**1. Хвильове рівняння, випадок поперечно-обмеженої системи.**

Рівняння Максвела 2-ого порядку описують всі електромагнітні явища

(1)де - густина струму, - напруженість ЕП, - напруженість МП, - індукція МП, - індукція ЕП, - густина заряду



Хвильове рівняння:

; де  (2)

Із двох перших рівнянь Максвела (1) можна вивести хвильове рівняння із врахуванням часової компоненти. Візьмемо ротор від обох частин першого рівняння (1), а потім підставимо в нього значення для  із другого рівняння (1):

(3)

 (4)

(5)

(6) - хвильове рівняння для просторової і часової компоненти

Порівняємо це із хвильовим рівнянням лише для просторової компоненти (2):

 (7)

 Підставимо 



 (другу частину питання не на 100%, але мабуть мається на увазі що розглядаються хвилі вздовж однієї осі, або те, що в поперечно-обмеженій системі виникають стоячі хвилі вздовж цього напрямку)

У плоскої хвилі на хвильовому фронті амплітуда і фаза однакова. Нехай хвиля розповсюджується в напрямку , то .Отримаємо  (з ). Розв’язок отриманого рівняння осцилятора: .

Перейдемо до справжньої компоненти поля:  де - рівняння хвильового фронту (фаза ). Цей фронт розповсюджується зліва направо. Якби ми взяли замість компоненту , то одержали б - фронт, що рухається справа наліво. Стояча хвиля – це суперпозиція цих двох компонент.

Розглянемо .

.

; , тобто маємо дійсно праву трійку . Оскільки , то .

Таким чином у плоскій хвилі  і залежні величини: якщо одне з них задане, то друге визначається лише серидовищем (див. \*). Це в СГСЕ, в інших системах по іншому. Наприклад, в СІ у вакуумі 377 (Ом) – опір вільного простору (хвильовий опір простору).

**2. Прямокутний металевий хвилевід. Структура мод.**













*Прямокутний хвилевід* – це металева труба прямокутного поперечного перерізу,

заповнена, як правило, лінійним однорідним ізотропним діелектриком, наприклад,

сухим повітрям. В середині металевого проводу не може бути електростатичних полів. Можуть бути лише Е, Н-хвилі. Наприклад, рівняння для H-хвилі: . Граничні умови: Нехай ; тоді ; ; ; ; .

 таким чином . .

Тут ; звідси . Аналогічно . 

 за симетрією .

отже .

.

Розв’язок: ; де , можна також знайти , але .

Ця задача в частинних похідних має безліч розв’язків . Загальна хвиля буде . Розглянемо один з розв’язків: -це хвиля .

Отримаємо .

Інші компоненти: , тут . Інші компоненти, это Мелков на лекции выводил зависимости их всех от .Это типа из таблицы берут.

У хвилеводі будуть розповсюджуватися хвилі з .













Визначимо фізичний зміст індексів: розглянемо .  - по  одна півхвиля. Таким чином, перший індекс  означає скільки варіацій має поле в напрямку . Другий індекс - вздовж .

Розглянемо типову картину полів у хвильоводі для :







Оскільки хвиля рухається з певною швидкістю, зсунуте в часі на  (в формулі це ), тому маємо картину не а) а б).

Е

Н

а

б

Для хвилі :

Для хвилі  завдяки граничним умовам на стінках , а по певній координаті (там, де індекс = 0 ) це поле однорідне, тоді буде всюди, тобто цієї хвилі не буде.

**3. Коаксіальна лінія**

Тут можуть розповсюджуватись хвилі Т (бо тут можна утворити конденсатор), ТЕ, ТМ. , , .

.

Розглянемо хвилю Т. Нам необхідно розв’язати рівняння . Зробимо це методом конформних відображень. Його можна застосувати для аналітичних функцій (тих, що задовольняють рівнянню Лапласа), яким і є поле Т-хвиль.

