Мікрохвильові пристрої та технології

Пристрої керування фазою та амплітудою сигналу

Загальна інформація

Типи керуючих пристроїв (дво- або чотириполюсні пристрої зі змінюваними під впливом електричного чи магнітного поля параметрами):

- **вимикачі** (чотириполюсники, в яких вимикання реалізують за допомогою відбиття чи поглинання);

- **комутатори** (багатополюсники, які комутують сигнали з мінімальними втратами та при виконанні умов узгодження);

- **відбивні фазообертачі** (двополюсники, з керованою фазою коефіцієнта відбиття (плавно чи дискретно), при значенні модуля коефіцієнта відбиття, близькому до одиниці);

- **прохідні фазообертачі** (узгоджені реактивні чотириполюсники, фаза коефіцієнта передачі яких змінюється плавно чи дискретно);

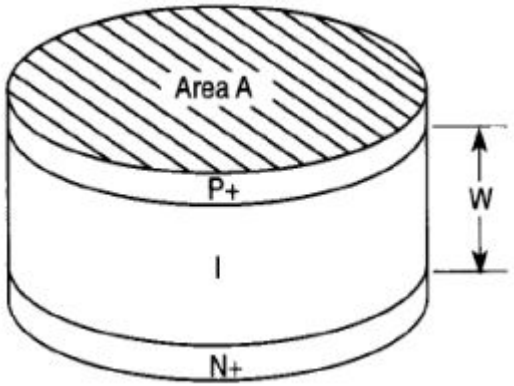
- **атенюатори** (чотириполюсники, які забезпечують плавну чи дискретну зміну внесеного послаблення від мінімального до максимального);

- **обмежувачі потужності** (узгоджені чотириполюсники (часто самокеровані), які пропускають слабкі сигнали практично без послаблення, а потужні – з обмеженням, якщо рівень сигналу перевищує заданий пороговий рівень).

p-i-n-діоди

На сьогодні значного поширення набули керуючі пристрої на напівпровідникових діодних структурах (*p-n*, *p-i-n*, *n-i-p-i-n*). Це обумовлено їхніми малими масогабаритними показниками, технологічною простотою виготовлення.

Роботу *p-i-n*-діода побудовано на зміні активної складової опору *i*-ділянки при додатньому зміщенні, коли крізь діод протікає струм. При відсутності додатньої напруги зміщення опір діода становить одиниці кОм. При додатньому зміщенні (зазвичай близько 1 В) опір зменшується до одиниць Ом та залежить від значення тока.



Модель внутрішньої будови

p-i-n-діода

Залежно від товщини бази W:

десятки мкм - «тонкі» *p-i-n*-діоди;

десяті долі мм - «товсті» *p-i-n*-діоди.

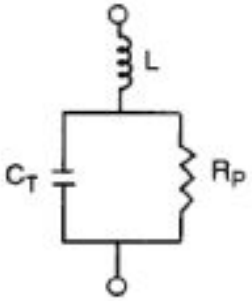
Велика площа переходу та об’єм високоомної ділянки визначають те, що **характеристики *p-i-n*-діода не залежать від падаючої на діод мікрохвильової потужності (аж до декількох Вт у режимі неперервної потужності).**

p-i-n-діоди

Еквівалентні схеми *p-i-n*-діода

Відкритий стан

(forward bias model)



Закритий стан

(reverse bias model)

Основні параметри *p-i-n*-діода:

R_S – опір втрат у відкритому стані (опір діода при протіканні крізь нього керуючого струму) (визначає внесені діодом втрати у лінії передачі);

L – індуктивність виводів;

C_T – ємність діода (значною мірою визначає верхню робочу частоту діода);

R_P – опір втрат у закритому стані (також опір знеструмленого діода) (визначає початкові втрати мікрохвильової потужності, обумовлені наявністю діода у лінії передачі);

τ – час життя носіїв заряду;

P_D - максимально допустима потужність розсіювання (при цьому рівні потужності температура діода не перевищує граничного значення).

Вплив значення керуючого струму на швидкодію p-i-n-діода

(типові значення для сучасних p-i-n-діодів)

I-Width	To 10 mA from		To 50 mA from		To 100 mA from	
µm	10 V	100 V	10 V	100 V	10 V	100 V
175	7.0 µS	5.0 µS	3.0 µS	2.5 µS	2.0 µS	1.5 µS
100	2.5 µS	2.0 µS	1.0 µS	0.8 µS	0.6 µS	0.6 µS
50	0.5 µS	0.4 µS	0.3 µS	0.2 µS	0.2 µS	0.1 µS

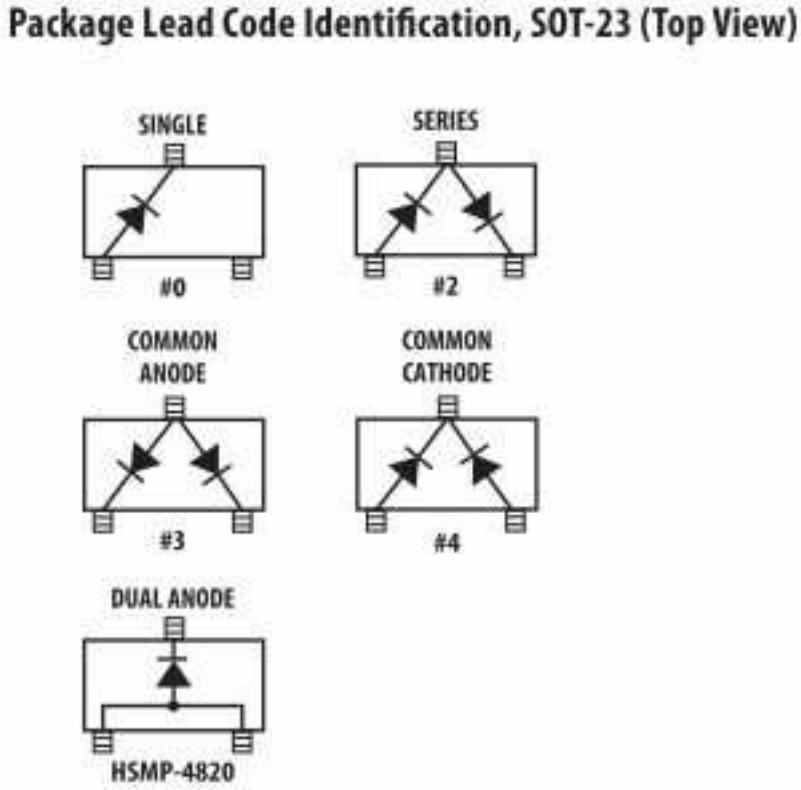
p-i-n-діоди

Зовнішній вигляд типових безкорпусних *p-i-n*-діодів

p-i-n-діоди

Для зменшення паразитних реактивностей *p-i-n*-діоди випускають без корпусу. Також поширеним варіантом є *n-i-p-i-n*-структура, яка є двома *p-i-n*-структурами, що з'єднано однойменними електродами з тонким дротиковим виводом від спільного електроду для подачі керуючої напруги.

Структури такого, а також інших типів випускають і у корпусному варіанті – рисунок нижче.

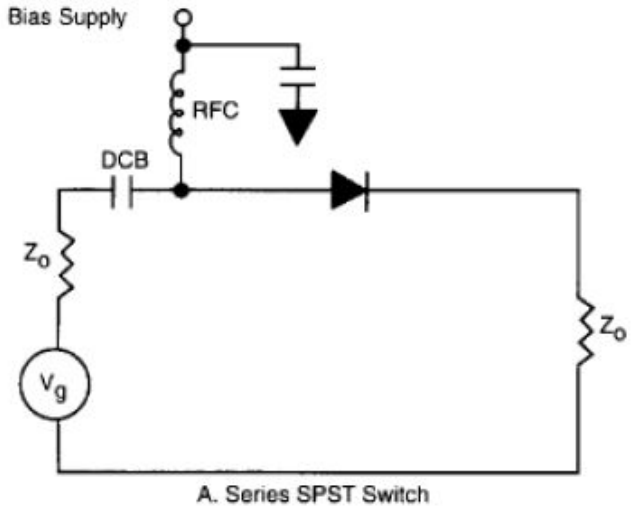


***p-i-n*-діоди**

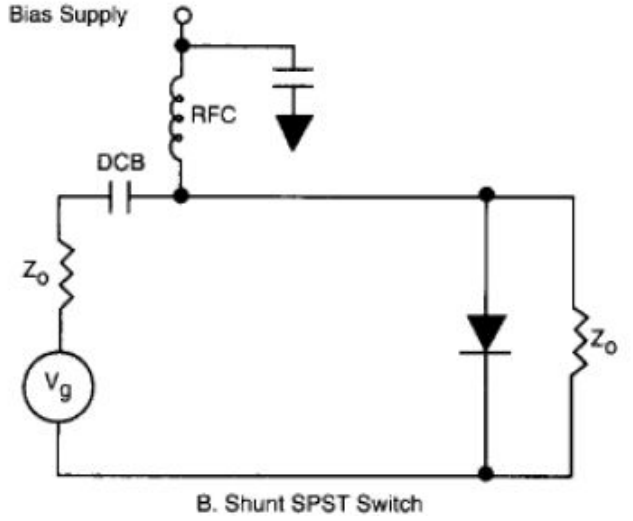
Зовнішній вигляд типових корпусних *p-i-n*-діодів

Вимикачі/перемикачі на p-i-n-діодах

Схеми ввімкнення *p-i-n*-діода бувають: послідовно у лінію передачі або паралельно до лінії передачі мікрохвильової потужності.

