

**Гібридні та монолітні інтегральні пристрої  
мікрохвильового діапазону**

**Елементи та вузли інтегральних схем  
мікрохвильових пристроїв.**

**Елементи та вузли інтегральних схем  
мікрохвильових пристроїв: резонатори**

## Загальна інформація

Типові варіанти виконання резонаторів для мікрохвильових пристроїв:

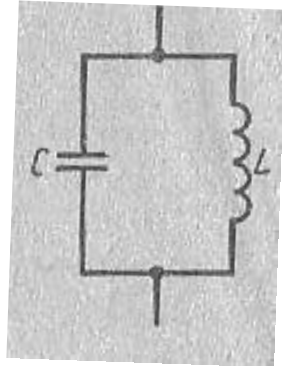
- на мікросмужкових лініях (площинні резонатори);
- на щілинних лініях (площинні резонатори);
- на діелектричних структурах (об'ємні резонатори).

Резонанс ЕМХ можливий як у напівхвильовому, так і чвертьхвильовому резонаторі.

Конструктивно резонатор можна виконати короткозамкненим або розімкненим на кінці.

## Загальна інформація

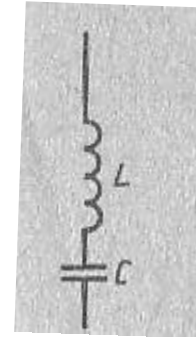
Аналіз систем, що містять резонатори на основі ліній передач, зручно проводити за допомогою описання резонаторів їхніми еквівалентними схемами.



Еквівалентна схема  
прямокутного  
короткозамкненого  
чвертьхвильового

або

розімкненого  
півхвильового  
резонатора



Еквівалентна схема  
прямокутного  
розімкненого  
чвертьхвильового

або

замкненого  
півхвильового  
резонатора

## Загальна інформація

### **Переваги розімкненого резонатора:**

- технологічна простота (порівняно з короткозамкненим резонатором);
- простота увімкнення його у коло.

### **Недоліки розімкненого резонатора:**

- наявність значних втрат на випромінювання, наслідком чого буде низька досяжна добротність;
- низька досяжна добротність (наслідок попереднього пункту).

### **Переваги короткозамкненого резонатора:**

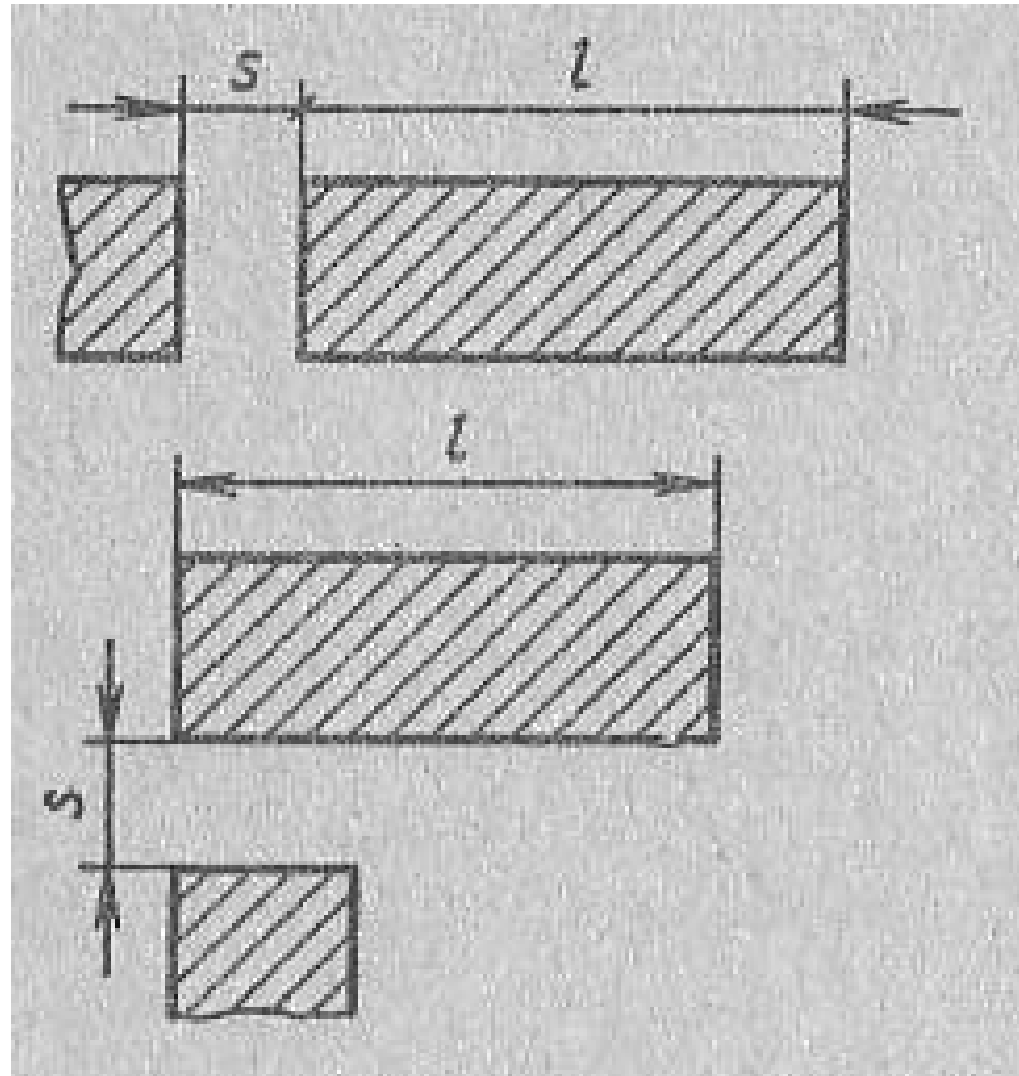
- більша досяжна добротність .

### **Недоліки короткозамкненого резонатора:**

- складніший технологічно (порівняно з розімкненим резонатором);
- складніше увімкнення його у коло.

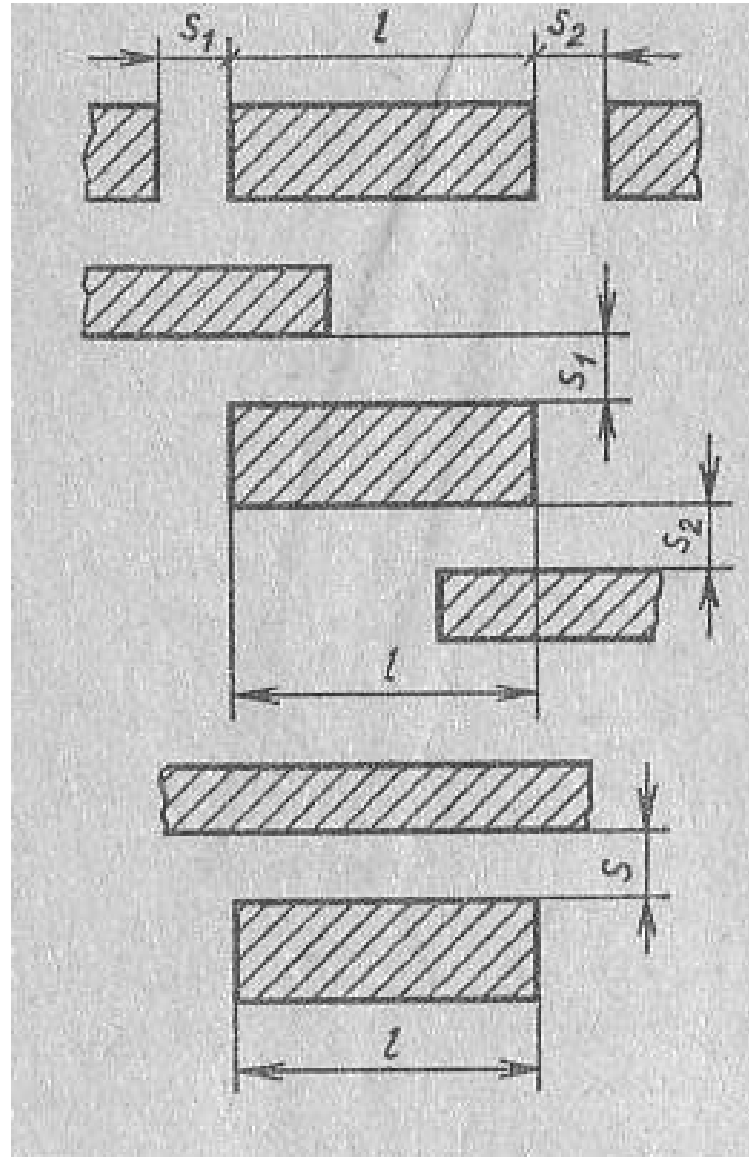
## Найпоширеніші способи увімкнення резонаторів у коло

За схемою двополюсника:



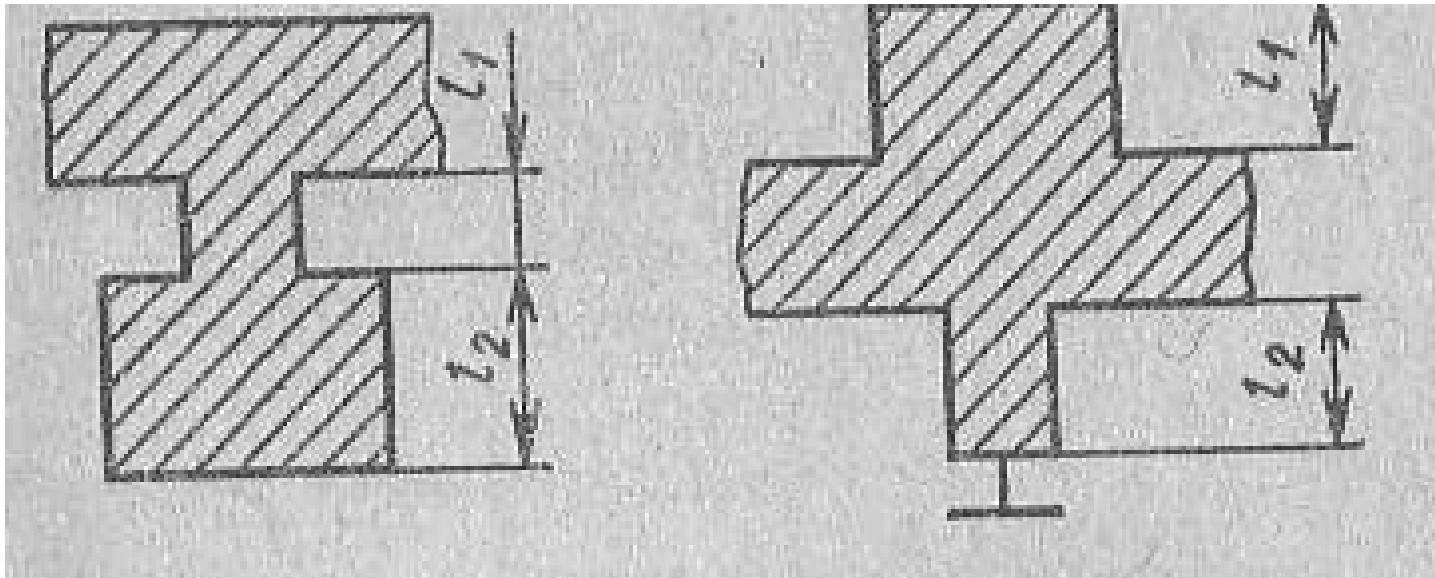
## Найпоширеніші способи увімкнення резонаторів у коло

За схемою чотириполісника:



## Найпоширеніші способи увімкнення резонаторів у коло

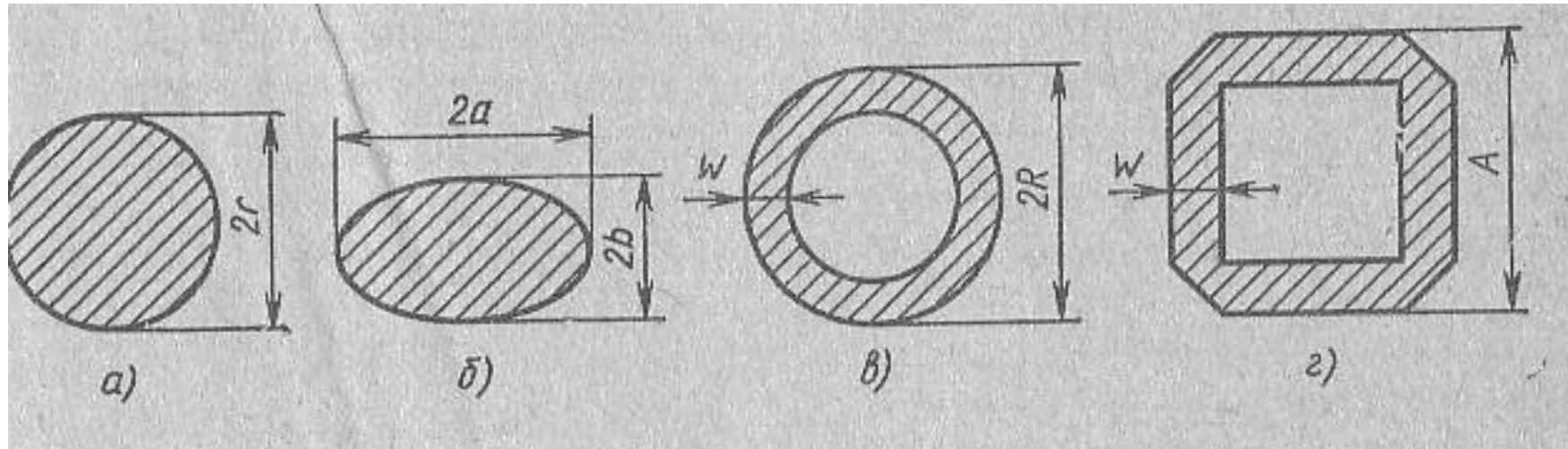
Можна також виконати резонатори у вигляді комбінації шлейфів.