Для того, щоб скористатись методом КВ, необхідно:

1. Знайти відображення, яке переводить нашу область, де існує ЕМ – поле, у плоский конденсатор;
2. Розв’язати рівняння Лапласа у плоскому конденсаторі;
3. Зворотнім конформним перетворенням знов перейти в нашу область – це і буде розв’язок задачі:



















*Метод конформних відображень* можна застосувати для Т – хвилі, бо вона є розв’язком рівняння Лапласа: , . Доведемо, що відображення  перетворює циліндричний конденсатор в плоский: , , тобто , . Таким чином, якщо . , .

Таким чином, можна перетворити межу циліндричної області в межу плоскої. Тому й область перетворюється в область . Розв’язок задачі в плоскому конденсаторі:має вигляд: . Поклавши  (скориставшись тим, що потенціал визначається з точністю до константи), маємо: . Скориставшись зворотнім перетворенням, одержимо: .





Знайдемо поле: , . Хвильовий опір: . Проте такий опір не вимірюється. Більш практичне означення хвильового опору:  - відношення напруг лінії до струмів у цій лінії. Знайдемо  для Т – лінії, використавши інтегральні рівняння Максвела: , тут - заряд, - ємність на одиницю довжини. З урахуванням  можна записати: . . Окрім Т – хвилі, в коаксіальному кабелі може існувати ще й ТЕ чи ТМ хвиля: .



### Т - хвиля

Картина хвиль:

. Наприклад, для R1=1мм, R2=6мм: .

**4. Відкриті металеві хвилеводи.**

## Лінії передач для інтегральних схем.

В інтегральній електроніці використовуються в основному плоскі лінії.

1. Симетрично – смушкова лінія (ССЛ): вона відкрита, тому має втрати.
2. Не симетрично – смушкова лінія (НСЛ):
3. Мікросмушкова лінія (microstrip line) – МСЛ. Тут ємність дуже велика, енергія сконцентрована. Підкладка з діелектрика . Лінія двоповерхова – це не дуже зручно.

4. Щілинна лінія (slot line). Вона є одноповерховою:

5. Компланарний хвильовід – все в одній площині.

Для характеристики якості лінії використовують добротність лінії: , де  (по аналогії з добротністю КК: ). Для: - хвильоводів - ;- коаксіальних кабелів - ; Мікросмушкових ліній - .

## Симетричний смушковий хвилевід.

Скористаємося тими самими наближеннями:





1. Т – хвиля;  рівняння Лапласа  конформні відображення.
2. Розглянемо половину (симетрія).

Застосуємо перетворення Кристофеля-Шварца. Далі – аналогічно попереднім задачам. Розв’язавши, одержимо картинку полів:

Її параметри: . Тут  менше, аніж у попередній лінії, оскільки ємність тут більша. Однак, тут  менше не в 2 рази, оскільки у попередньому хвильоводі ємність враховувалась і до верхньої сторони верхньої смужки, і до нижньої (див. Мал.), тому там ємність більша, аніж у звичайному конденсаторі.

Довжина хвилі для симетрично смушкової лінії , якщо всі три смушки знаходяться в середовищі .

## Відкриті лінії.



Тут смужка на шарі діелектрику. Тоді:

1. Зверху - .

-Знизу - .

Тому використовують деяке ефективне : , треба знайти частину енергії, яка йде по діелектрику. Нехай ця частина  в . Тоді: . Часто використовують таку наближену формулу: .

**6.Діелектричні хвилеводи і резонатори. Добротність**

**Діелектричний хвилевід** – хвилевід, який складається з діелектричного стрижня.

Розповсюдження хвиль по діел. хвилеводу обумовлено повним внутрішнім відбиттям при «наклонном» падінні хвилі на поверхню розділу двох діелектриків зі сторони середовища, що має більш високу діел.проникність. Хвилі, що розповсюджуються по хвилеводу, в загальному випадку є гібридними, тобто мають шість компонент електричного та магнітного поля.

Серед…(*продолжение- страница из книжки)*

**Резона́тор**и.

В генераторах СВЧ[1]-излучений (клистрон, магнетрон) резонаторы представляют собой металлическую конструкцию, используемую для генерации волн определённой длины.

**Добротність**

Добротність – це кількість періодів коливань , за які амплітуда сигналу згасає в е разів

Добротність – відношення енергії, що запасається в резонаторі за один період коливань, до енергії, що втрачається, за той же самий проміжок часу.