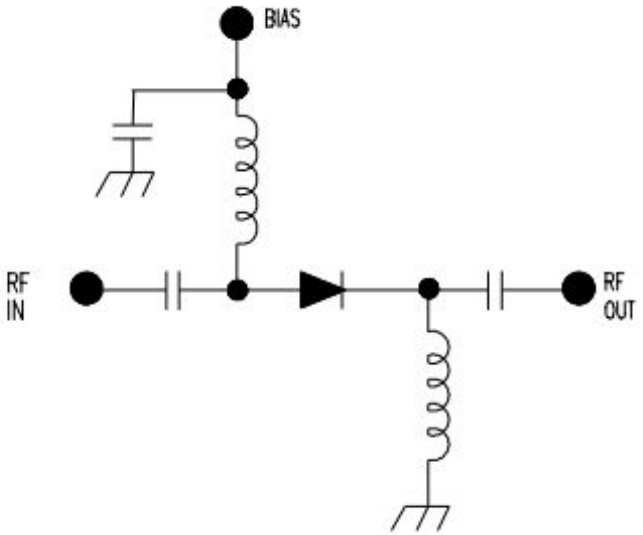


A. Series SPST Switch

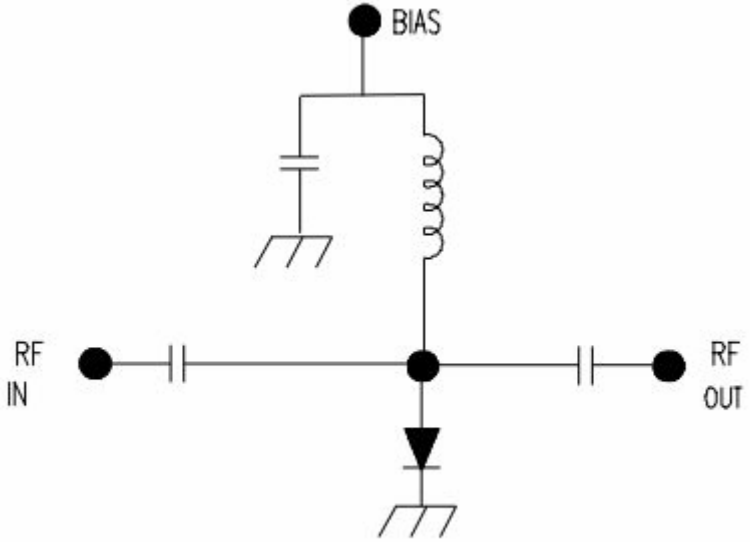


B. Shunt SPST Switch

Вимикачі/перемикачі на p-i-n-діодах



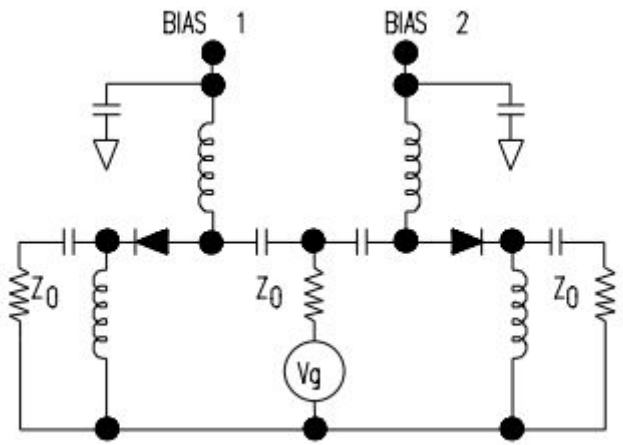
З послідовним вмиканням p-i-n-діода



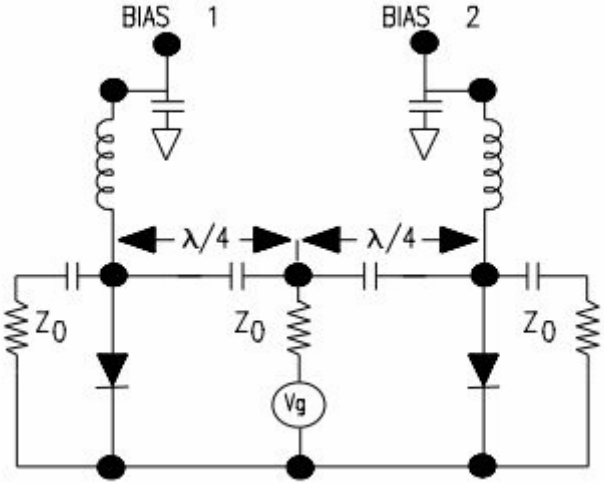
З паралельним вмиканням p-i-n-діода

Принципи побудови вимикачів на p-i-n-діодах

Вимикачі/перемикачі на p-i-n-діодах



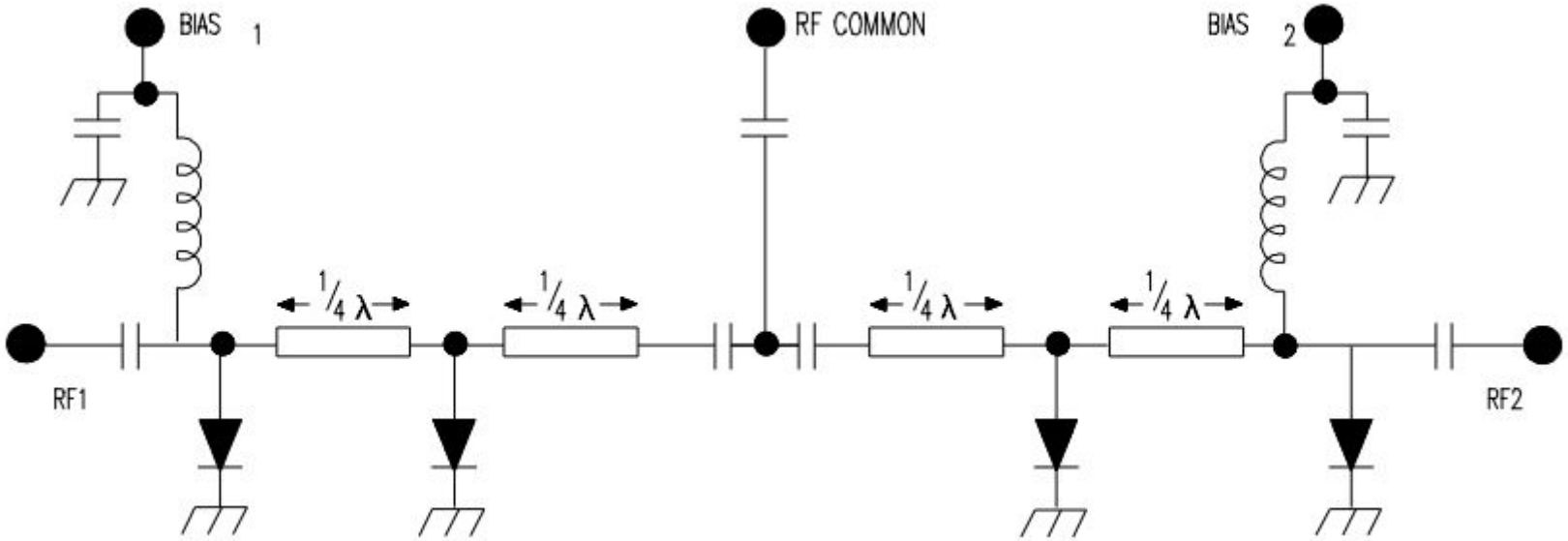
С последовательным включением p-i-n-диода



С параллельным включением p-i-n-диода

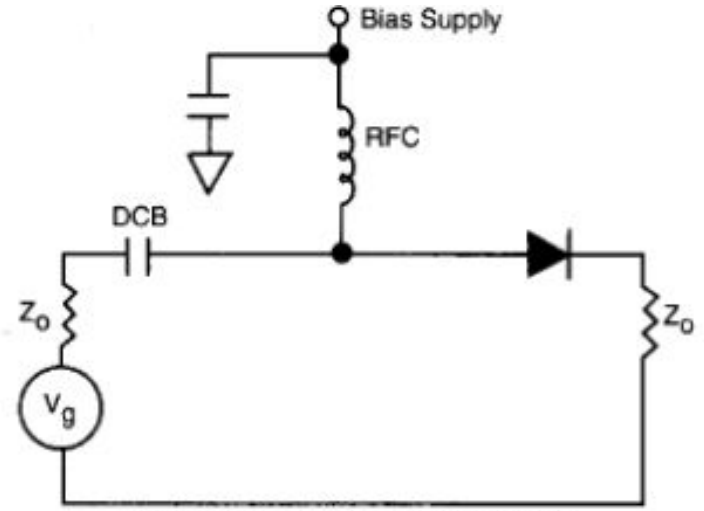
Принципи побудови вимикачів на p-i-n-діодах

Вимикачі/перемикачі на p-i-n-діодах

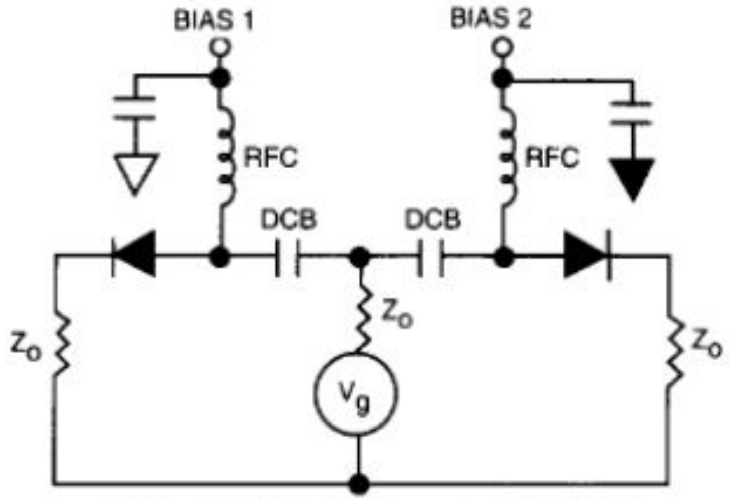


Принцип побудови перемикача на декількох p-i-n-діодах

Вимикачі/перемикачі на p-i-n-діодах



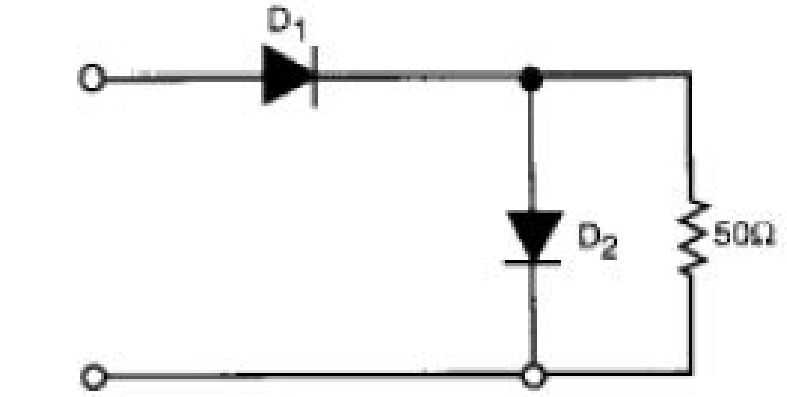
A. Single Pole Single Throw (SPST)



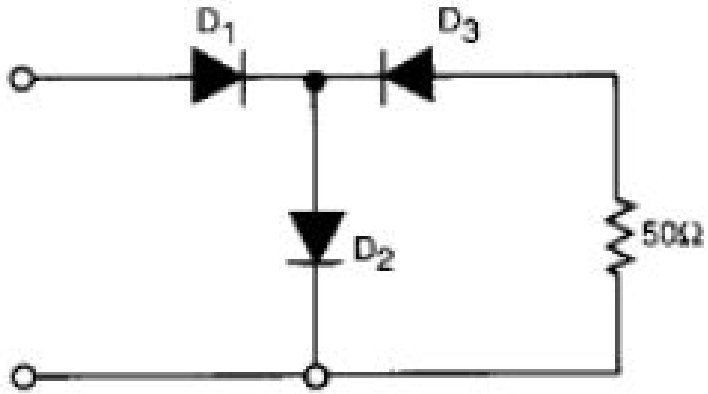
B. Single Pole Double Throw Switch (SPDT)

Вимикачі/перемикачі на p-i-n-діодах

Если уровень внесенного ослабления недостаточен, используют комбинированное соединени диодов – например такое (рисунок).