Використовуючи прямокутні резонатори, конструктивно просто виконати **складені резонатори**, які є послідовно або паралельно включеними резонаторами.



## Варіанти топологій резонаторів



а – круглий;

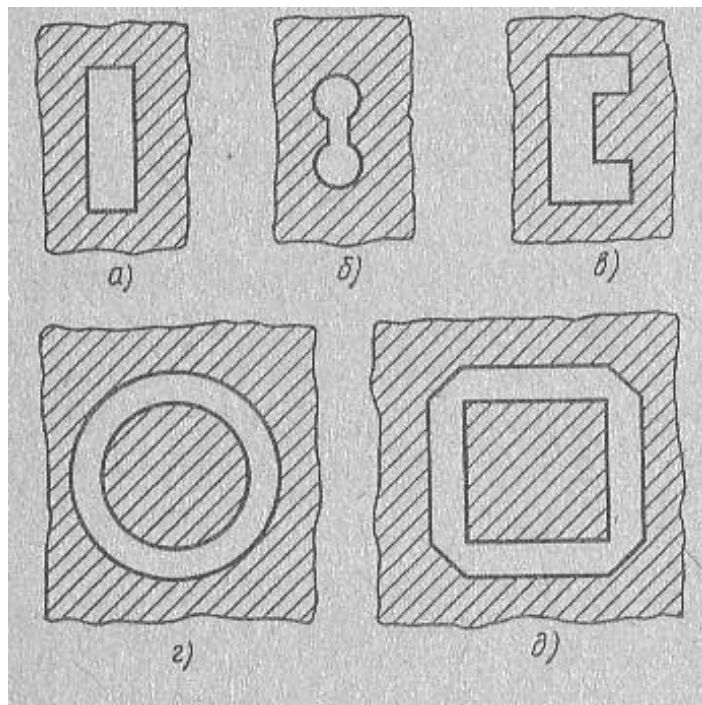
б – еліптичний;

в – круглий кільцевий;

г – прямокутний кільцевий.

## Варіанти топологій резонаторів

Варіанти топологій резонаторів на щілинній лінії – рисунок.



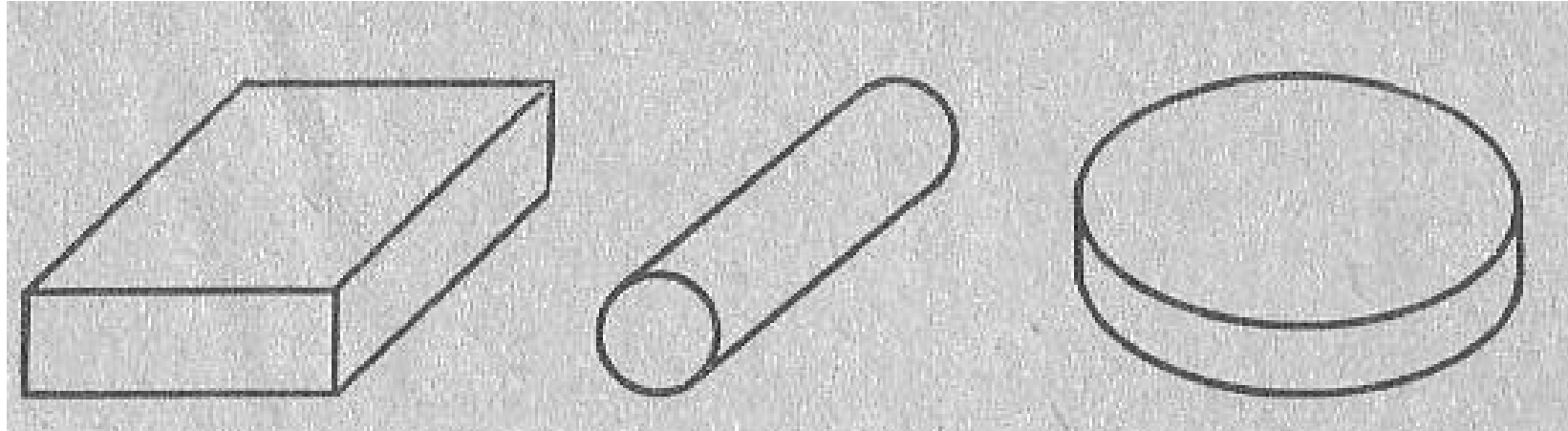
а – півхвилева щілина;

б – півхвилева щілина з ємнісним навантаженням (зменшення площі, яку займає резонатор);

в – згин резонатора (зменшення площі, яку займає резонатор);

г, д – замкнені резонансні структури (не мають крайкових неоднорідностей).

## Приклади об'ємних діелектричних резонаторів



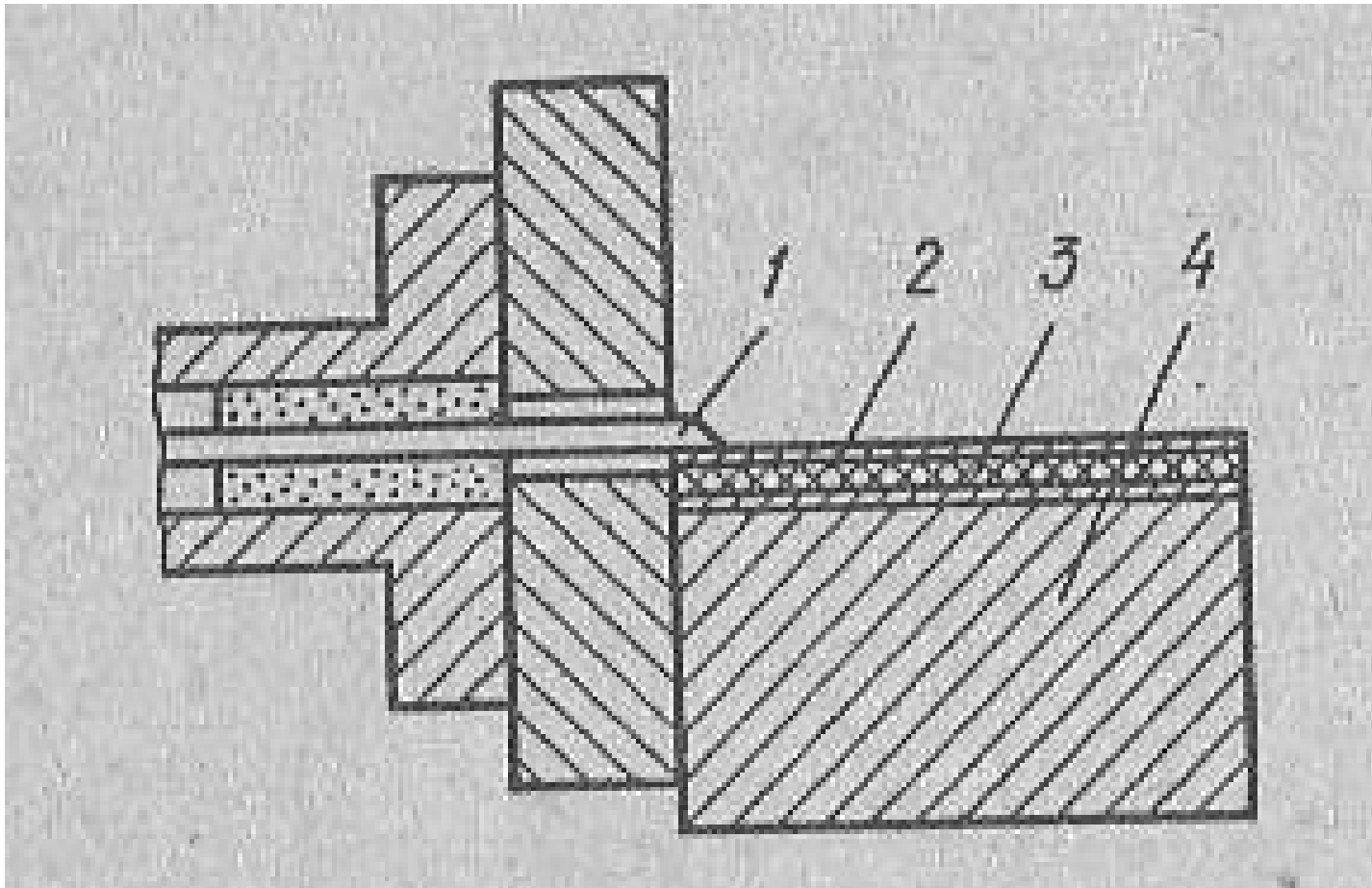
ЕМП концентрується всередині резонатора та втратами на випромінювання можна знехтувати.

**Переваги** таких резонаторов:

- при проникності діелектрика більше ніж 100, навантажена добротність резонатора залежить лише від діелектричних втрат і может досягати кількох тисяч;
- малі габарити.

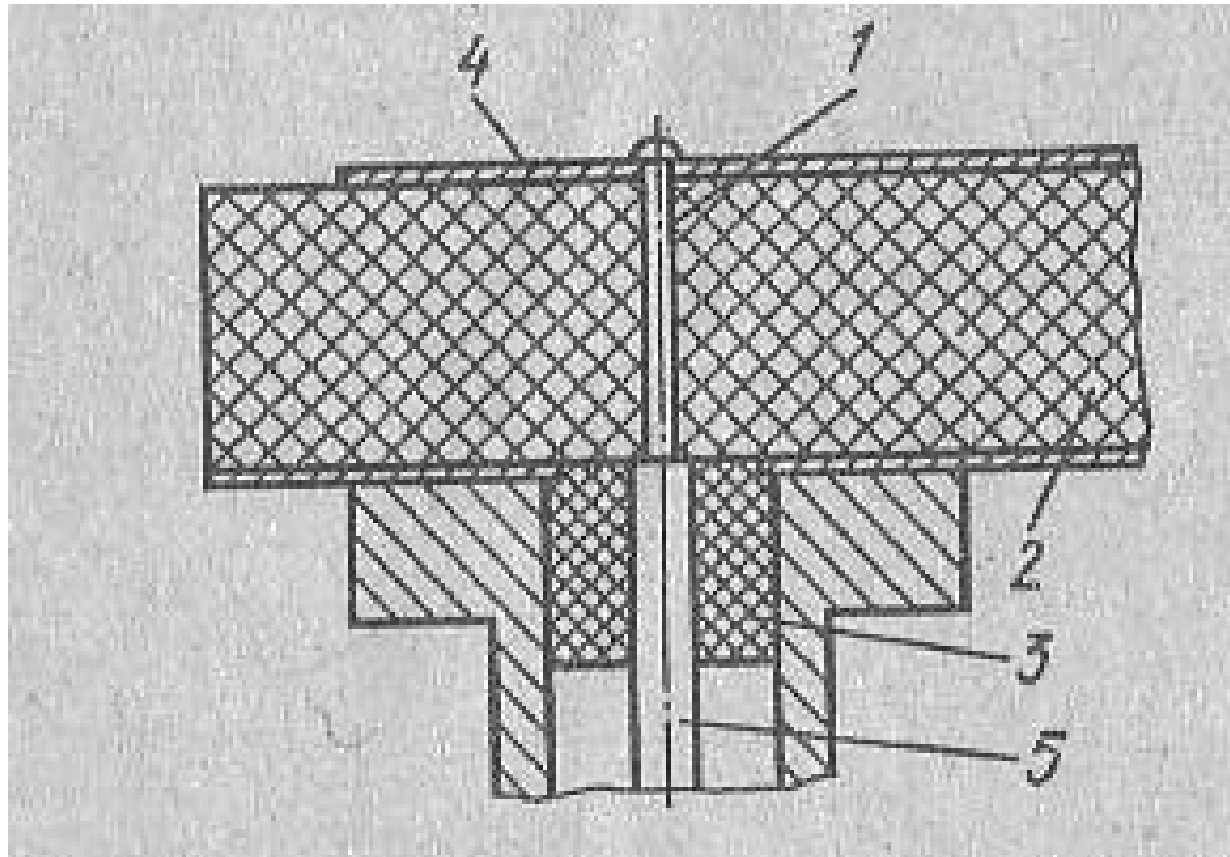
**Елементи та вузли інтегральних схем  
мікрохвильових пристроїв:  
пристрої збудження ліній передач,  
переходи, короткозамикачі**