Енергія втрачається за рахунок випромінювання, в зовнішній простір, в металеві стінки.

Для будь-якого резонатора звичайно існує АЧХ, яка має ширину:

Чим більший коефіцієнт затухання, тим більше крива розпливається.









Напівширина  вимірюється для  на 0.5; а для вихідної амплітуди – на 0.7 висоти контуру. . Хвиля затухає із декрементом : , . Доведемо, що . Це випливає з розв’язку рівняння: . Втрати  - тут добротність . Дану формулу можна застосовувати, коли втрати не дуже великі.

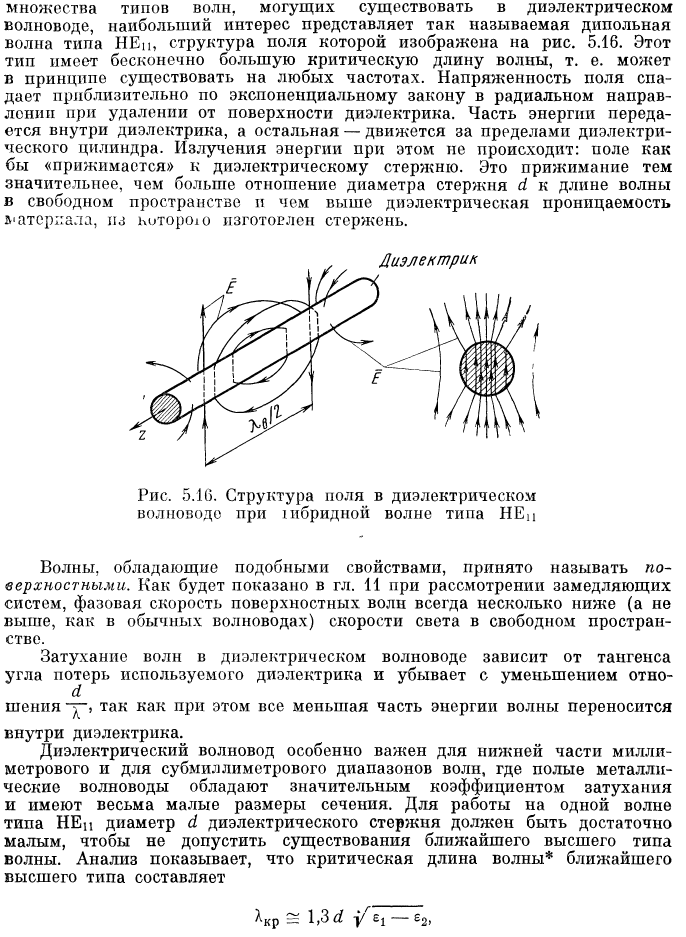
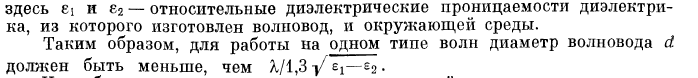
Якщо великі втрати, вводять комплексну частоту: **ω= ω´+ іω΄΄ ,** 

Це можна зробити тоді, коли ω´ не залежить від **ω΄΄.**

, де δ-визначає добротність нескінченного діелектрика, в якому поширюється монохроматична хвиля. 

В круглому резонаторі:

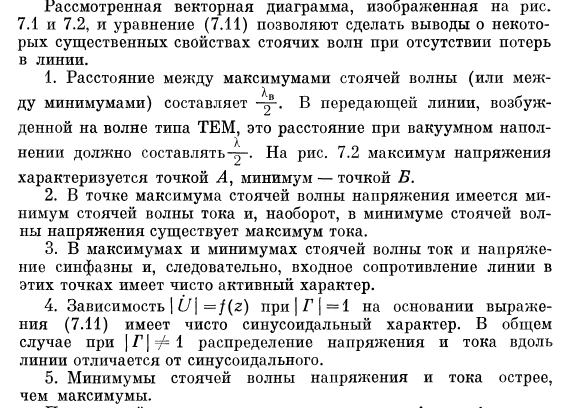
Існує дуже багато типів резонаторів. Наприклад, резонатор хвилі, що біжить, такий резонатор ще називають кільцевим. Резонанс: .