A. ELL (Series-Shunt) SPST Switch



B. TEE SPST Switch

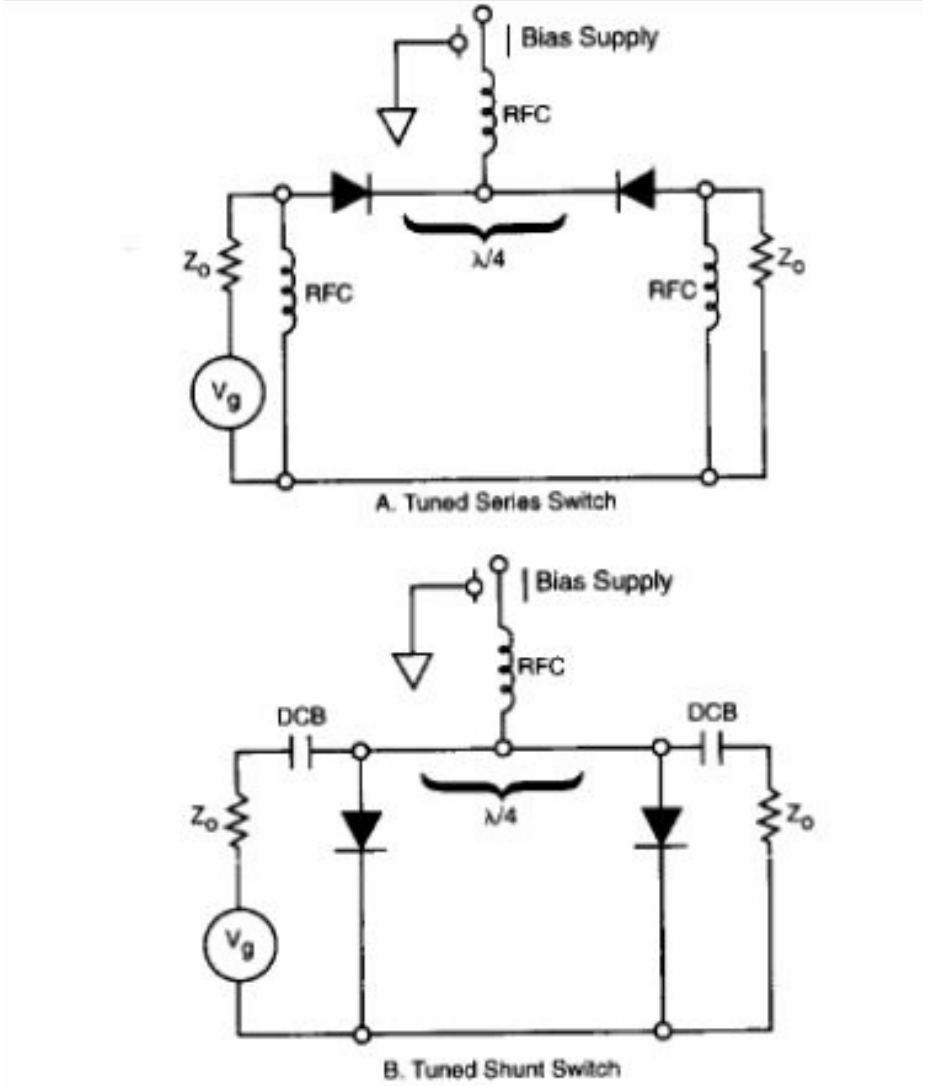
Вимикачі/перемикачі на **p-i-n-діодах**

Сравнение различных способов включения p-i-n-диодов

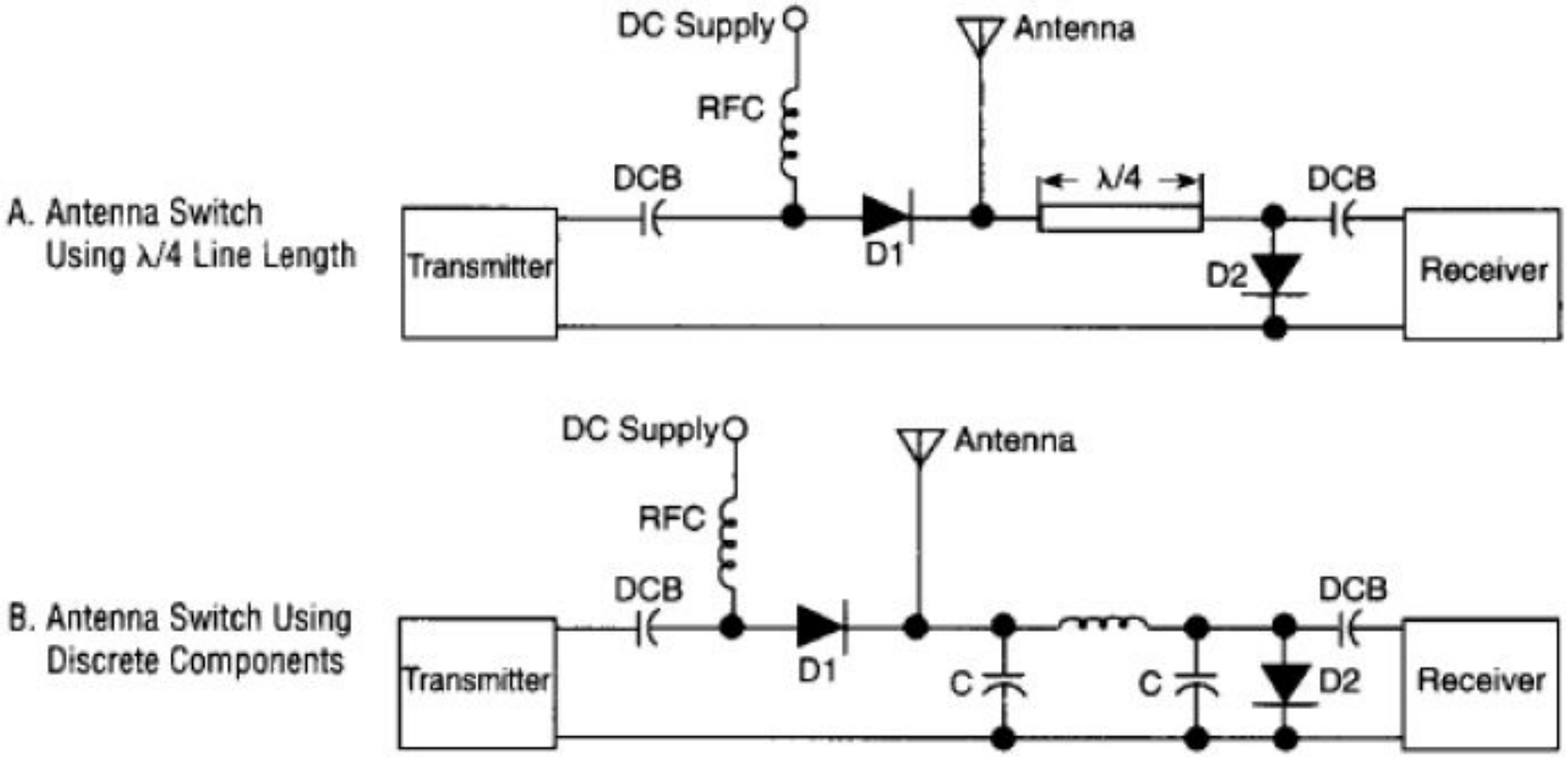
Type	Isolation	Insertion Loss (dB)
Series	$10\log_{10}\left[1+\left(\frac{X_C}{2Z_O}\right)^2\right]$	$20\log_{10}\left[1+\frac{R_S}{2Z_O}\right]$
Shunt	$20\log_{10}\left[1+\frac{Z_O}{2R_S}\right]$	$10\log_{10}\left[1+\left(\frac{Z_O}{2X_C}\right)^2\right]$
Series-Shunt	$10\log_{10}\left[\left(1+\frac{Z_O}{2R_S}\right)^2 + \left(\frac{X_C}{2Z_O}\right)^2\left(1+\frac{Z_O}{R_S}\right)^2\right]$	$10\log_{10}\left[\left(1+\frac{R_S}{2Z_O}\right)^2 + \left(\frac{Z_O+R_S}{2X_C}\right)^2\right]$
TEE	$10\log_{10}\left[1+\left(\frac{X_C}{Z_O}\right)^2\right]$ $+10\log_{10}\left[\left(1+\frac{Z_O}{2R_S}\right)^2+\left(\frac{X_C}{2R_S}\right)^2\right]$	$20\log_{10}\left[1+\frac{R_S}{Z_O}\right]$ $+10\log_{10}\left[1+\left(\frac{Z_O+R_S}{2X_C}\right)^2\right]$