## Співвісний коаксіально-смужковий перехід



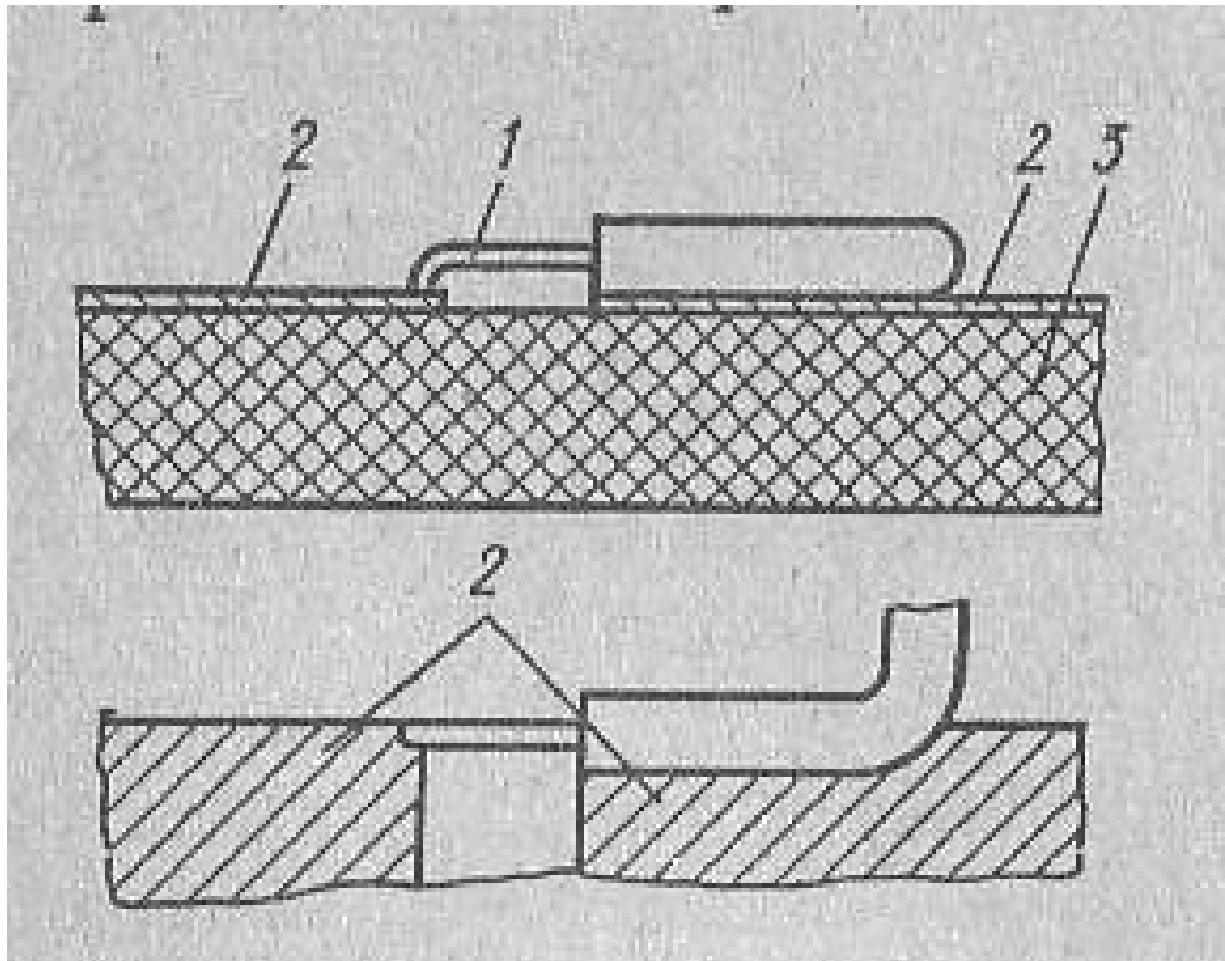
- 1 – центральний провідник коаксіальної лінії;  
2 – смужковий провідник; 3 – підкладка (субстрат); 4 – основа.

## Перпендикулярний коаксіально-смужковий перехід



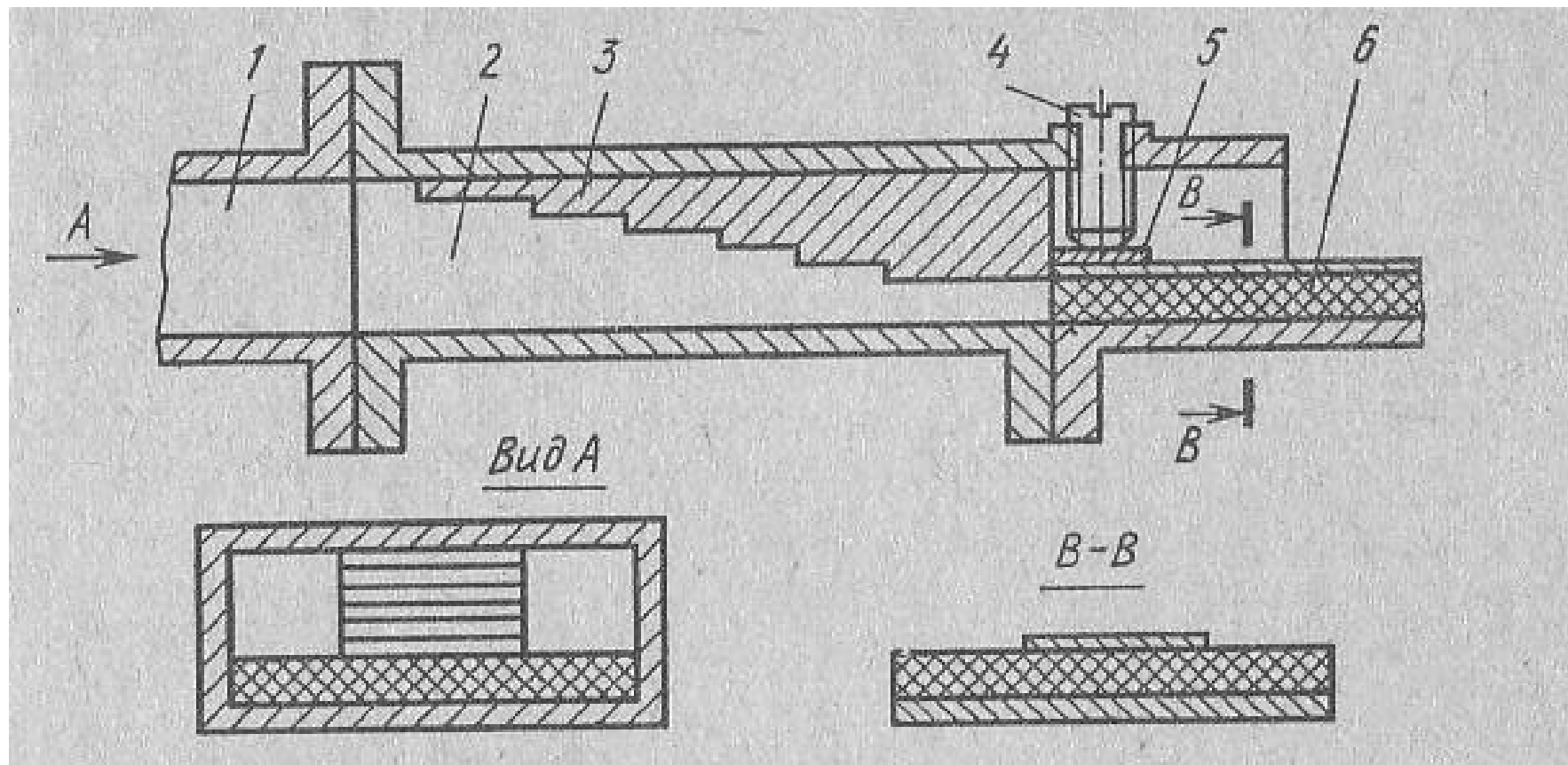
- 1 – штир; 2 – підкладка (субстрат);  
3 – діелектрична втулка; 4 – шлейф;  
5 – центральний провідник коаксіальної лінії.

## Коаксіально-щілинний перехід



1 – центральна жила коаксіальної лінії; 2 – металізація;  
3 – підкладка (субстрат).

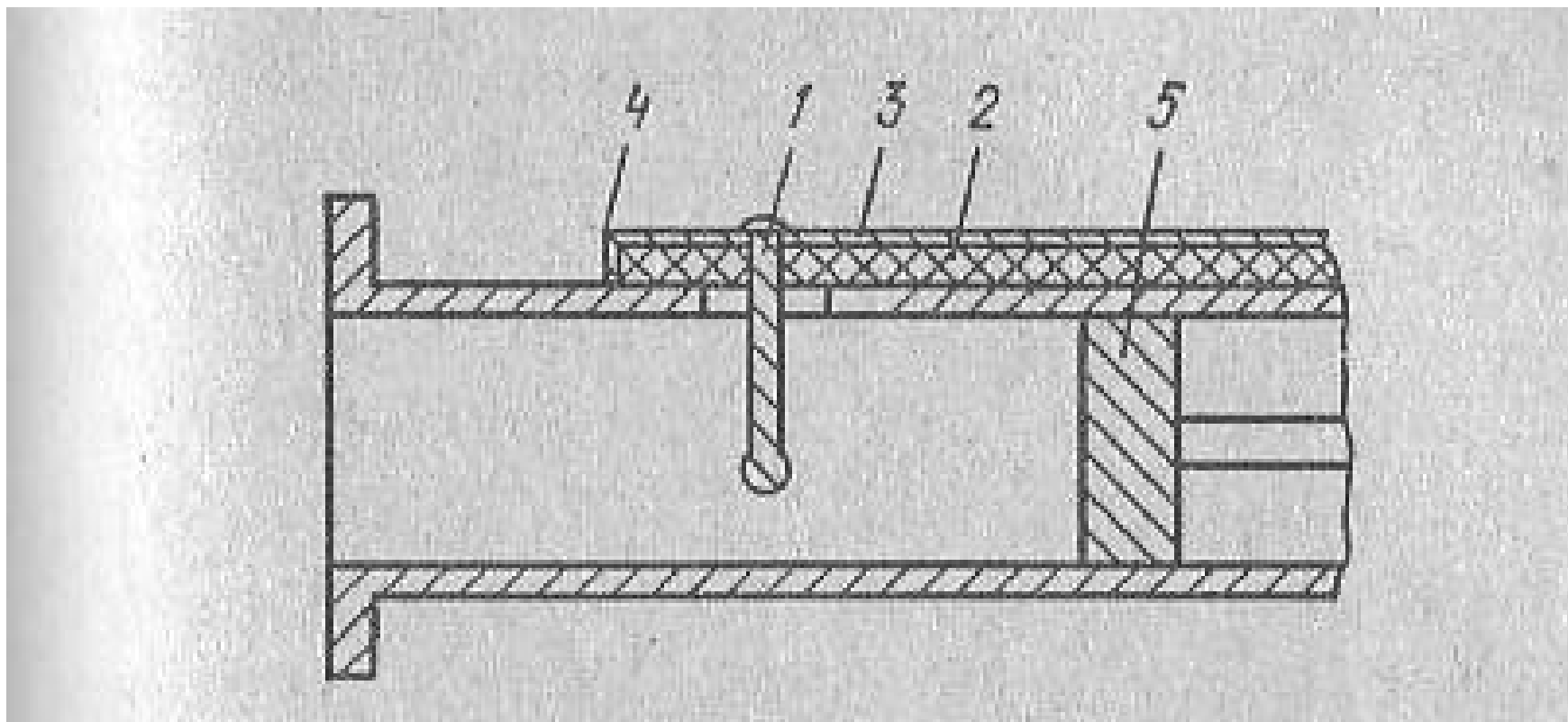
## Хвилевідно-смушковий перехід



1 – прямокутний перехід; 2 – перехід з прямокутного хвилеводу на П-подібний; 3 – сходовата вставка П-подібного хвилеводу; 4 – діелектричний гвинт; 5 – контактний язичок; 6 – МСЛ.

