. 250 p.
7. “Proektirovanie SVCh ustroystv s pomoshhiu EVM” [Design of microwave devices using a computer: manual] / ed. HELL. Grigoriev. L.: LETI. 1987.
8. Microwave devices and antennas: textbook / ed. A.A. Filonov. Krasnoyarsk: Siberian Federal Univ. 2014.492 p. [Electronic resource]. – Access mode: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364513>.
9. Feldstein, A.L. (1971). “Sintez chetirekhpolyusnikov i vosmipolyusnikov na SVCh” [Synthesis of four-terminal and eight-terminal networks at microwave frequencies], Communication, M.
10. Webinar Decadal Plan for Semiconductors: New Trajectories for Analog Electronics. Date: June 10, 2021. Time: 11 am – 12:30 pm EDT. Available at: [https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/Decadal-Plan-for-Semiconductors\\_New-Trajectories-for-Analog-Electronics\\_reduced-size.pdf](https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/Decadal-Plan-for-Semiconductors_New-Trajectories-for-Analog-Electronics_reduced-size.pdf).
11. Vendik, O.G. et al. (1988). In: Proc. 18th Europ. Microwave Conf. Microwave Exhib. and Publish. Ltd. P. 27.

**Fyk O., Kucher D., Kucher L.**

#### INVESTIGATION OF RESONANT PROPERTIES OF SWITCHING DEVICES BASED ON HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR

*The results of experimental studies showed that in a high-temperature superconductor under the action of the input microwave signal, when a magnetic field is created whose level exceeds the threshold ( $H > H_{cr2}$ ) there is a phase transition of the superconductor from superconducting  $S$  to normal (resistive) state  $N$  (so-called process-switching (switching)). It has been established that it is possible to control the amplitude-frequency characteristic of a superconductor by a flowing voltage or current. That is, it is possible to build switches based on superconductors, which will be used in antennas, input circuits of cooled high-frequency paths and so on.*

*The most practical are devices based on high-temperature superconductors, because their operating temperature is the temperature of liquid nitrogen, and the switching speed is less than 1 nanosecond. However, the use of guide systems requires consideration of their compatibility with standard devices and taking into account another number of features of the structure of microwave systems. That is, it makes sense to first separately analyze the operation of such switches, and then in the structure of the microwave system.*

*The article studies the properties of only individual switches (phase shifters and limiters) on the basis of high-temperature superconducting thin films in order to develop principles and criteria that can be the basis for automated design of the considered high-speed superconducting microwave devices.*

*To solve the calculation problem, the algorithm of analysis of resonant switching systems is used and the corresponding parameters and criteria are determined: transmission coefficients, modulations, attenuation, quality parameter, resonant characteristics (frequency, band, quality factor).*

*The results of calculations indicate the need for use in modern microwave systems of high-temperature superconducting high-speed broadband devices (phase shifters, limiters, delay lines, switches) that will reduce energy losses in the transceiver path, increase the speed of control of the antenna beam in space, increase noise, will increase the protective properties of the receiving tract from electromagnetic damage.*

*The article presents the results of calculations of the characteristics of switches made on the basis of superconducting microstrip transmission lines. The possibility of constructing high-speed (operating time less than nanosecond units) switches based on superconductivity of films in the frequency range of 1–10 GHz with time (operating speed, recovery time), energy parameters (switching energy  $10^{-10}$  J) and resonant characteristics (frequency, band, quality factor), which significantly outweigh the corresponding parameters of similar devices based on semiconductors.*

**Keywords:** superconductor; microstrip line, resonator; receiver; transmittance, modulation factor, attenuation factor; semiconductor.

**Відомості про авторів:****Фик Олександр Ілліч**

доктор технічних наук  
доцент кафедри військового зв'язку та інформатизації  
Національної академії Національної гвардії України  
м. Харків, Україна  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6735-6229>  
Scopus ID: 9274769500  
e-mail: [aifleks@ukr.net](mailto:aifleks@ukr.net)

**Кучер Дмитро Борисович**

доктор технічних наук  
професор  
професор кафедри озброєння Інституту Військово-Морських Сил Національного університету  
“Одеська морська академія”, м. Одеса, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>  
Scopus ID: 9274693400  
e-mail: [dmitr\\_bor\\_kucher@ukr.net](mailto:dmitr_bor_kucher@ukr.net)

**Кучер Лариса Валентинівна**

кандидат технічних наук  
доцент кафедри озброєння Інституту Військово-Морських Сил Національного університету  
“Одеська морська академія”, м. Одеса, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-4873-1270>  
e-mail: [llv.sevast@gmail.com](mailto:llv.sevast@gmail.com)

**Information about the authors:****Oleksandr Fyk**

Doctor of Technical Sciences  
Associate Professor of Military Communications and Informatization Department  
of National Academy of National Guard of Ukraine  
e-mail: [aifleks@ukr.net](mailto:aifleks@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0001-6735-6229>  
Researcher ID: I-9109-2018  
Scopus Author ID: 9274769500

**Dmitriy Kucher**

Doctor of Technical Sciences  
Professor  
Professor of the Armament Department of Naval Institute of the National University  
“Odessa Maritime Academy”  
Odessa, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>  
Scopus ID: 9274693400  
e-mail: [dmitr\\_bor\\_kucher@ukr.net](mailto:dmitr_bor_kucher@ukr.net)

**Larisa Kucher**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Lecturer of the Armament Department of Naval Institute of the National University  
“Odessa Maritime Academy”  
Odessa, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-4873-1270>  
e-mail: [llv.sevast@gmail.com](mailto:llv.sevast@gmail.com)

Стаття надійшла до редколегії 12.07.2021.