Вимикачі/перемикачі на p-i-n-діодах

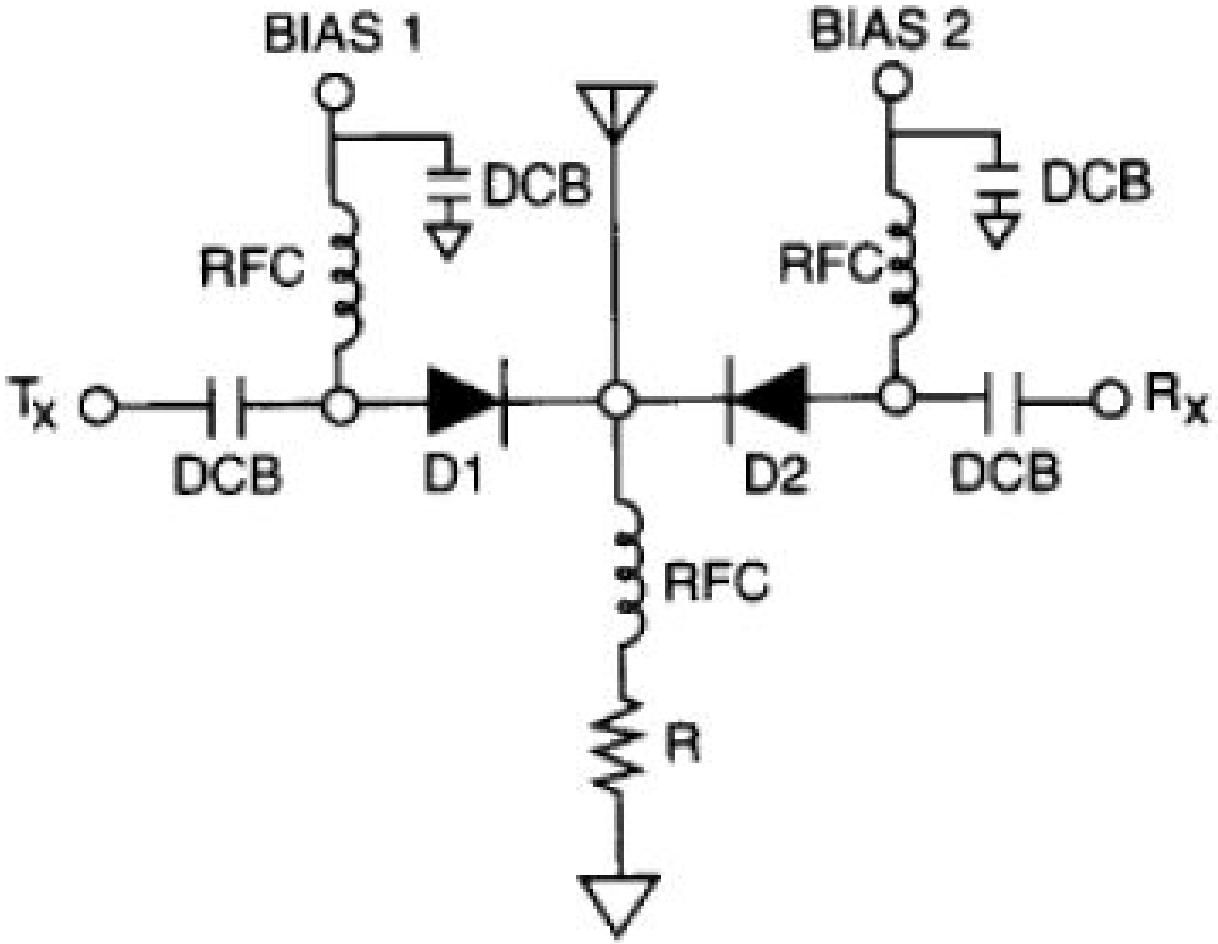
Схемы с улучшенными значениями развязки



Антенні перемикачі на p-i-n-діодах

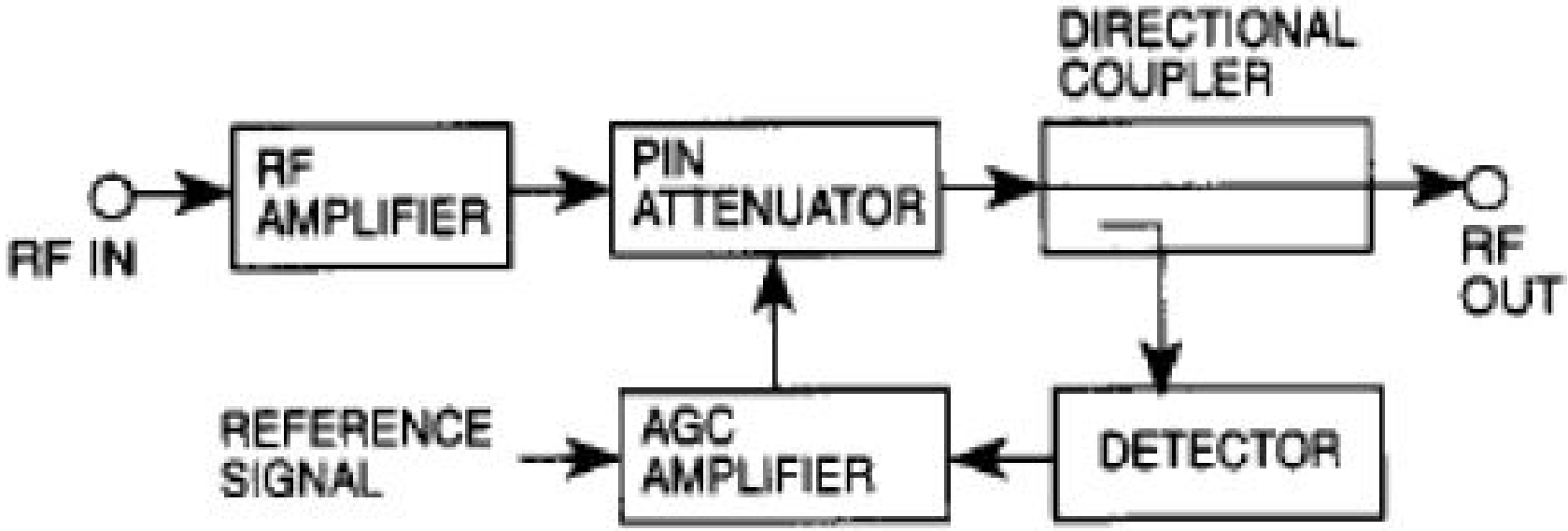


Антенні перемикачі на ***p-i-n*-діодах**



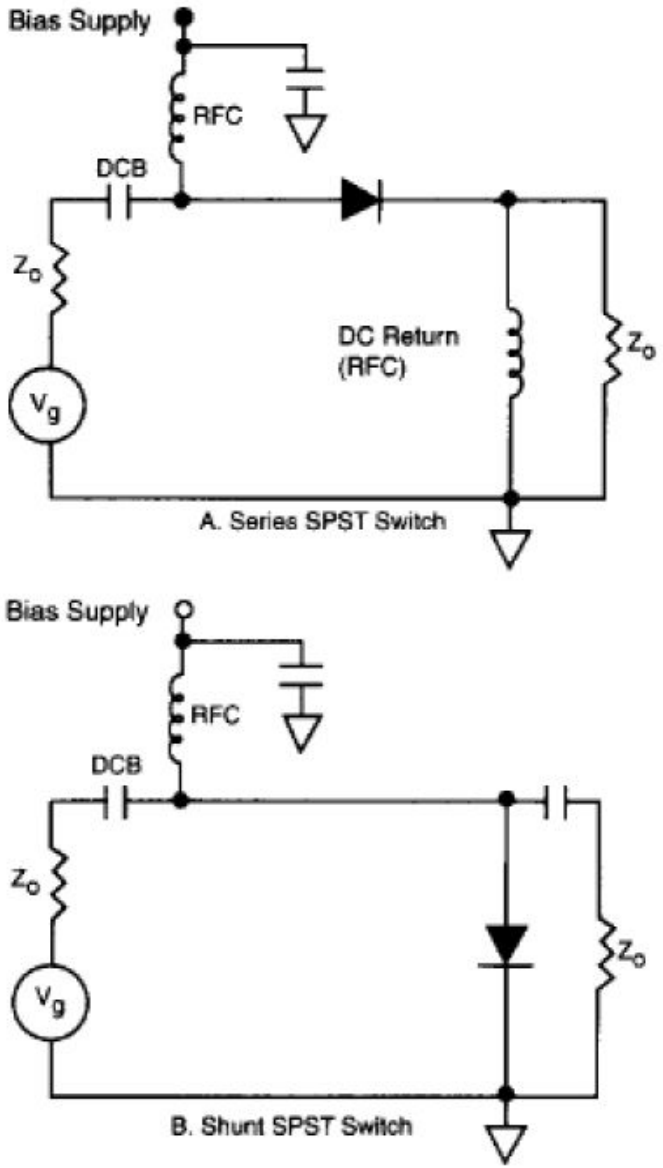
Пример широкополосного антенного переключателя