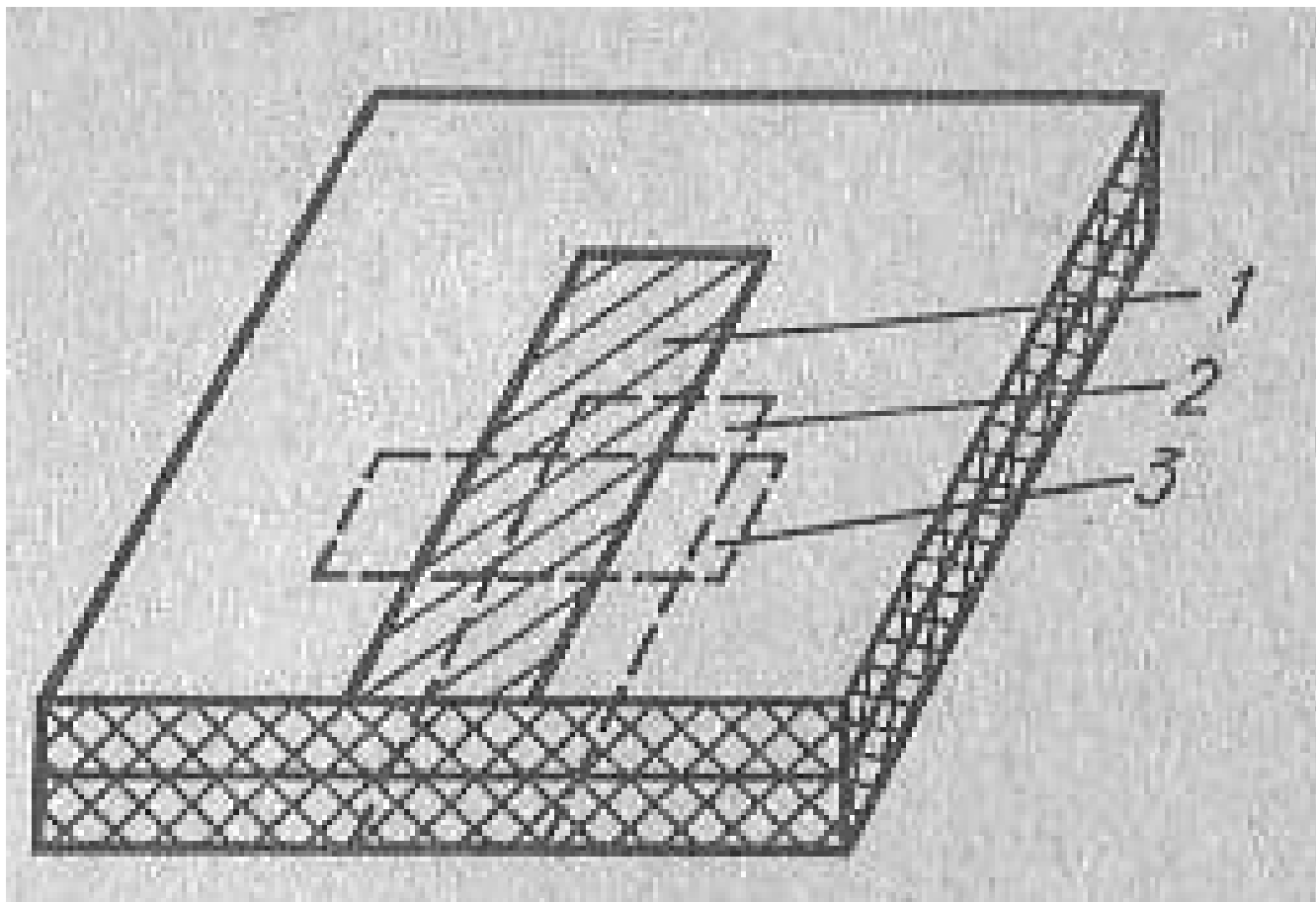


## Хвилевідно-смужковий перехід з зондом



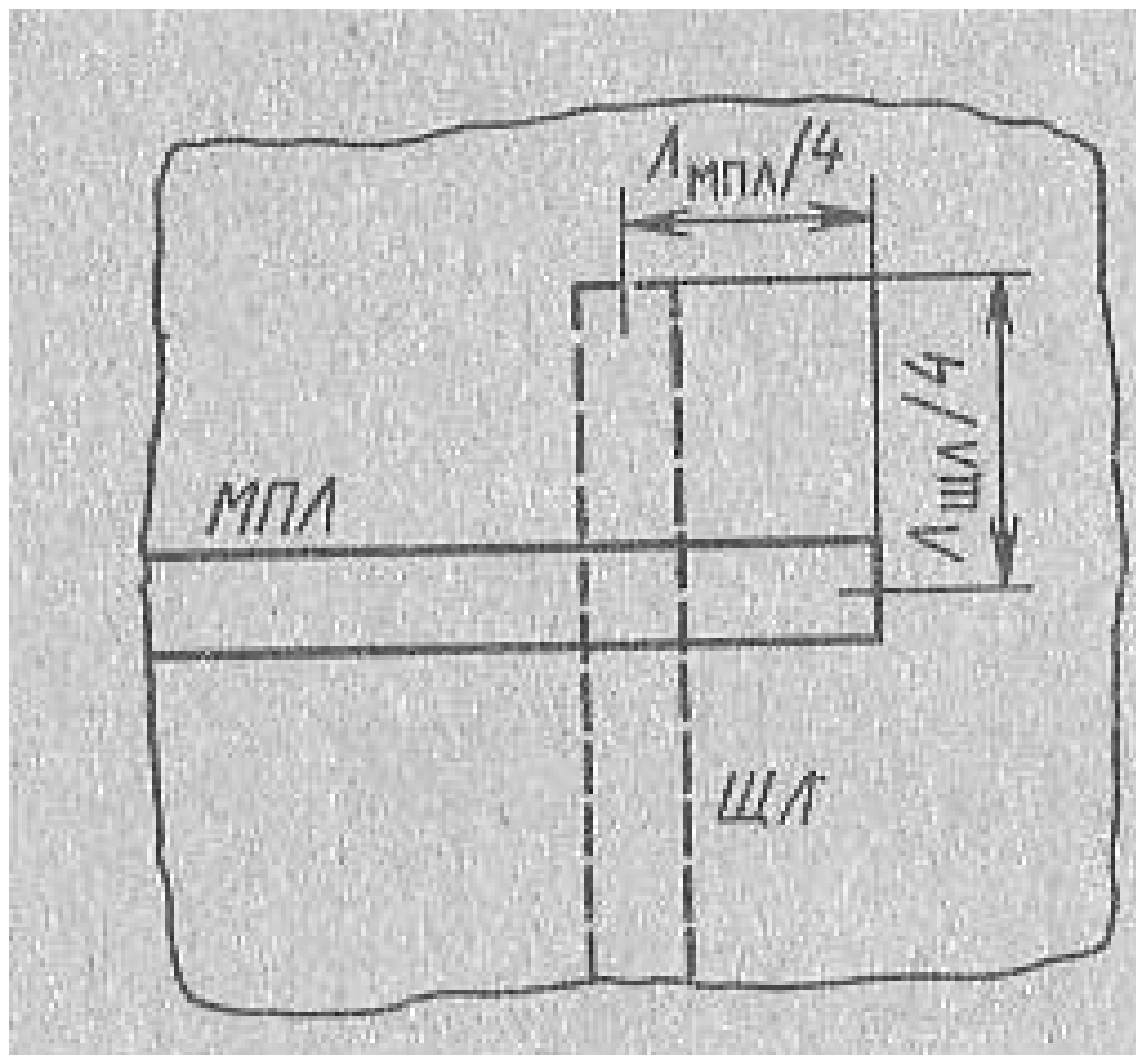
- 1 – металевий зонд; 2 – діелектрична підкладка;  
3 – провідник МСЛ; 4 – короткозамкнений шлейф;  
5 – короткозамикаючий поршень.

## Перехід між МСЛ

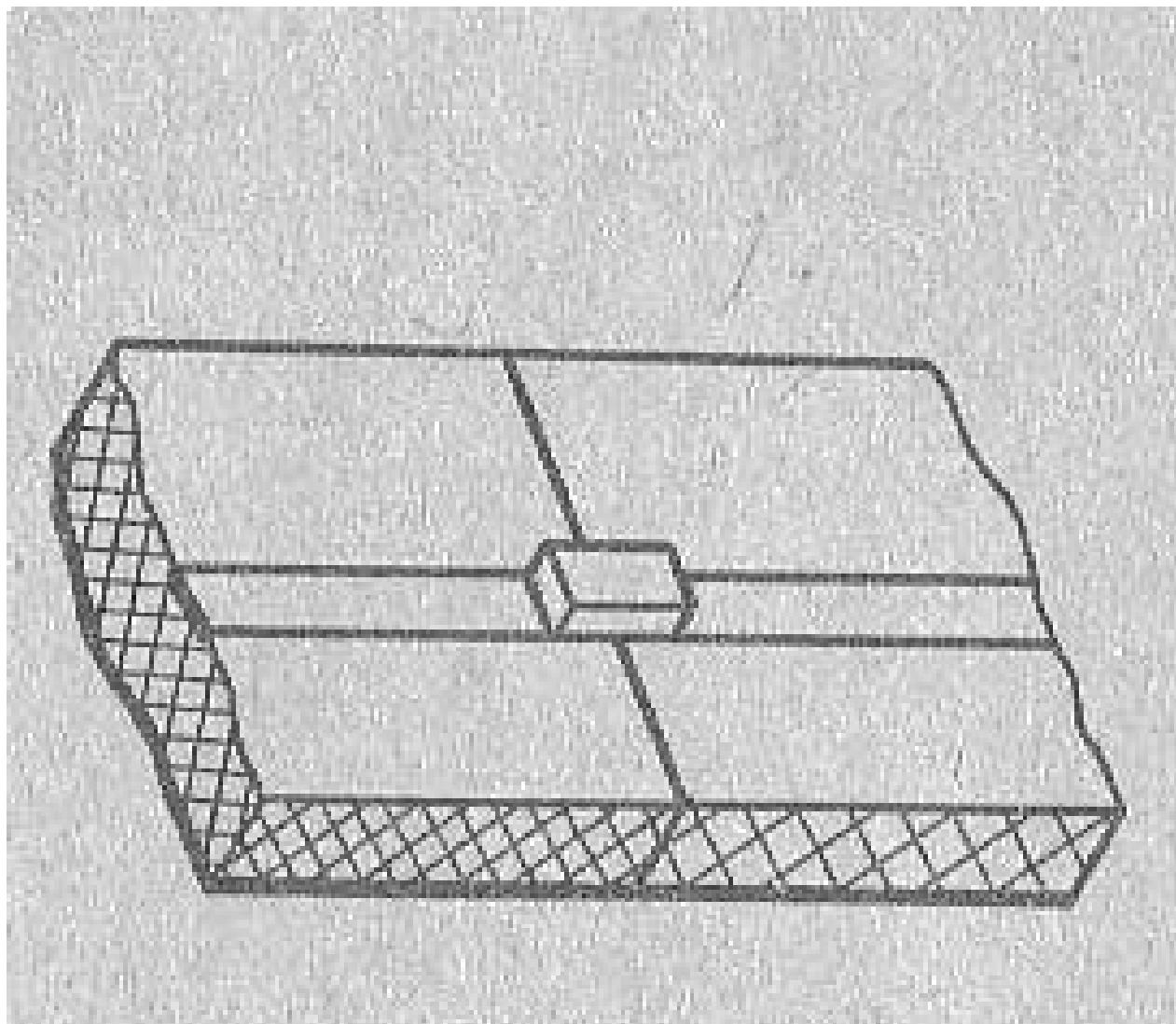


1, 2 – МСЛ; 3 – резонатор.