Коливання в об’ємному резонаторі можна збудити, наприклад, за допомогою вібратора (штиря, зонду) або електронного потоку; ці джерела коливань можна представити як сторонні електричні струми; якщо вібратор рахувати ідеально провідним , то сторонній струм в ньому буде поверхневим. Петлю зв’язку, що збуджує об’ємний резонатор, можна змінити стороннім магнітним струмом. Об’ємний резонатор можна збудити через отвір або щілину в його стінці; отвір потрібний, щоб ввести в резонатор вібратор або електронний потік або щоб зв’язати резонатор з лінією передачі. Щілина або отвір в стінці резонатора, що ідеально проводить можна трактувати як сторонній поверхневий магнітний струм на суцільній (нерозрізаній) стінці резонатора: такий розгляд зручний, якщо тангенціальне електричне поле на щілині або отворі відоме.

У вимірювальній практиці часто застосовують систему, в якій електромагнітна енергія підводиться в об’ємний резонатор через хвилевід. Зв’язок між резонатором і хвилеводом здійснюється одним із способів типу зонд, петля,отвір, щілина. Найбільш зручний зв’язок, який можна безперервно варіювати, наприклад, всуваючи зонд або петлю в резонатор.

Добротність зв’язку – втрати передачі зовнішньої системи від генератора до нашої системи.

Навантажена добротність:   
7. **Стоячі хвилі, їх основні властивості.**



Стояча хвиля – це суперпозиція двох біжучих хвиль, що поширюються у протилежних напрямках (прямої і відбитої хвилі):

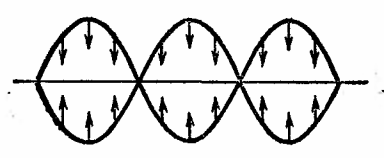
 - зліва направо

 - справа наліво

Суперпозиція цих двох хвиль:

Кожна точка у часі здійснює коливання, амплітуда яких змінюється за законом: 

В певних точках (вузлах) ця амплітуда перетворюється на 0.



Відстань між вузлами  визначається із умови:  звідки .Всі точки, що знаходяться між двома сусідніми вузлами коливаються синфазно. При переході через вузол, фаза коливань змінюється на π.

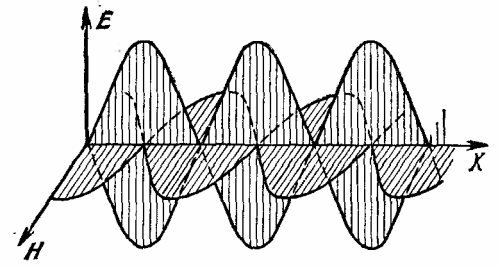
В стоячій хвилі нема розповсюдження енергії, отже хвиля не розповсюджується (стояча хвиля).

У вузлах похідна  максимальна, у пучностях – навпаки =0

Якщо стояча хвиля існує у просторі (вона необмежена), то її довжина може бути довільною.

Якщо хвиля утворюється у замкненому просторі, між двома стінками, то довжина хвилі має бути такою, щоб на відстані між цими двома стінками вкладалось ціле число півхвиль:

, звідки , . Тобто для даного резонатора маємо нескінченну кількість коливань (мод) із різними n. n=0 – основне коливання (мода). Всі інші хвилі – це гармоніки або обертони.



Вищезазначені речі відносяться до стоячих хвиль довільної природи. Перейдемо до стоячих НВЧ хвиль.Нехай маємо взаємоперпендикулярні вектори *Е* та *Н.* Хвиля, що розповсюджується у додатньому напрямку осі *ох*: 



Вектори (*E H k*) утворюють праву трійку

Хвиля, що розповсюджується у від’ємному напрямку осі *ох*:

Суперпозиція двох хвиль:

Коливання електричної і магнітної компоненти зсунуті один відносно одного на .