Атенюатори на p-i-n-діодах

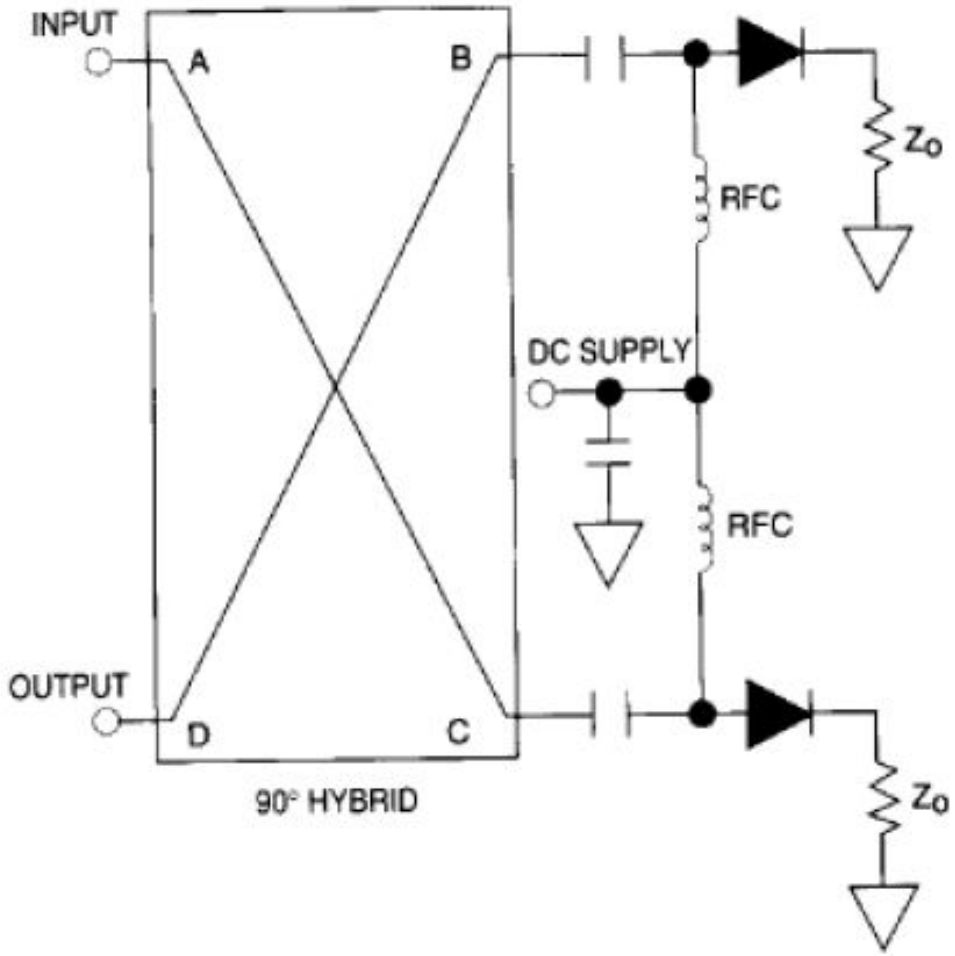


Приклад схеми АРП з використанням p-i-n-*атенюатора*

Відбивні атенюатори на p-i-n-діодах

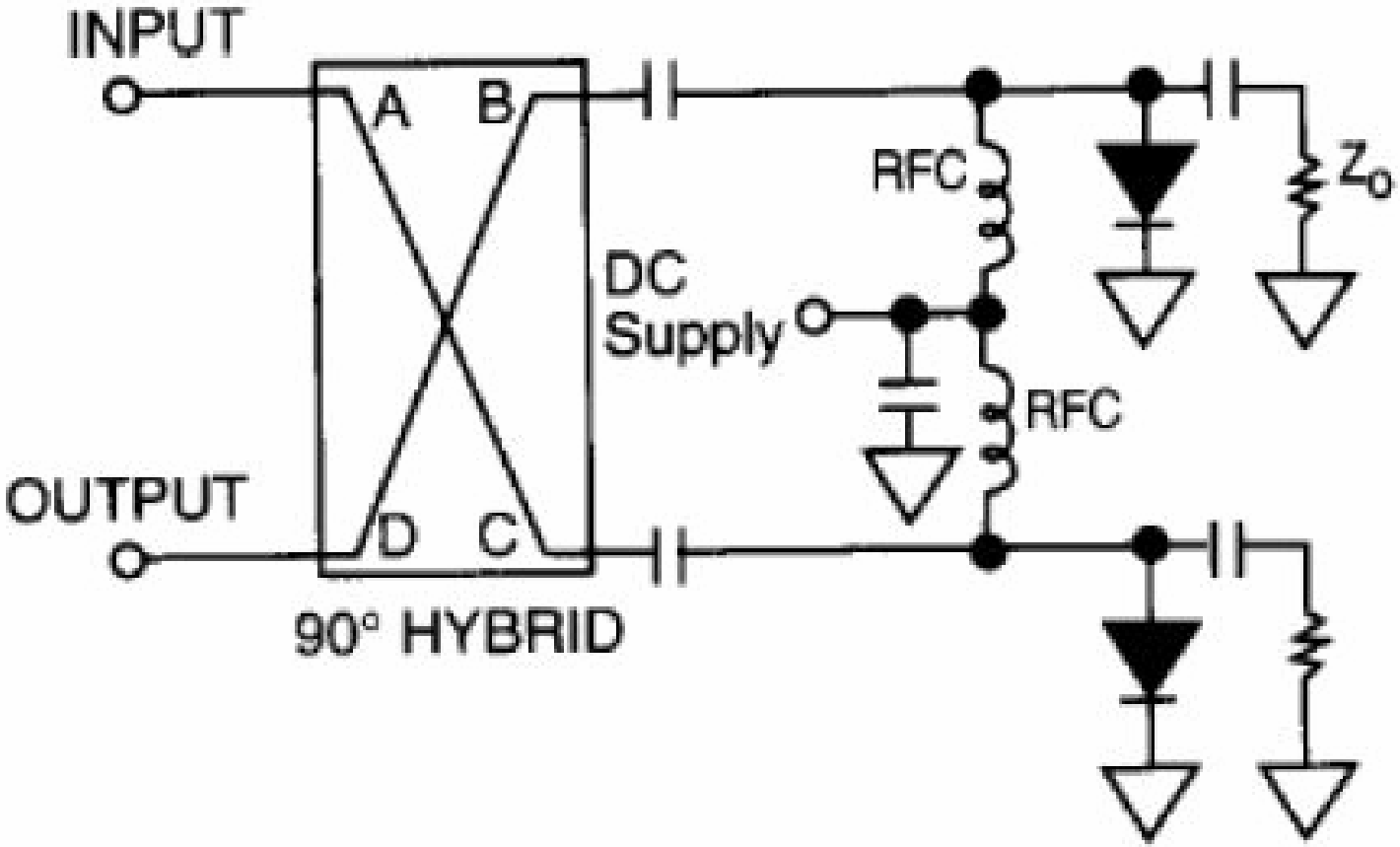


Атенюатори на квадратурних мостах



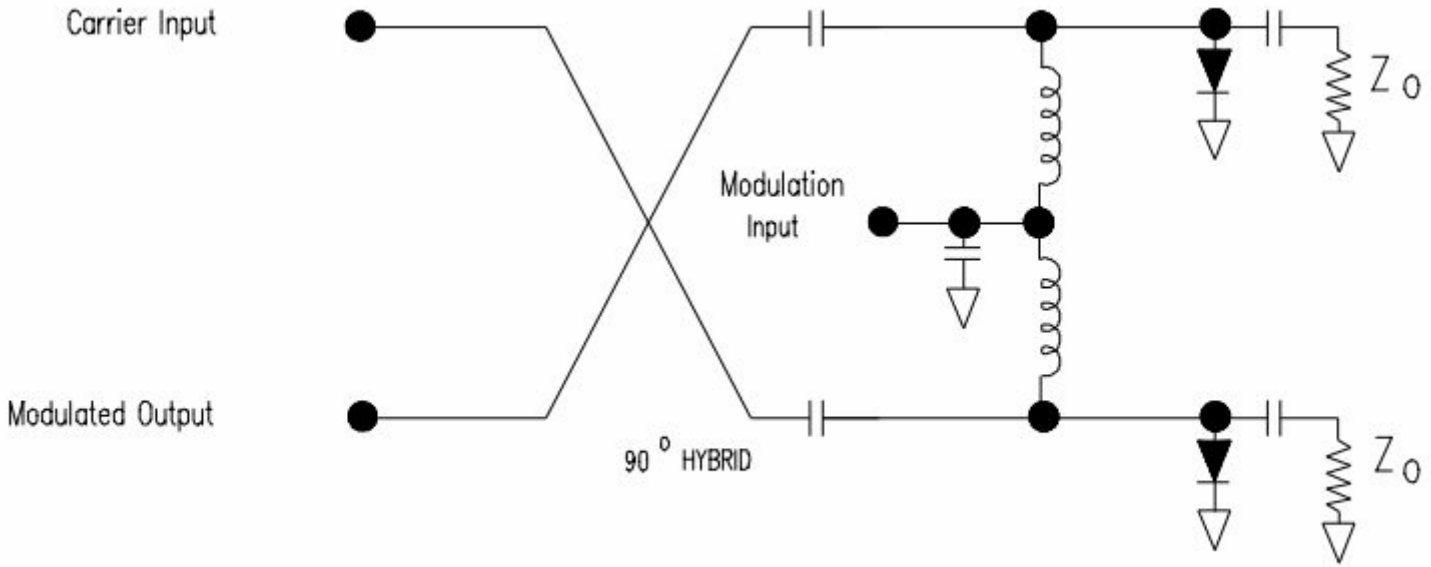
З послідовним вмиканням p-i-n-діодів

Атенюатори на квадратурних мостах

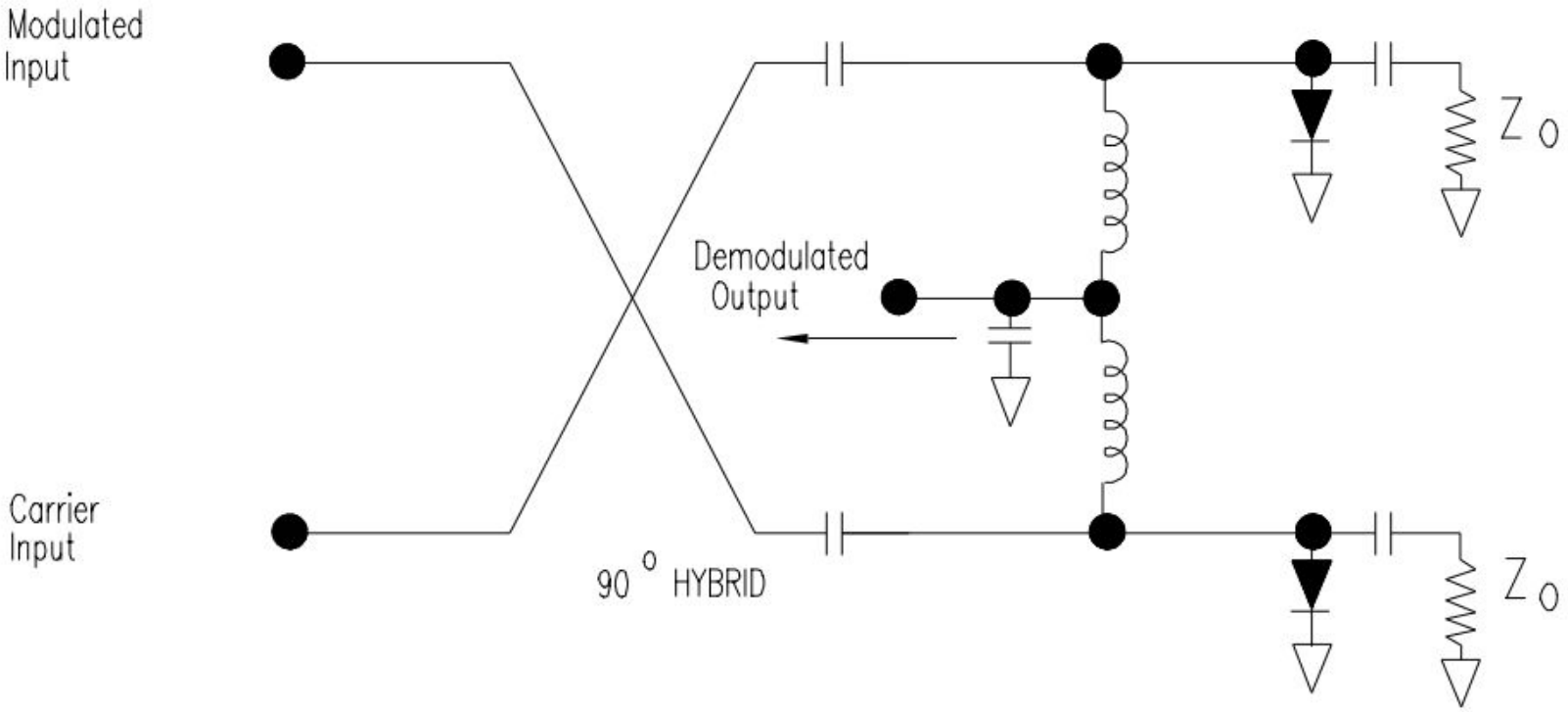


З паралельним вмиканням p-i-n-діодів

АМ-модулятори на квадратурних мостах



AM-демодулятори на квадратурних мостах



Балансний антенний перемикач на p-i-n-діодах

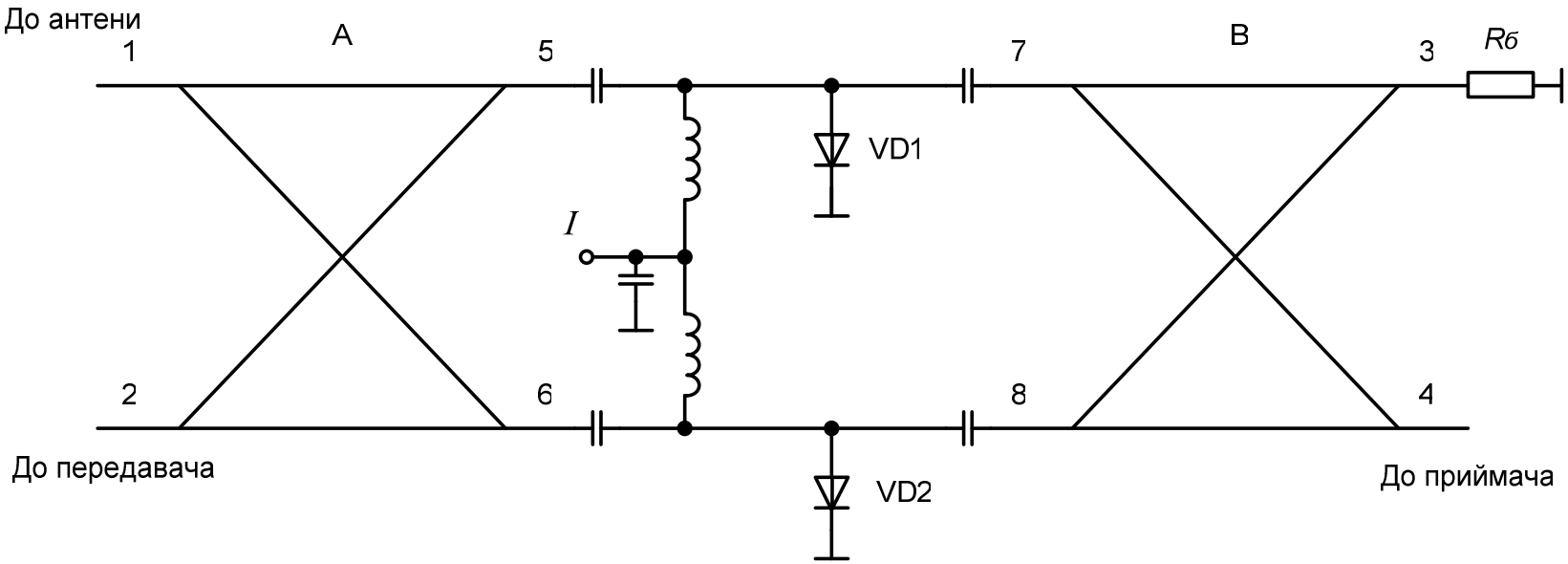


Схема балансного антенного перемикача на квадратурних мостах (діоди включено паралельно до лінії передачі)

Режим прийому – діоди закрито; режим передачі – діоди відкрито.

У момент вмикання передавача діоди перебувають у відкритому стані. Потужність передавача, яка надходить у плече 2, поділяється **мостом А** порівну між плечима 5 та 6. У плече 1 потужність не надходить. Різниця фаз коливань у плечах 5 та 6 квадратурного мосту становить 90 градусів. Відкриті діоди створюють у перерізах плечей 5 та 6 режим КЗ, і потужність відбивається. Відбиті сигнали складаються синфазно у плечі 1 та противофазно у плечі 2. Потужність передавача передається в антену з малими втратами. Незначна частина потужності через неідеальність перемикаючих елементів надходить у плечі 7 та 8.

Балансний антенний перемикач на p-i-n-діодах

Міст В забезпечує синфазне складання у плечі 3 та противофазне у плечі 4. Потужність передавача, яка просочилась, поглинає узгоджене баластне навантаження *Rб*, завдяки чому розв'язка передавача та приймача збільшується приблизно на 20 дБ.

У режимі прийому p-i-n-діоди перебувають у закритому стані. Потужність сигналу, прийнятого антеною, ділиться порівну мостом А та передається каналами 5-7 і 6-8 на міст В. Падаючі хвилі синфазно складаються у плечі 4 та противофазно у плечі 3, завдяки чому прийнятий антеною сигнал надходить на вхід приймального пристрою.

Аналогичні перемикачі можна виконати по схемі з послідовним вмиканням діодів – рисунок на наступному слайді.

Балансний антенний перемикач на p-i-n-діодах

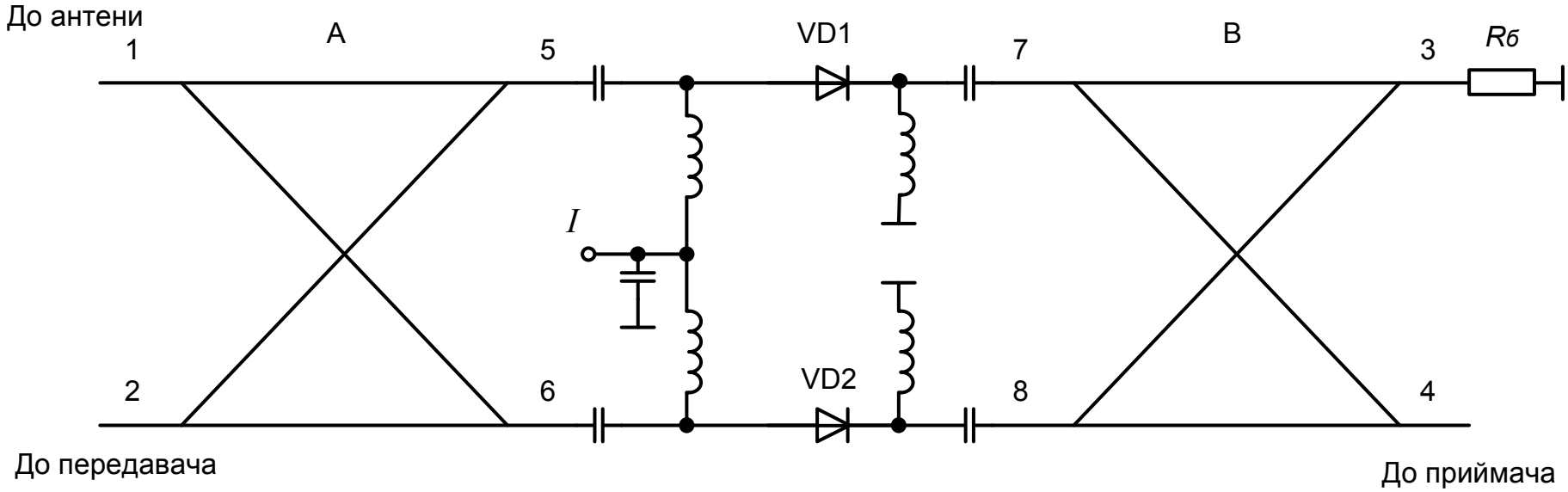


Схема балансного антенного перемикача на квадратурних мостах (діоди включено послідовно у лінію передачі)

Режим прийому – діоди відкрито; режим передачі – діоди закрито.