## Перехід від МСЛ до щілинної лінії

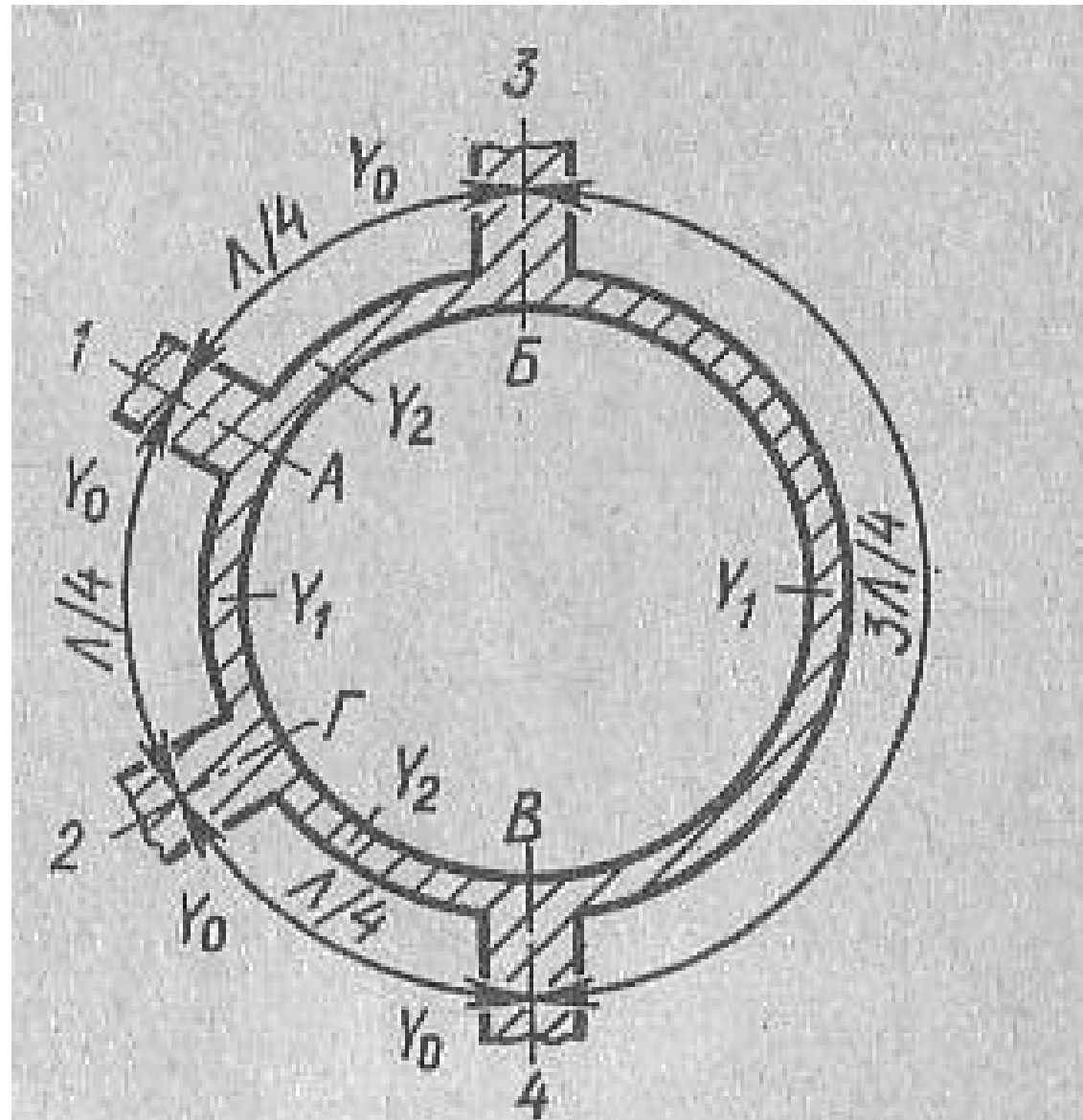


## З'єднання двох МСЛ за допомогою перемички з металу

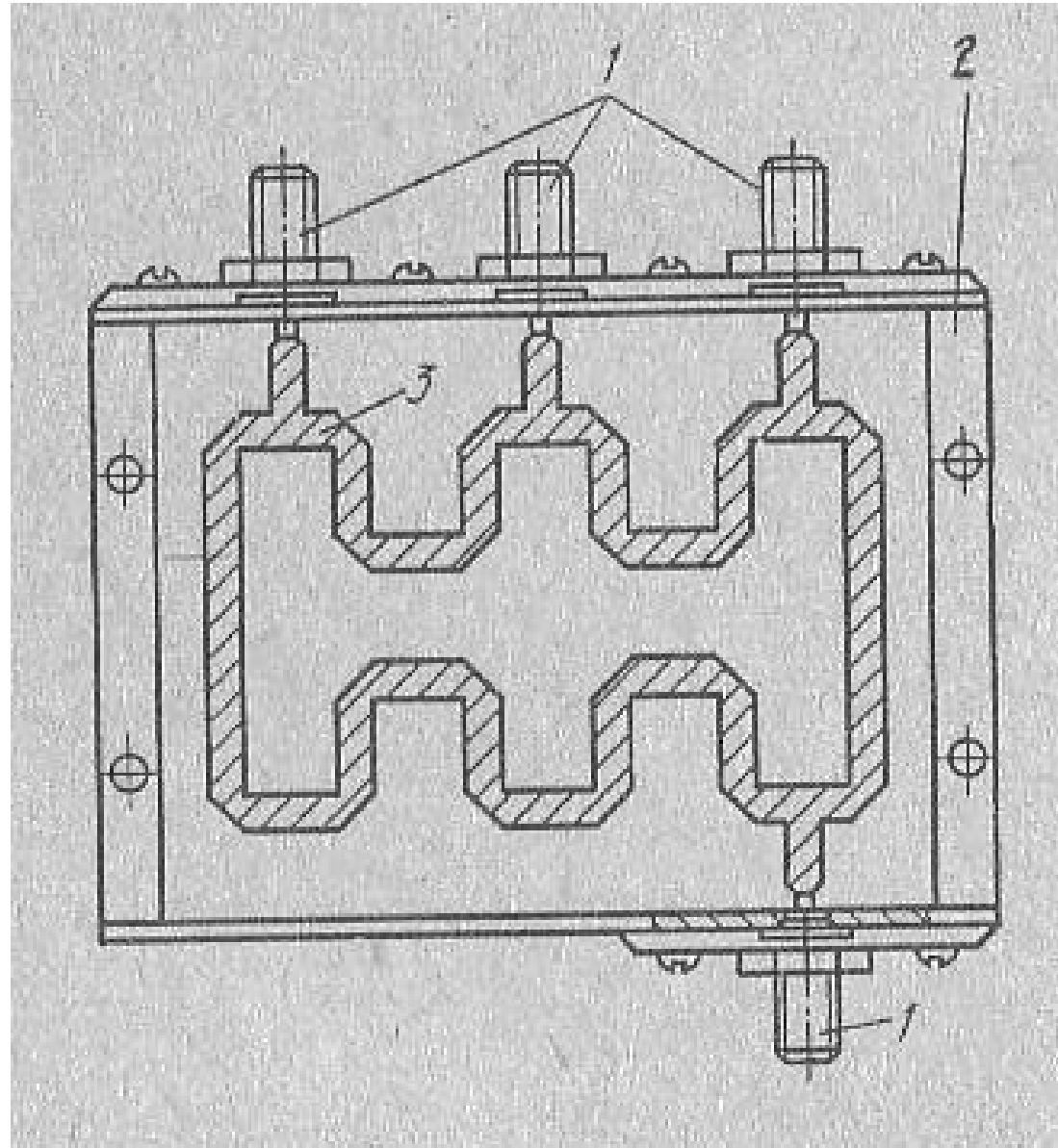


**Елементи та вузли інтегральних схем  
мікрохвильових пристроїв:  
спрямовані відгалужувачі та мости**

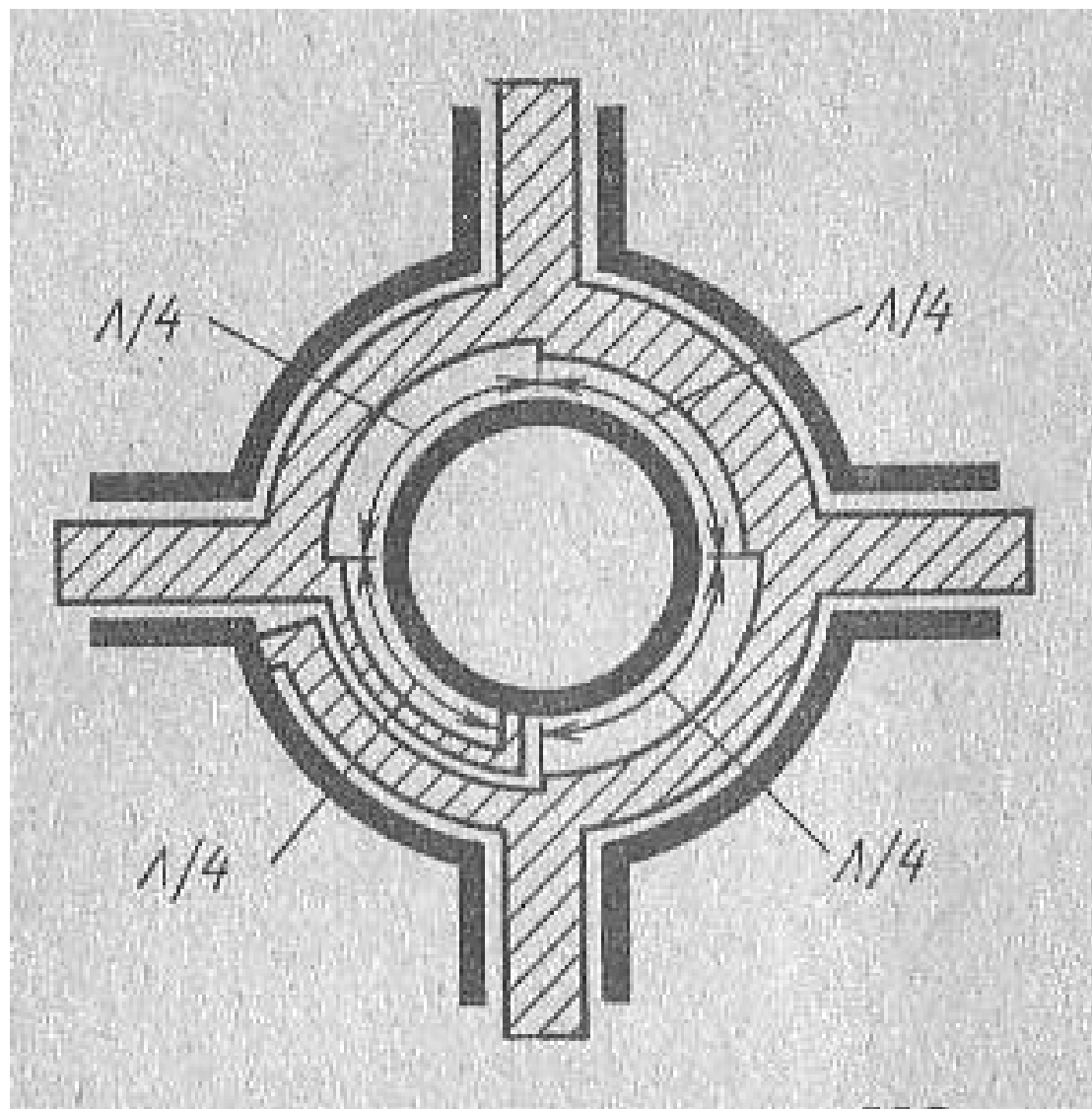
## Спрямовані відгалужувачі та мости



## Спрямовані відгалужувачі та мости

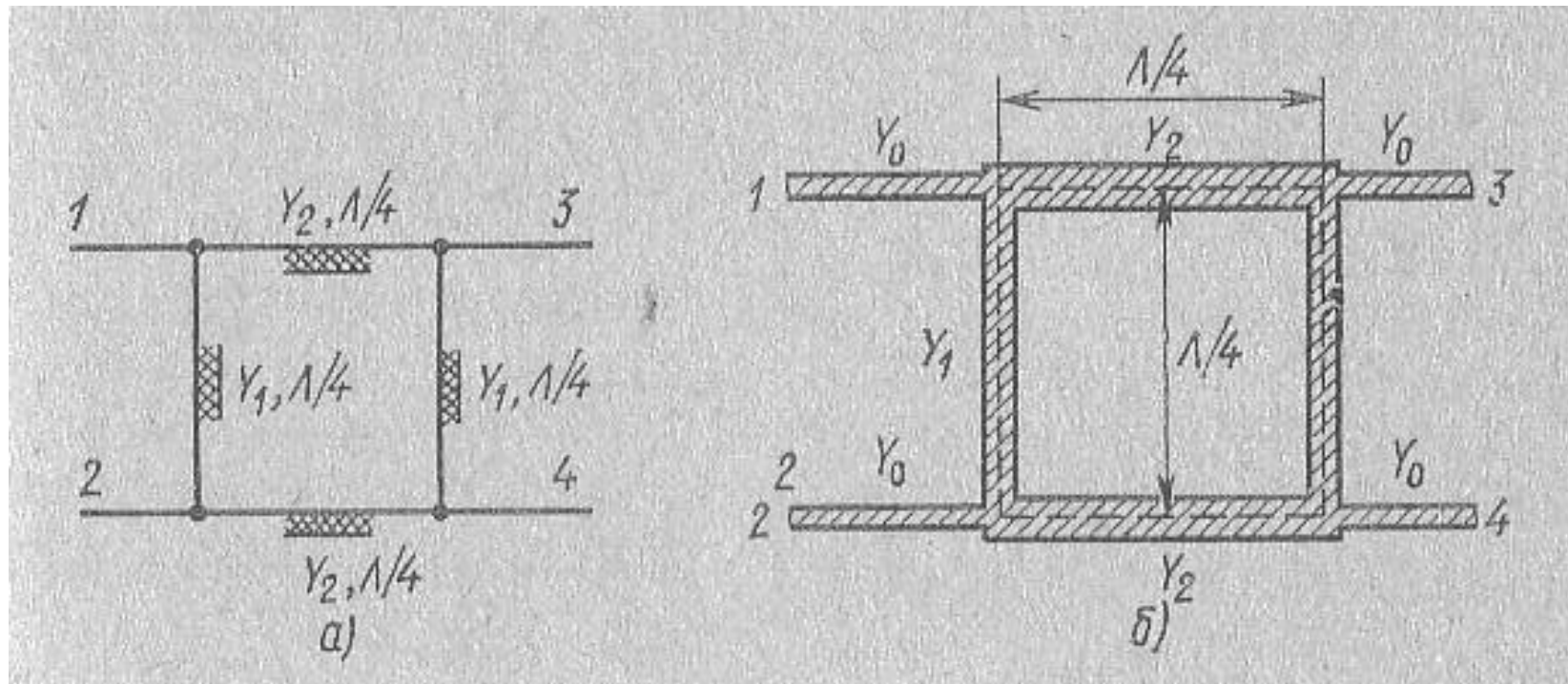


## Спрямовані відгалужувачі та мости





## Двошлейфний спрямований відгалужувач



Складається з двох відрізків ЛП, з'єднаних між собою двома шлейфами (чи більшою, у загальному випадку, кількістю шлейфів), довжина яких становить чверть довжини хвилі у лінії. Шлейфи вмикають у лінію також на відстані  $\lambda/4$ . При збільшенні кількості шлейфів розширюється смуга робочих частот, однак при цьому хвилеві опори крайніх шлейфів стають дуже великими – такі складно виготовити практично, тому на практиці кількість шлейфів зазвичай не більше трьох.

## Двошлейфний спрямований відгалужувач

Умова ідеального узгодження двошлейфного СВ на середній частоті робочого діапазону:

$$y_1^2 = y_2^2 - 1,$$

$y_1 = Y_1/Y_0$ ,  $y_2 = Y_2/Y_0$  – нормовані хвилеві провідності відрізків лінії передачі.

При ідеальному узгодженні матриця розсіяння двошлейфного СВ:

$$(\dot{S}) = -\frac{1}{y_2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & i & y_1 \\ 0 & 0 & y_1 & i \\ i & y_1 & 0 & 0 \\ y_1 & i & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Звідси робоче затухання у первинній лінії:

$$C_{31} = 10 \lg y_2^2,$$

та перехідне послаблення

$$C_{14} = 10 \lg (y_2^2 / y_1^2).$$

## Двошлейфний спрямований відгалужувач

Коефіцієнт поділу потужності:

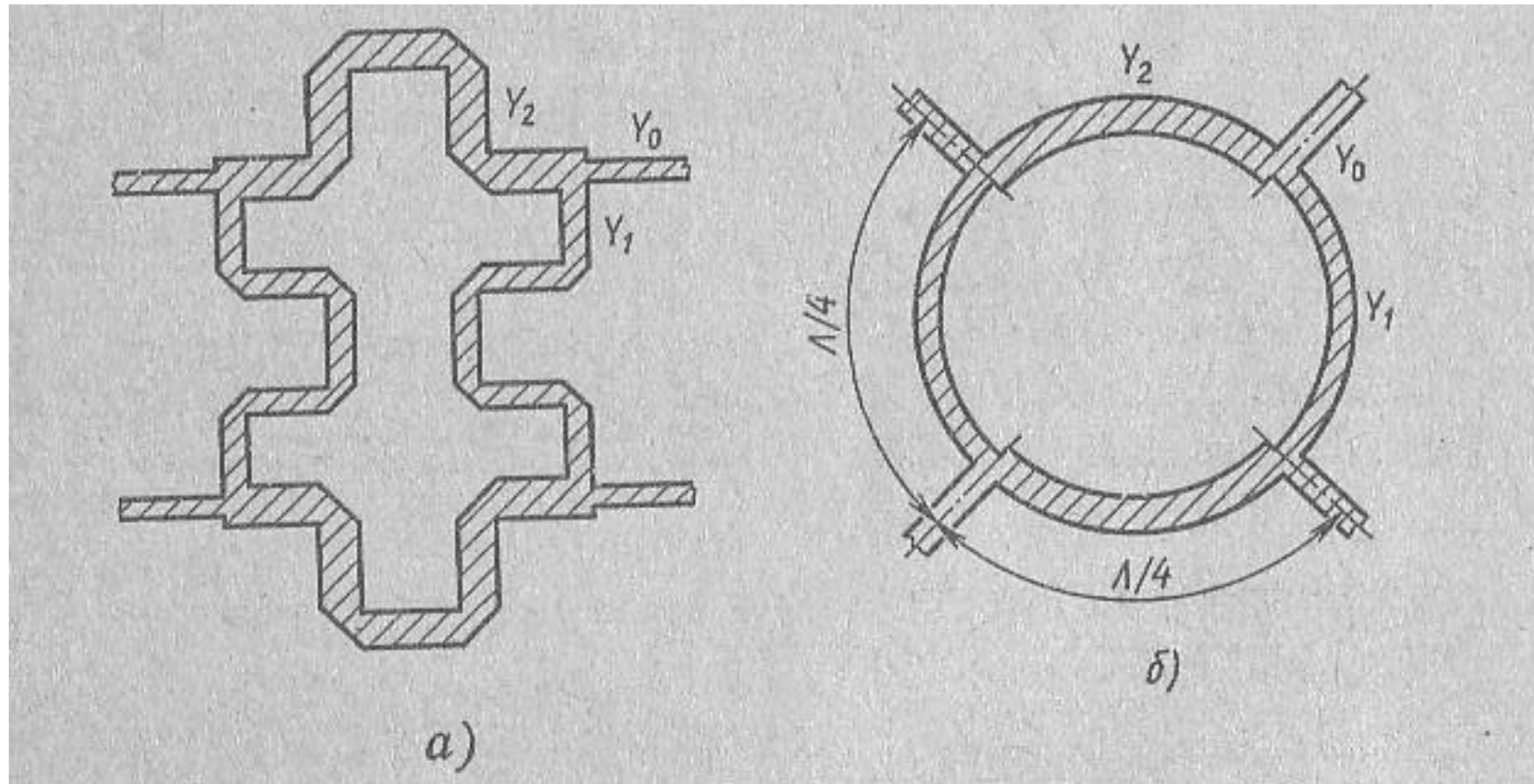
$$m = \frac{|\dot{S}_{31}|^2}{|\dot{S}_{41}|^2} = \frac{1}{y_1^2} = \frac{1}{y_2^2 - 1} \Rightarrow y_1 = \sqrt{1/m}, y_2 = \sqrt{m + 1/m} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Y_1 = Y_0 \sqrt{1/m}, Y_2 = Y_0 \sqrt{m + 1/m}$$

Двошлейфний СВ є квадратурним, оскільки

$$\arg(\dot{S}_{31}/\dot{S}_{41}) = \pi/2.$$

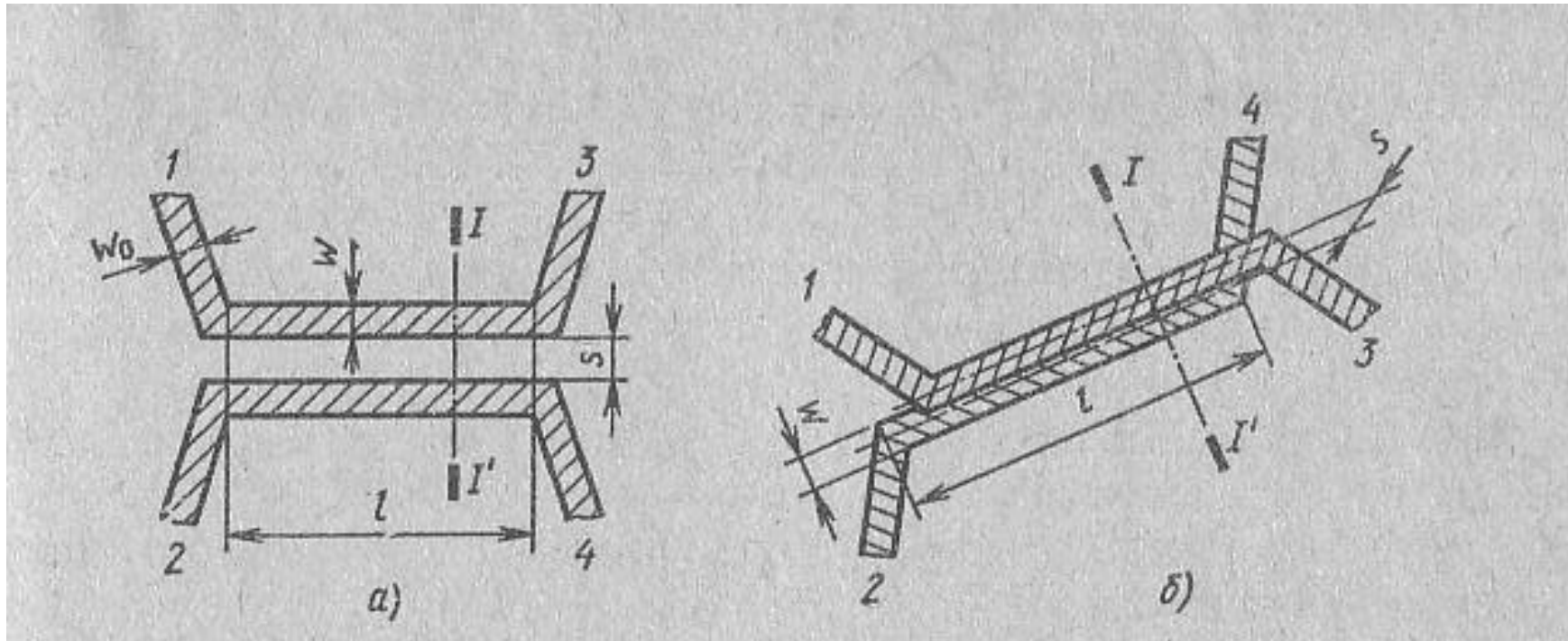
Властивостями мосту цей СВ буде при  $m=1$ , тобто при  $Y_1 = Y_0, Y_2 = Y_0 \sqrt{2}$ .

## Двошлейфний спрямований відгалужувач



Примеры топологий двухшлейфного НО уменьшенных размеров

## СВ на зв'язаних лініях



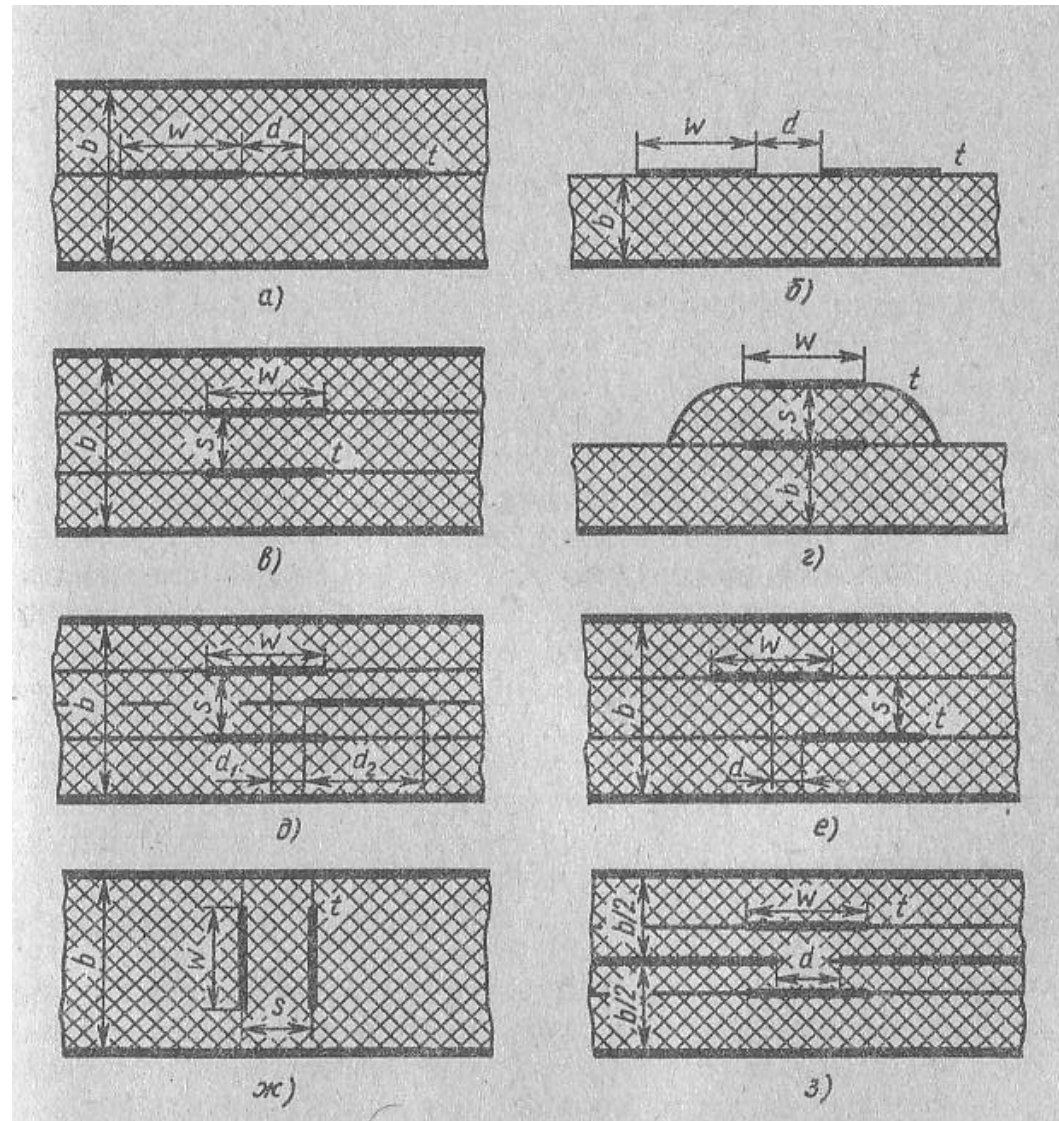
*СВ на зв'язаних лініях (СВ з розподіленим електромагнітним зв'язком)*

*з бічним (а) та лицевим (б) зв'язком*

Довжина області зв'язку становить непарну кількість чвертей довжин хвиль у ЛП  $\Lambda$  на середній частоті робочого діапазону. Зазвичай це  $\Lambda/4$ .