Балансний антенний перемикач на p-i-n-діодах

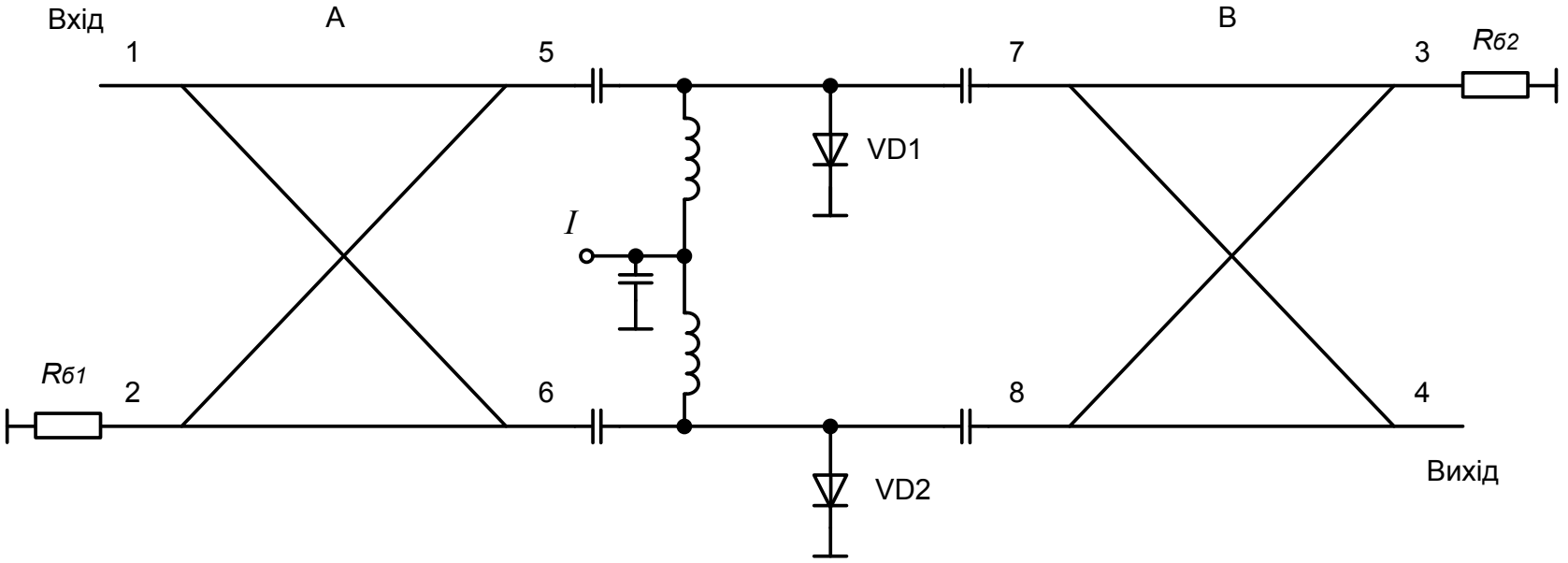


Схема невідбивного вимикача на базі антенного перемикача

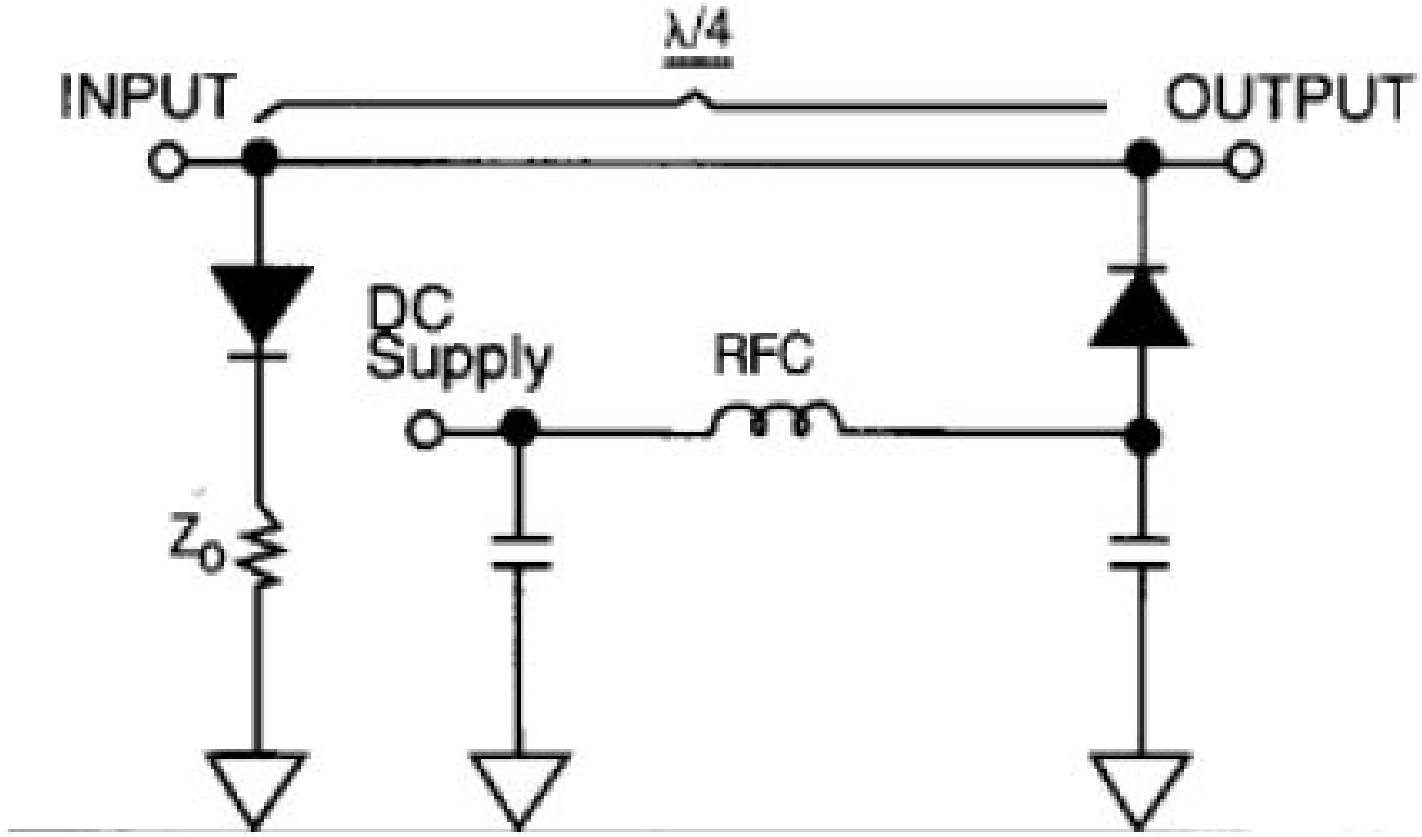
При підключенні до плеча 2 узгодженого баластного навантаження цей пристрій виконує функції невідбивного вимикача. **Стан "вимкнено" буде при відкритих діодах.** Потужність на вході поглинається баластним навантаженням *Rб1*. **У стані "ввімкнено" діоди закрито і сигнал з входу передається на вихід.**

Балансний антенний перемикач на p-i-n-діодах

При плавній зміні керуючого струму p-i-n-діодів здійснюється плавне регулювання вхідної потужності, тобто пристрій працює як аналоговий невідбивний атенюатор.

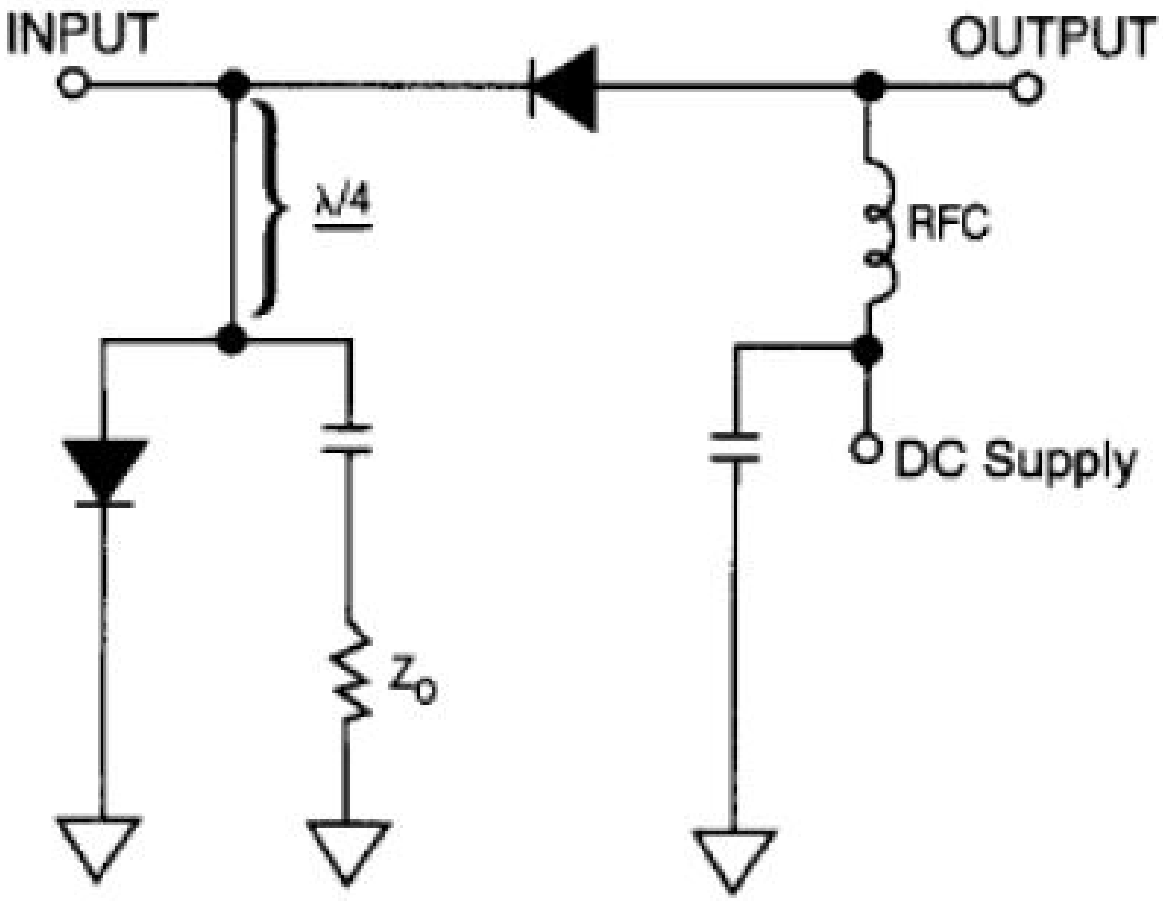
Змінне затухання створюється частково за рахунок часткового поглинання потужності активними опорами p-i-n-діодів, частково – у баластному навантаженні.