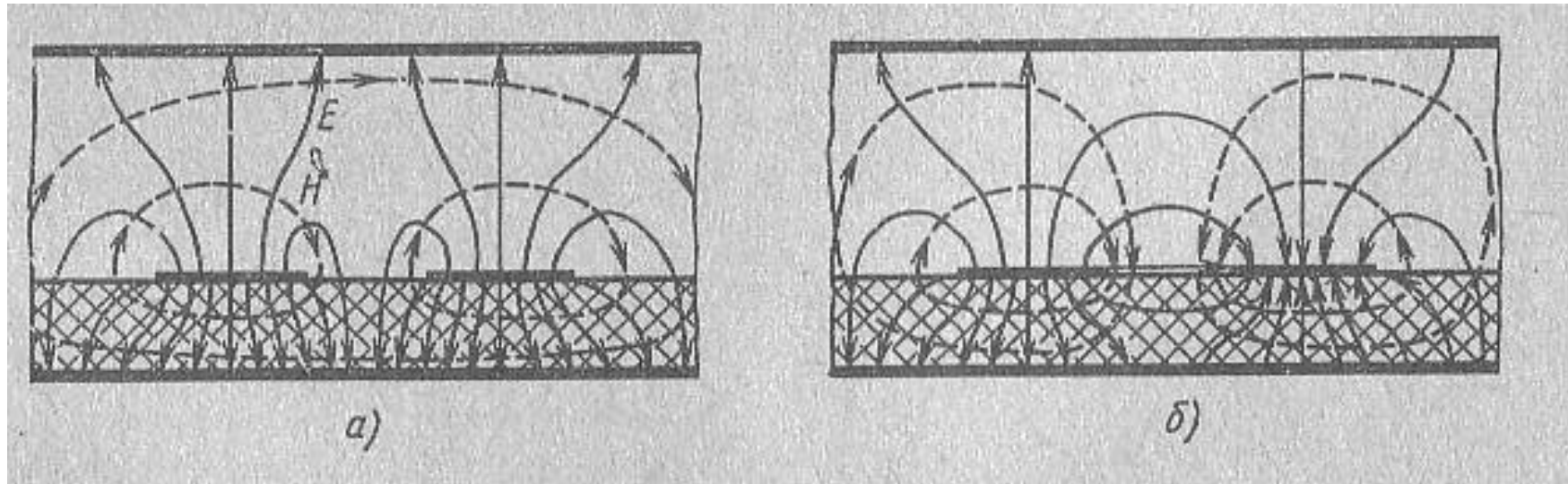
**Такий відгалужувач є протиспрямованим і квадратурним!**

## СВ на зв'язаних лініях



Приклади поперечних перерізів СВ на зв'язаних лініях

## СВ на зв'язаних лініях



Суттєвим недоліком СВ на зв'язаних несиметричних лініях є відмінність сталих поширення парних і непарних хвиль.

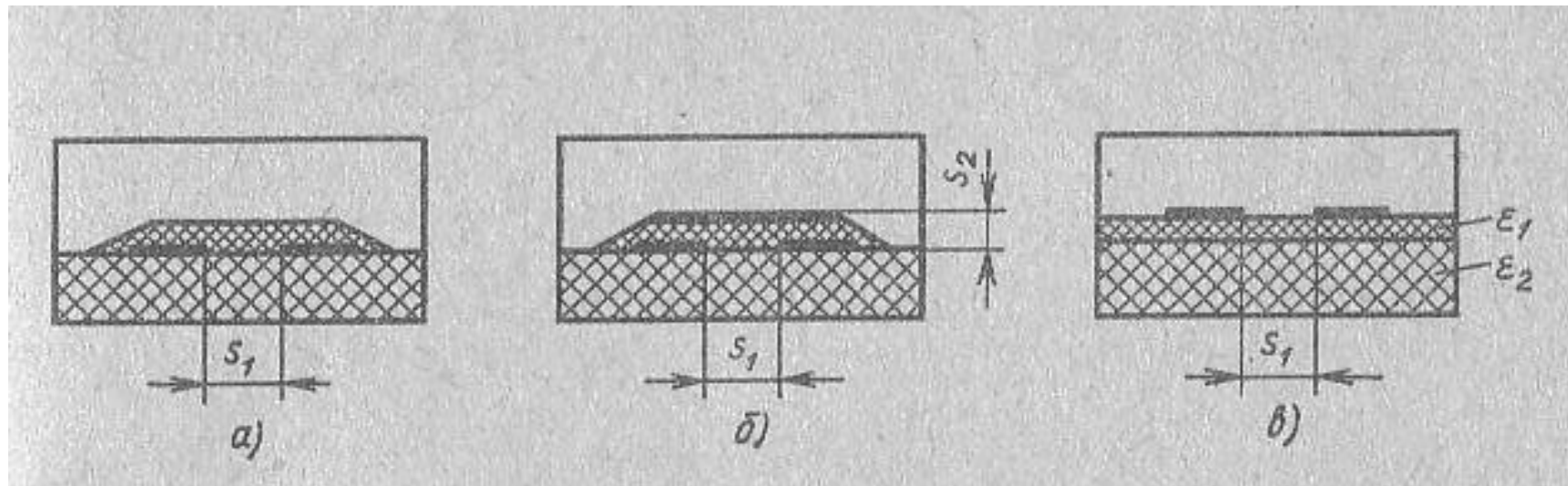
На рисунку (а) показано структуру поля парної хвилі, на рисунку (б) – непарної.

Парна хвиля поширюється переважно у підкладці, а непарна хвиля значною мірою витісняється у повітря. Тому ефективна діелектрична проникність для парної та непарної хвиль відрізняються, внаслідок чого будуть відрізнятися швидкості поширення цих хвиль і фазові зсуви, набуті на довжині області зв'язку.

## СВ на зв'язаних лініях

При збільшенні коефіцієнта зв'язку збільшується різниця сталих поширення, напрями поширення енергії у первинній та вторинній лініях співпадають, спотворюються фазові співвідношення сигналів і погіршуються характеристики СВ. **Спрямованість СВ на зв'язаних лініях зменшується зі збільшенням ступеня зв'язку.**

Вирівняти фазові швидкості парної та непарної хвиль можна за допомогою певних конструкційних змін такого відгалужувача – рисунок.



а – додатковим шаром діелектрика;

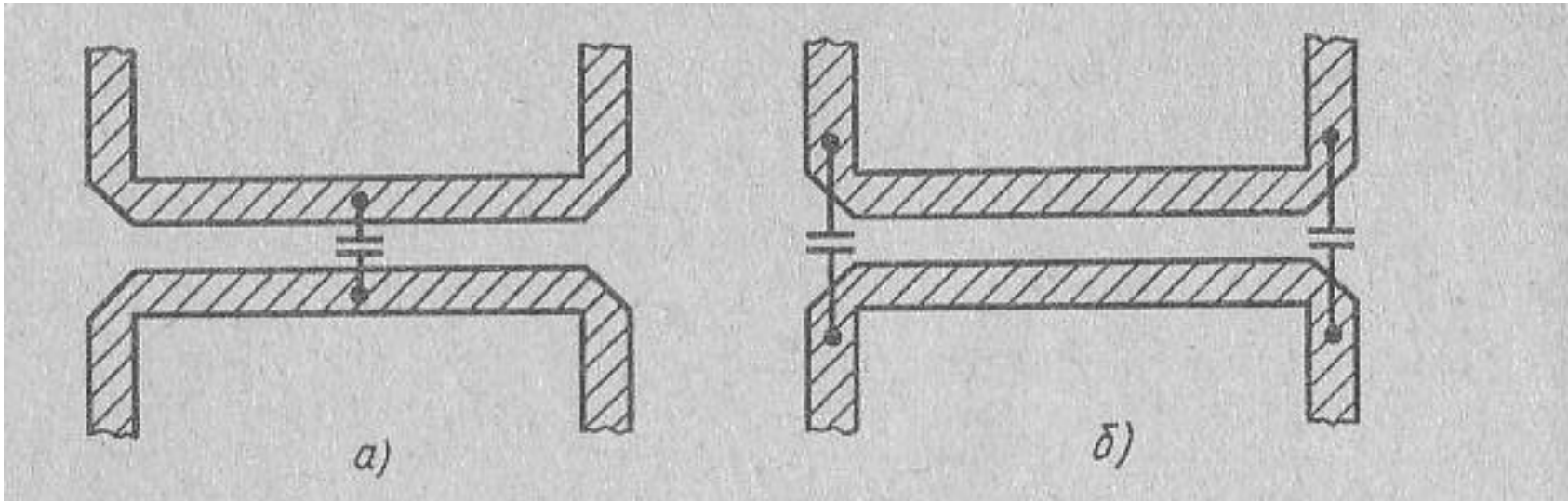
б – додатковим провідником із вільним потенціалом;

в – підкладкою з неоднорідним заповненням.



## СВ на зв'язаних лініях

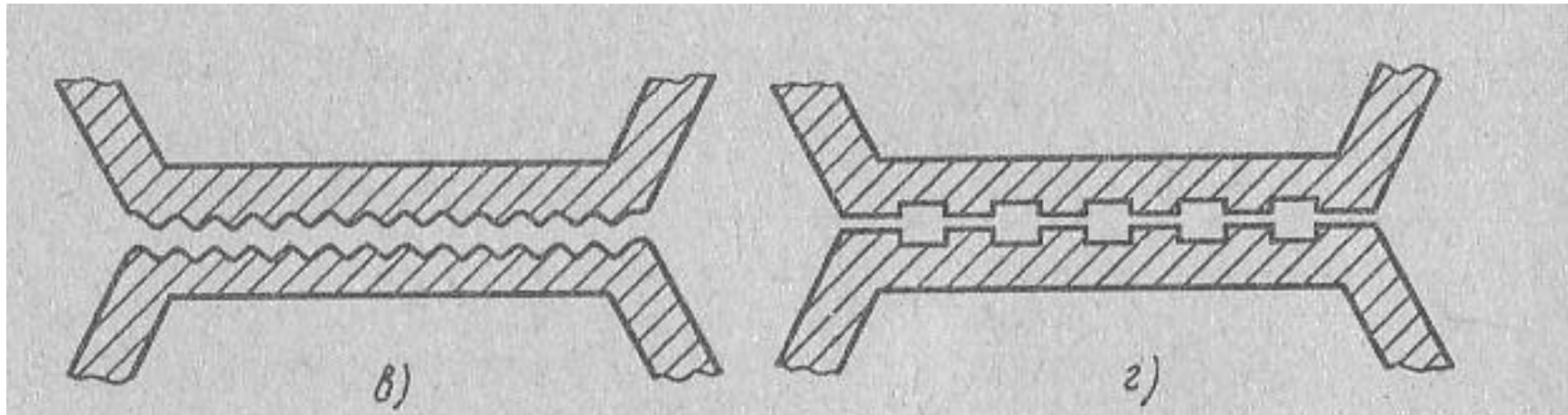
Вирівняти фазові швидкості у СВ також можна шляхом включення конденсатора у середину області зв'язку (а) чи конденсаторів по краях області зв'язку (б) – рисунок.



## СВ на зв'язаних лініях

Вирівняти фазові зсуви парних і непарних хвиль хвиль також можна використанням періодичного профілю області зв'язку – пилкоподібного (в) чи східчастого (г).

У такій структурі збільшується довжина шляху непарної хвилі порівняно з парною, оскільки струми непарної хвилі витісняються до внутрішніх країв провідників в області зв'язку, а струми парної хвилі – до зовнішніх. Цим і забезпечується вирівнювання фазових зсувів.



## СВ на зв'язаних лініях

**СВ із сильним зв'язком реалізувати досить просто використовуючи зв'язані лінії з лицевим зв'язком.**

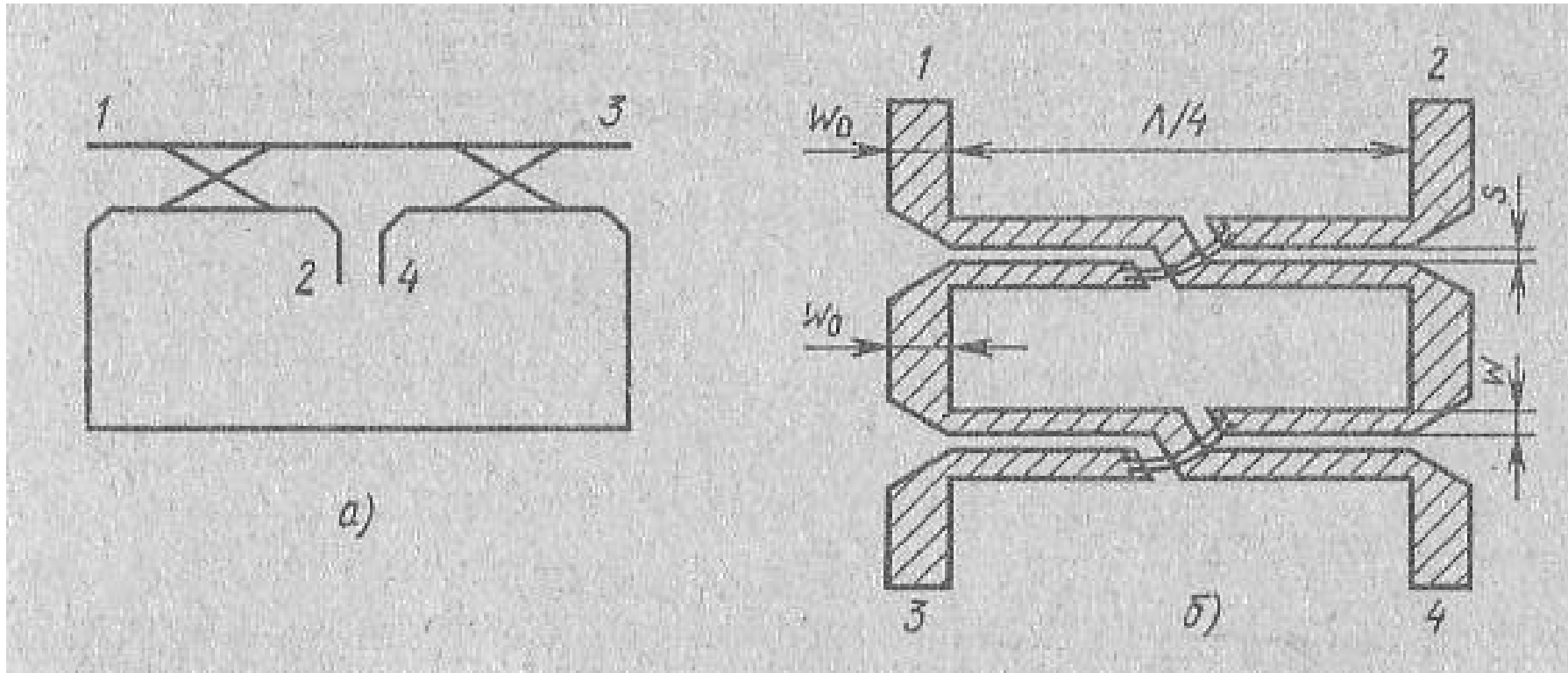
**Зв'язані лінії з бічним зв'язком дозволяють створювати лише слабкозв'язані СВ, що обумовлено значними технологічними труднощами.**

Разом з цим, найпростішими у технологічному відношенні є зв'язані несиметричні МСЛ, виконані у єдиному технологічному циклі, без додаткового складання, добре спряжувані зі схемами, які містять навісні компоненти. Це спричиняє інтерес до таких конструктивних рішень, які допускають реалізацію сильнозв'язаних СВ при досить великих, технологічно здійснених зазорах між зв'язаними лініями.

Вказані властивості має тандемний СВ – наст. слайд.

## СВ на зв'язаних лініях

Тандемний СВ є з'єднанням двох однакових СВ на зв'язаних лініях передачі – рисунок.



## СВ на зв'язаних лініях

Матриця розсіяння тандемного СВ, з точністю до фазового множника, визначається довжиною підвідних і з'єднувальних ліній:

$$(\dot{S}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & B & A \\ A & B & 0 & 0 \\ B & A & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$A = \frac{1 - r^2 \sin^2 \Theta}{\left(\cos \Theta + i \sin \Theta \sqrt{1 + r^2}\right)^2}, \quad B = \frac{i 2r \sin \Theta}{\left(\cos \Theta + i \sin \Theta \sqrt{1 + r^2}\right)^2},$$

$$r = \frac{k_{cp}}{\sqrt{1 - k_{cp}^2}}, \quad k_{cp} \text{ — коефіцієнт зв'язку відгалужувачів, з яких}$$

складається даний СВ;

$$\Theta \text{ — електрична довжина відгалужувачів, з яких}$$

складається даний СВ;

на середній частоті робочого діапазону  $\Theta = \pi/2$ .

## СВ на зв'язаних лініях

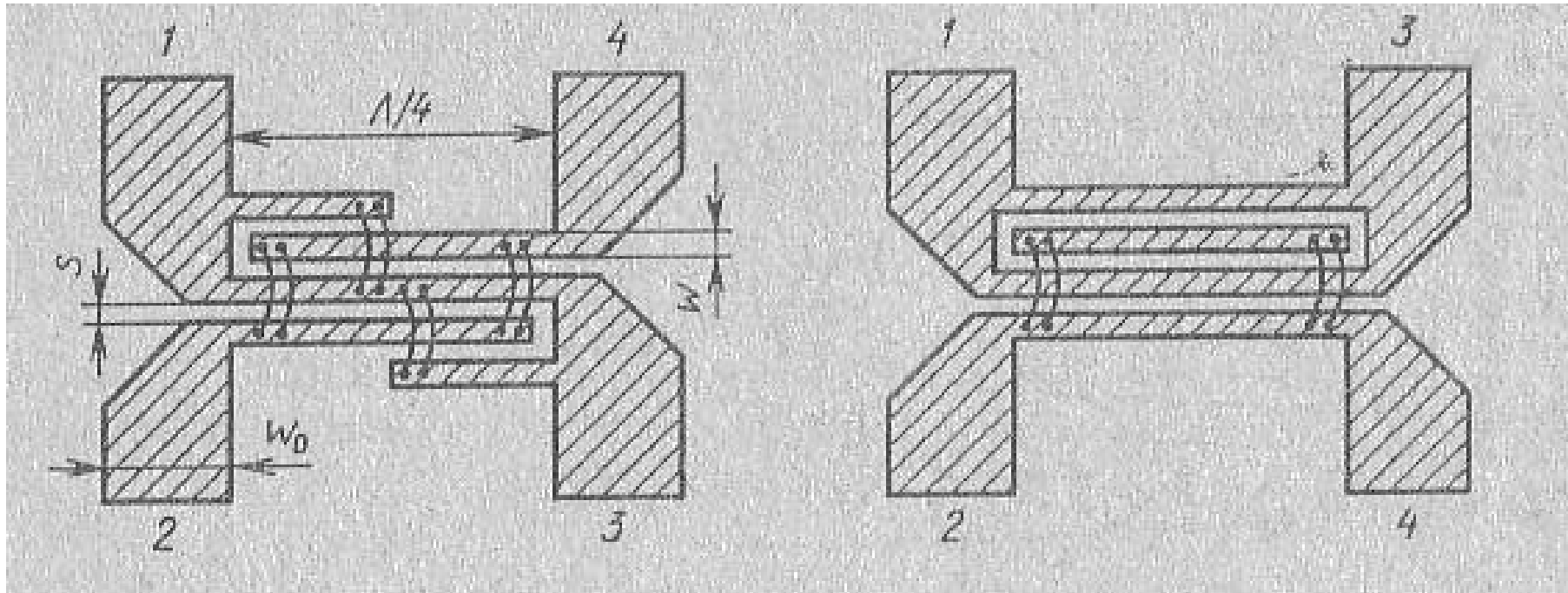
### Переваги тандемного СВ:

- дозволяє збільшити зазор між зв'язаними лініями з бічним зв'язком;
- дозволяє знизити вимоги до допусків на геометричні розміри;
- менш чутливий до відхилення геометричних розмірів від номінального значення, порівняно зі звичайним СВ на зв'язаних лініях;
- більша широкосмуговість порівняно з одиночним СВ.

## СВ на зв'язаних лініях

Інший варіант сильнозв'язаного СВ на несиметричних МСЛ: зустрічно-стрижневі структури (рисунок).

Інша їхня назва – «відгалужувачі Ланге».

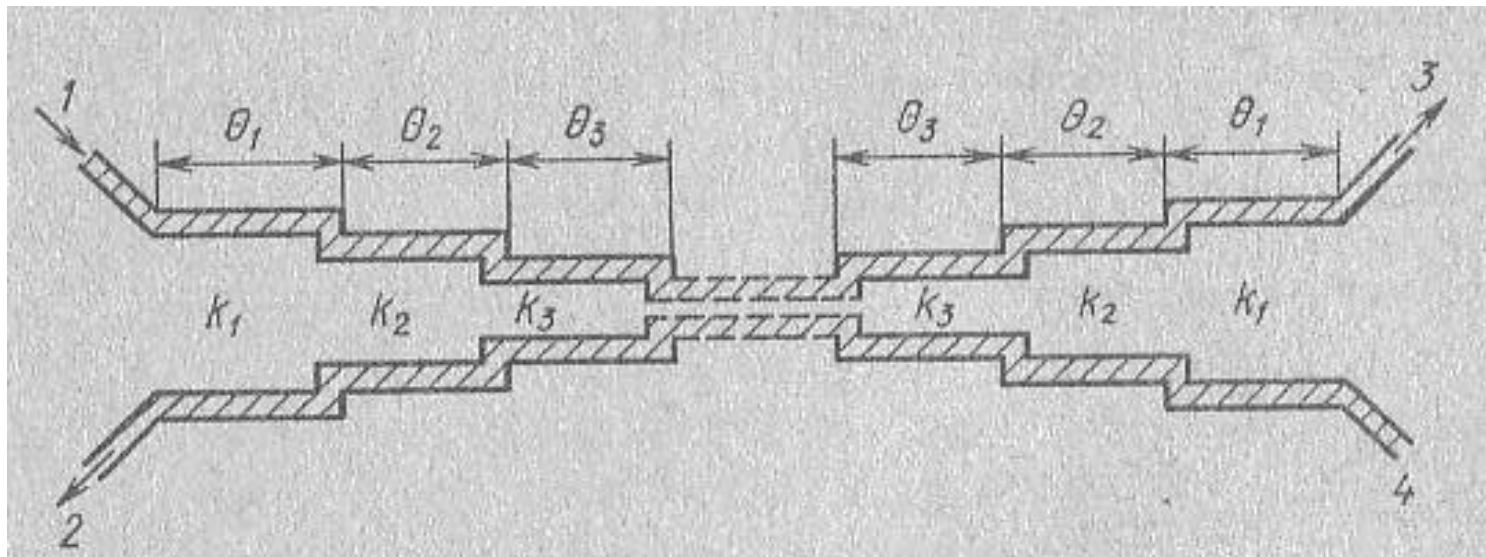


Вхідна потужність у плечі 1, ділиться порівну між плечами 2 і 3. Плечі 1 і 4 є розв'язаними. Сигнал у плечі 2 випереджає на  $\pi/2$  сигнал у плечі 3.

## СВ на зв'язаних лініях

Недоліком тандемного відгалужувача та відгалужувача Ланге є наявність дровових перемичок, які припаюють чи приварюють до ліній передачі. Для зменшення паразитних індуктивностей їх утворюють з декількох дротиків.

Багатооктавні смуги пропускання можуть бути у СВ, які складаються з каскадного з'єднання декількох ланок однакової електричної довжини  $\Theta$  з різними коефіцієнтами зв'язку – рисунок.



Можна зробити СВ з плавною зміною за довжиною коефіцієнта зв'язку.

Недоліки таких СВ – порівняно великі габарити.