Чвертьхвилеві атенюатори



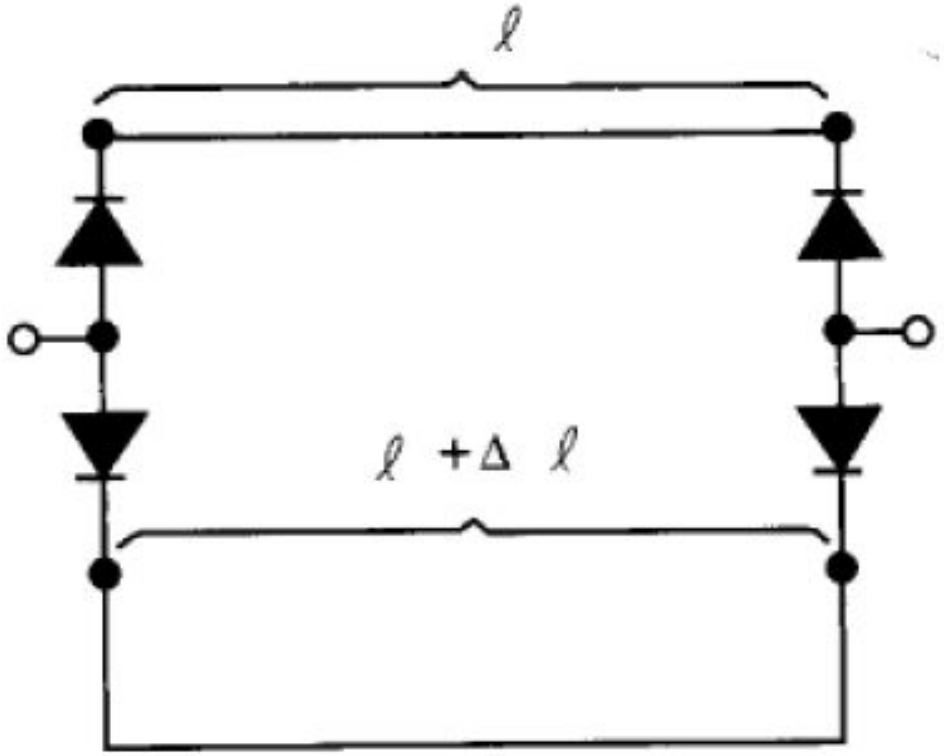
З послідовним вмиканням p-i-n-діодів

Атенюатори на квадратурних мостах



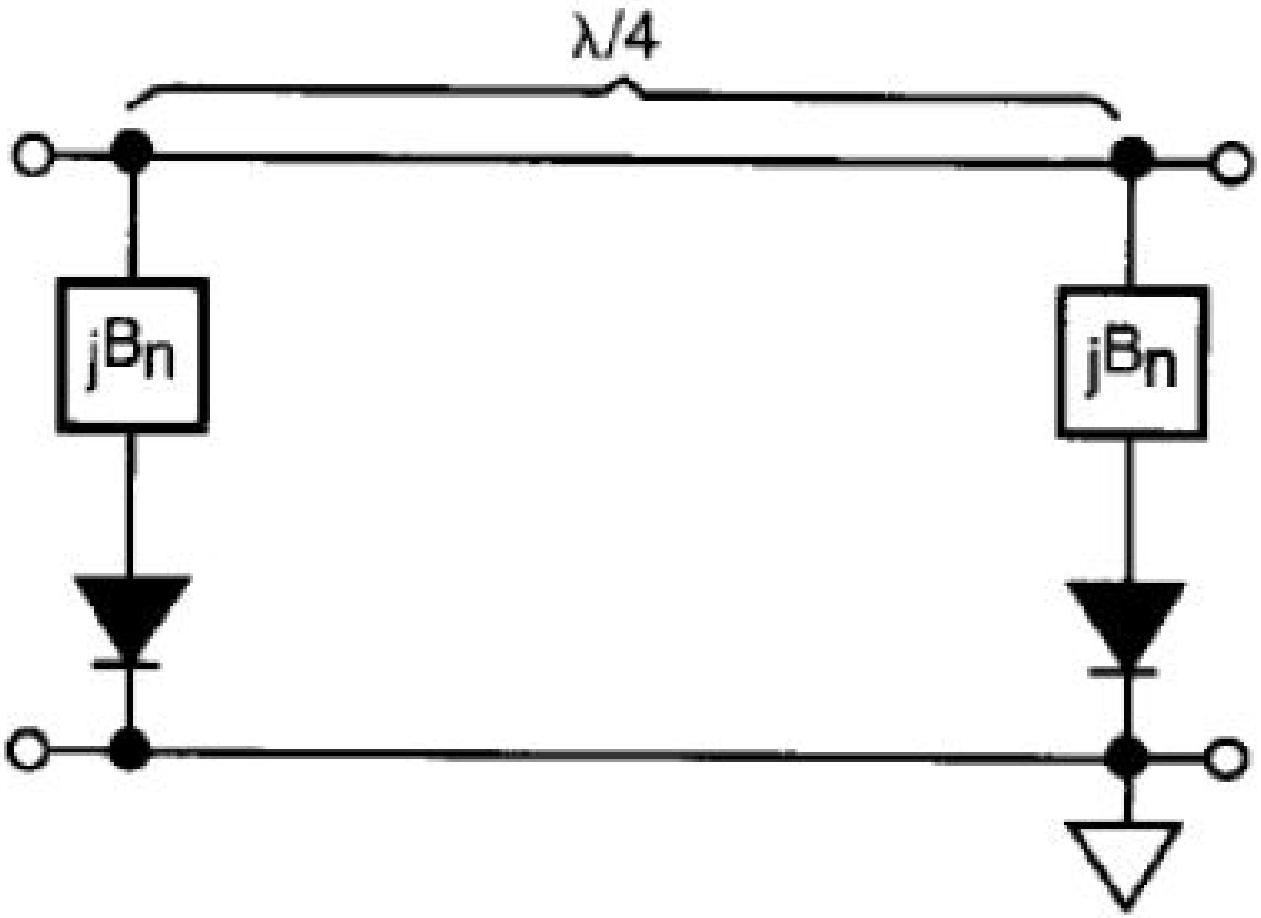
З паралельним вмиканням p-i-n-діодів

Прохідний фазообертач на **p-i-n-діодах**



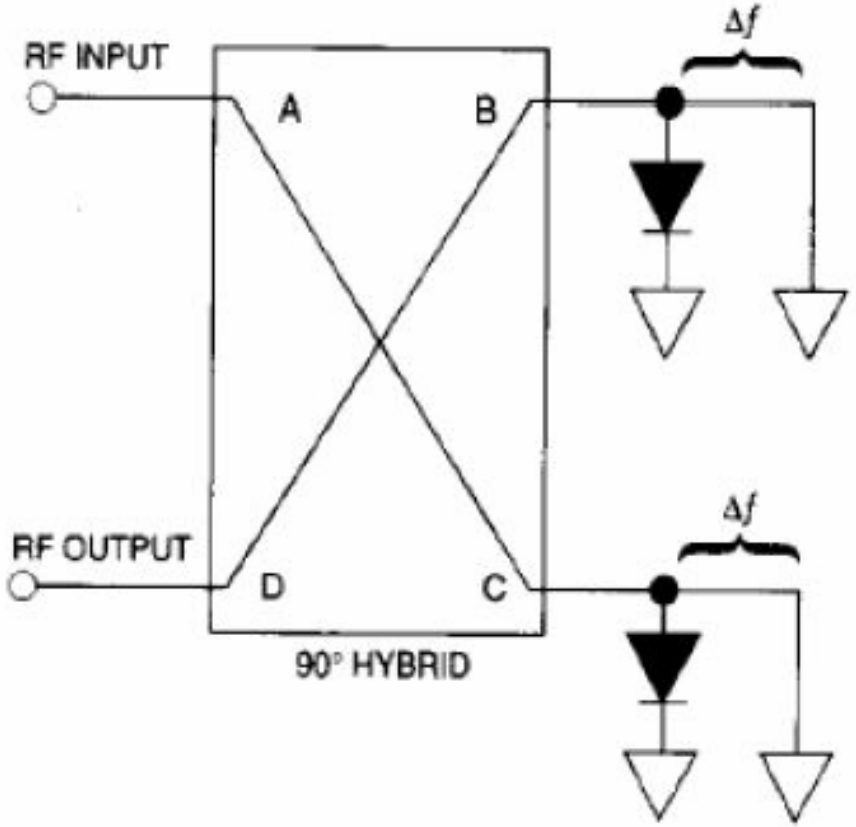
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta l, \text{ рад.}$$

Прохідний фазообертач на p-i-n-діодах

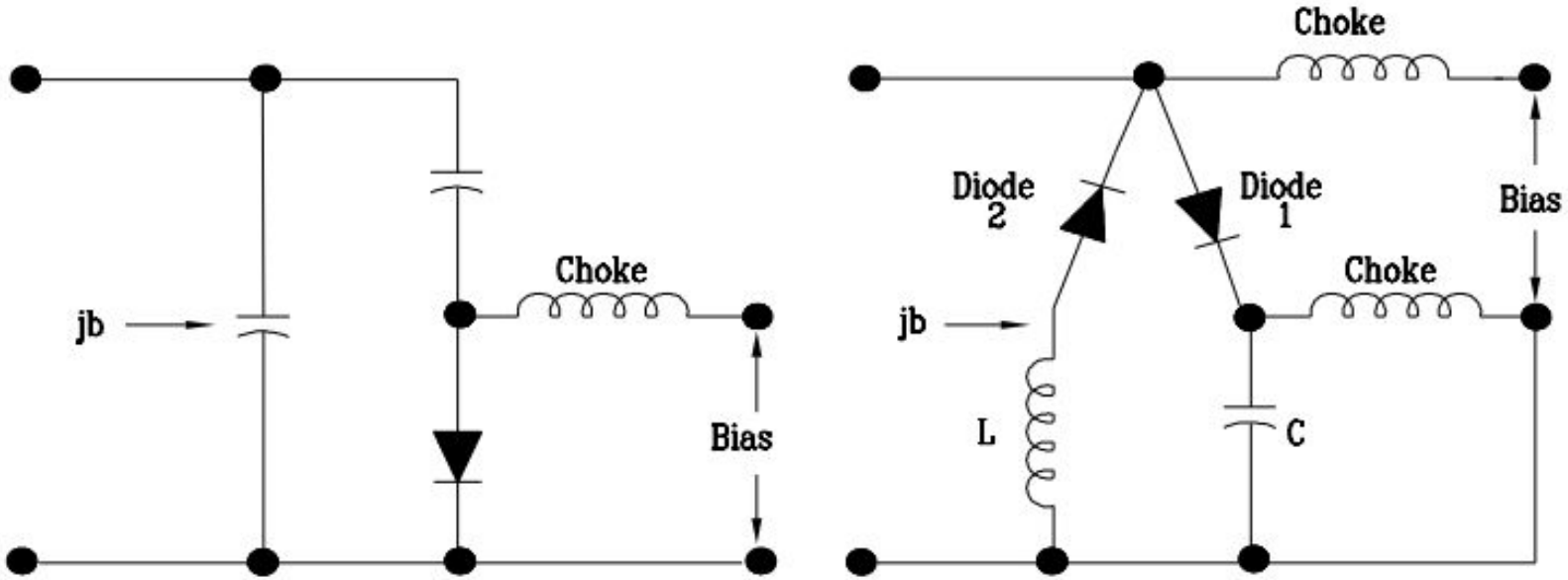


Прохідний фазообертач з реактивностями

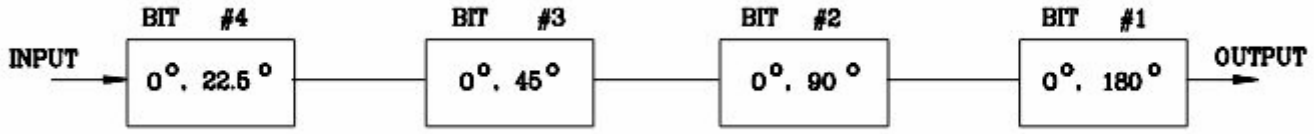
Відбивний фазообертач на **p-i-n-діодах**



Відбивний фазообертач на **p-i-n-діодах**

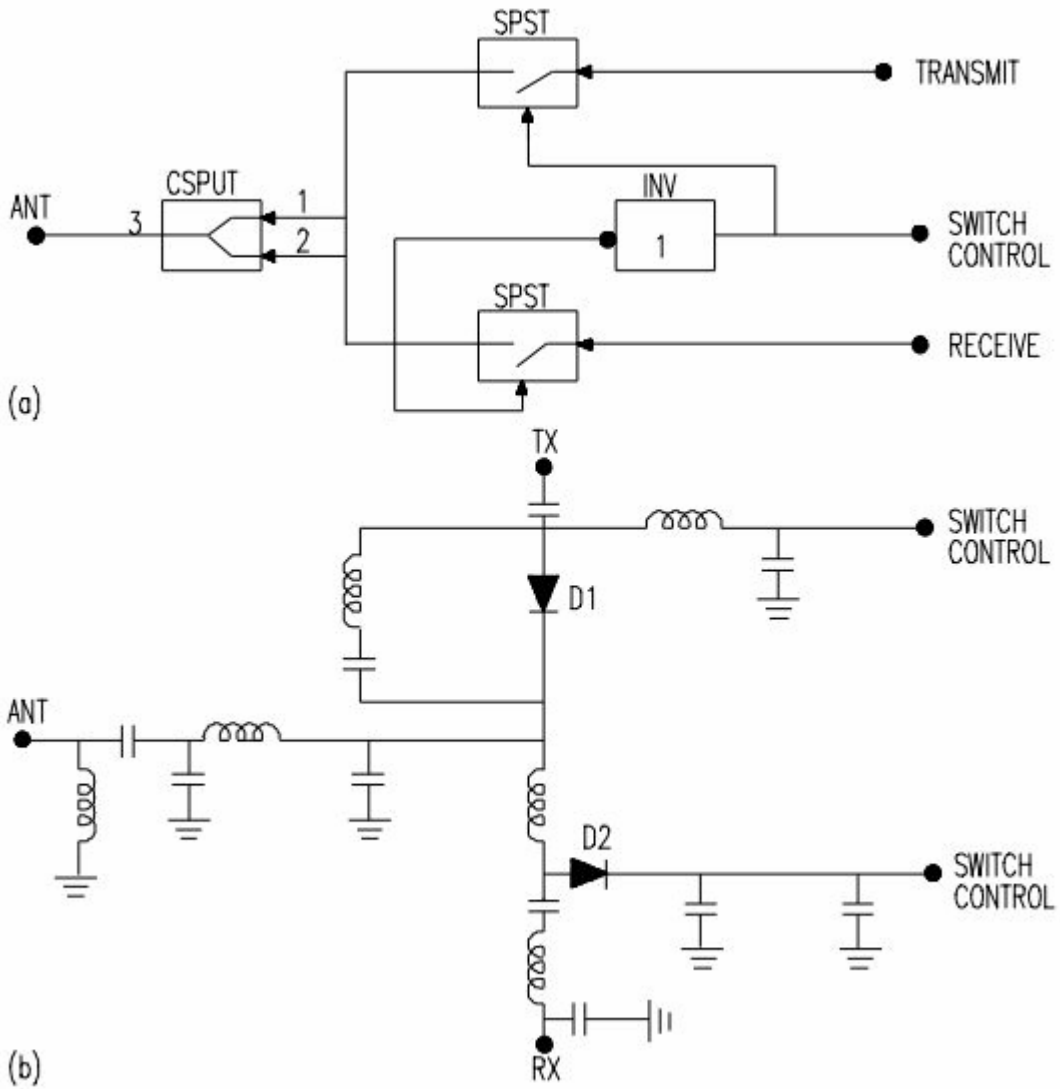


Прохідний фазообертач на p-i-n-діодах



Принцип побудови 4-и бітного фазообертача на 16 значень фази (дискрет фази 22,5 градуси)

Антенний перемикач на p-i-n-діодах



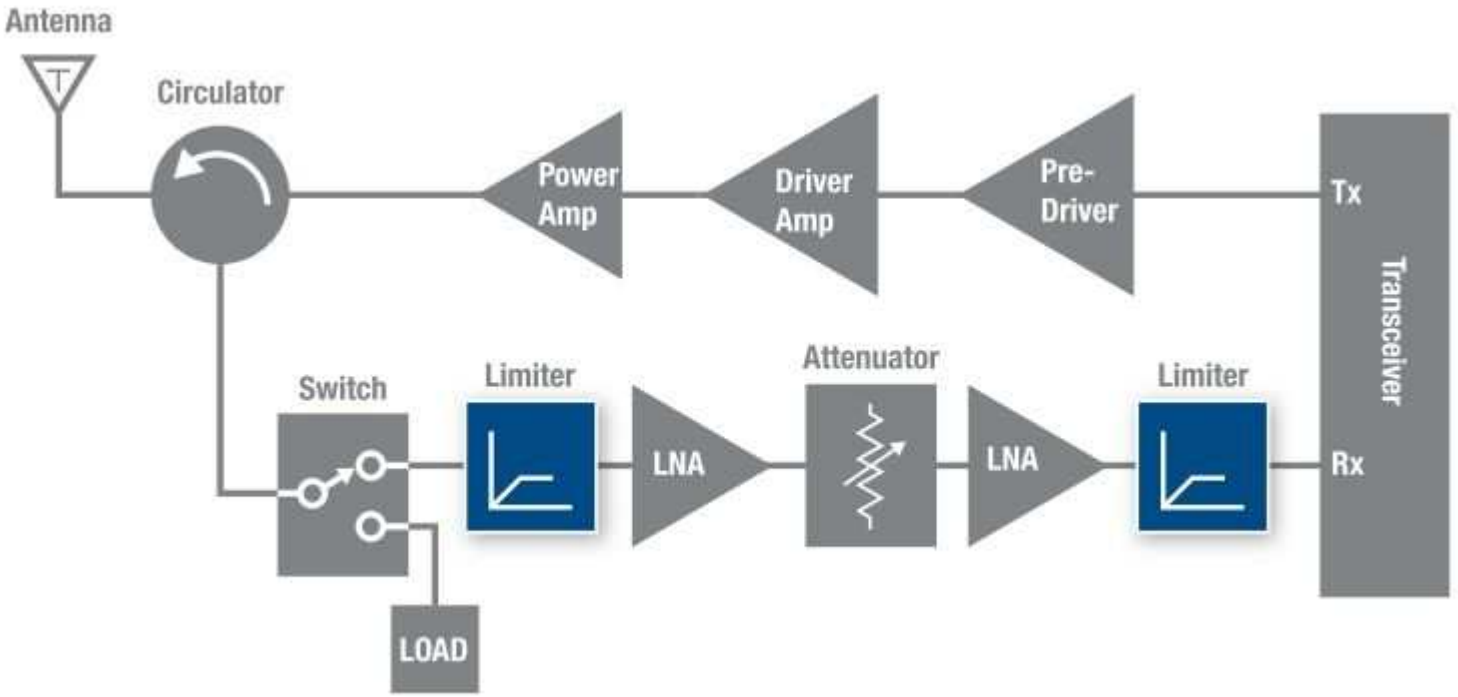
Структурна схема (а); принципова схема (б)

Обмежувачі потужності

Обмежувачі потужності

Обмежувач потужності (limiter) – пристрій, задачею якого є зменшення до безпечного (для вхідних кіл або змішувача) рівня потужних імпульсних сигналів на вході приймача у всіх умовах експлуатації РТС, ТКС.

Джерелами таких сигналів є власний передавач, сусідні РТС, ТКС.



Загальні вимоги до обмежувача потужності: забезпечення захисту приймача без використання будь-яких керуючих напруг (в ідеалі), сформованих поза обмежувачем.

Обмежувачі потужності

Основнимм параметрамм обмежувачів потужності є:

1) **втрати пропускання** – послаблення прийнятого сигналу обмежувачем потужності у вимкненому стані;

2) **КСХ у режимі прийому**;

3) **діапазон робочих частот (смуга пропускання)**;

4) **втрати замикання** – послаблення прийнятого сигналу обмежувачем потужності у ввімкненому стані;

5) **час відновлення** – тривалість переходу з ввімкненого стану у вимкнений стан.

Типи обмежувачів потужності:

1) з детекторною секцією;

2) з використанням обмежувальних p-i-n-діодів (p-i-n limiter diodes).

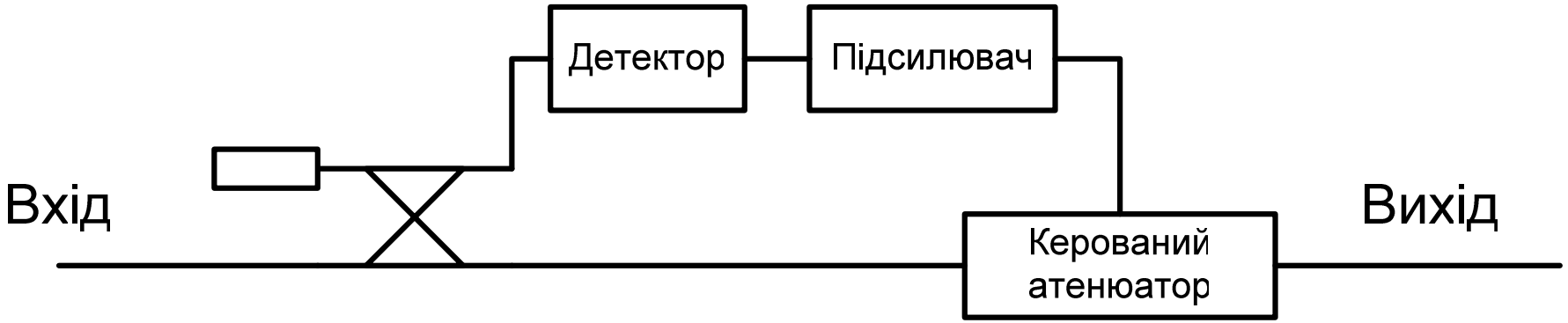


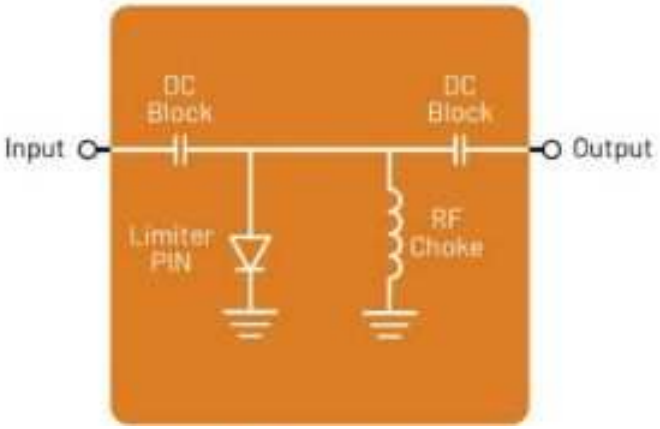
Схема ограничителя мощности с детектором

Підсилений сигнал, який знімають з детектора, подають в якості керуючого впливу на керований атенюатор. Якщо потужність більша за порогову, то суттєво збільшується внесене атенюатором затухання. У результаті потужність на виході пристрою залишається постійною. Нерівномірність його АЧХ зазвичай не перевищує 1 дБ/окт і залежить в основному від широкосмуговості відгалужувача та детектора.

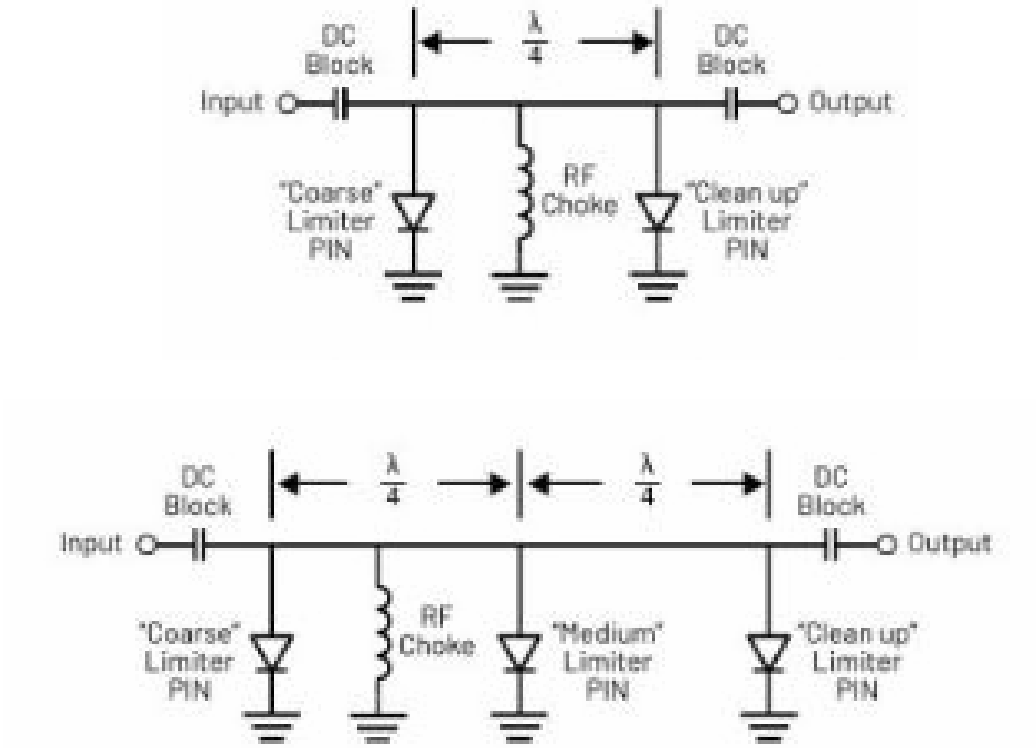
Обмежувачі потужності

Обмежувач потужності другого типу **використовує інжекцію заряду в *i*-шар *p-i-n*-діода при збільшенні на ньому напруги НВЧ.** Це спричиняє зменшення опору діода, який шунтує лінію передачі і частина падаючої потужності відбивається від діода до входу. При малих потужностях сигналу діод має великий опір і потужність на виході обмежувача збільшується пропорційно до вхідної потужності. Після перевищення деякого порогового рівня внесене обмежувачем затухання збільшується по мірі збільшення вхідної потужності. Таким чином, у діапазоні змін вхідної потужності на 20...30 дБ потужність на виході залишається практично постійною (нерівномірність близько 0,5 дБ). При подальшому збільшенні потужності вхідного сигналу починають даватись взнаки паразитні реактивності діода та потужність на виході обмежувача збільшується.

Основні схеми таких обмежувачів – балансна (слайд 28) та східчаста, фрагмент якої показано на рисунку.



Обмежувачі потужності



Східчасті схеми обмежувачів потужності на p-i-n-діодах

Використання такого каскадного паралельного вмикання декількох обмежувальних діодів дозволяє розширити динамічний діапазон стабілізації виходної потужності.

Порогова напруга обмежувача залежить від геометричних параметрів p-i-n-структури, характеристик складових його шарів, напруги зміщення діода.

Обмежувачі потужності

Приклад характеристик обмежувальних p-i-n-діодів

P_{1dB} Threshold Level (dBm)	I-Layer Thickness (μm)	Insertion Loss @ -10 dBm and 1 GHz (dB)	Max. Series Resistance @ 10 mA and 1 GHz (W)	Max. Junction Capacitance @ 0V (pF)	Max. CW Input Power (dBm)	Multi-stage Limiter Application
+12	1.0	0.1	2.5	0.12	+36	Clean-up
+12	1.0	0.1	2.0	0.20	+36	Clean-up
+10	1.5	0.1	2.0	0.20	+3	Mid-range
+12	2.0	0.1	2.5	0.12	+40	Clean-up
+11	2.0	0.1	2.0	0.20	+40	Clean-up
+11	2.5	0.1	2.0	0.20	+41	Mid-range
+26	7.0	0.1	2.0	0.20	+43	Coarse
+23	7.0	0.2	1.2	0.60	+43	Coarse
+37	20	0.3	1.5	0.26	+44	Coarse
+22	4.5	0.1	2.2	0.13	+40	Mid-range
+25	12	0.3	1.2	0.20	+40	Mid-range