Вузли магнітного поля співпадають із пучностями електричного і навпаки**.**

**А это из лекцій мелкова**

## Стоячі хвилі в лініях передачі.

Хвиля у прямому напрямку з напругою : . Струм . Відбита хвиля: ; , (мінус – бо струм у зворотному напрямку).  де  - коефіцієнт відбиття,  при . Введемо коефіцієнт стоячої хвилі. до хвилі, що біжить, відбита хвиля додається чи віднімається: , ,  - коефіцієнт стоячої хвилі.

**8. Детектування електромагнітної хвилі.** НП – детектори не можуть використовуватись для вимірювання, бо з часом вони самі змінюються, тобто не існує однакових НП – детекторів. Найбільш точні методи – калориметричні, але вони розраховані на великі потужності (>1Вт). Використовують термістори і болометри:















НВЧ



НП-бусинка. Це все поміщують у термостат. Але це знову ж дає мало переваг у порівнянні з НП-детекторами.



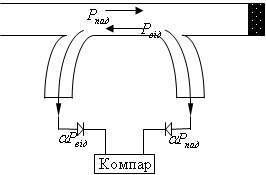
Тоді можна записати:

, звідки маємо .

Перевага бусинки - в електроніці. Намалюємо вимірювальний міст:  - з’являється тому, що НВЧ нагріває по поверхні, а батарейка - по об’єму.

Спочатку міст балансується опором  тобто гальванометр нічого не показує.

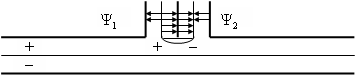
Подаємо НВЧ, тобто болометр перегрівається, баланс порушується. Для встановлення балансу опір  збільшуємо так, щоб загальна потужність: . Для точності використовують . Інколи потрібно зменшити падаючу потужність. Для цього використовують атенюатори (поглинаюча пластина, що вставляється в хвилевід). Вони можуть зменшувати потужність на 30-40 дБ. Існують прецизійні атенюатори, точність 0,01 дБ: , а потужність, що поглинається, . А залежність кута можна визначити точно. Існують направлені відгалужувачі: 



Лівий відгалужувач реагує лише на відбиту хвилю, правий – на падаючу. Компаратор автоматично рахує Г.

Існують розподілені розгалджувачі – (для верхньої смуги пропускання) – тут випромінює щілина.

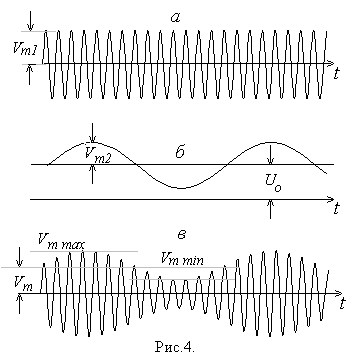
Виявляється, що зв’язок цього хвильоводу з трубами існує по ЕМП, і фаза зв’язків по ЕП та МП – різна. Розглянуто зв’язок по ЕП, тепер по МП:



- тобто хвиля піде лише у ліву трубу: від діелектричного зв’язку все “+”, від магнітного “+” та “-“, тобто в правій трубці . Хвиля піде у ліву трубу.

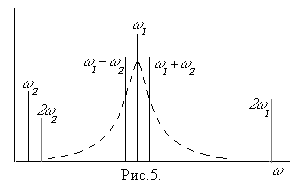
**9. Модуляція та змішування НВЧ сигналів.**

**Модуляцією** називають зміну одного з параметрів гармонічного високочастотного сигналу (амплітуди, фази, або частоти) у відповідності з законом зміни деякого другого низькочастотного сигналу. Так, наприклад, під **амплітудною модуляцією** (АМ) розуміють зміну амплітуди високочастотного сигналу  (рис.4а) у відповідності ззаконом зміни деякого низькочастотного сигналу. У даному випадку за такий взято гармонічний сигнал , у якого  (рис.4б). В результаті одержується високочастотний сигнал з амплітудою, що змінюється у часі і описується виразом (8) (рис.4в): (8)



Величина  має назву глибини модуляції і дорівнює

де  та  - найбільше і найменше значення амплітуди модульованих коливань. Величина  має бути пропорційною до амплітуди низькочастотного сигналу . Амплітудну модуляцію можна одержати за допомогою нелінійного елемента, якщо зберегти не тільки частоту , але і близькі до неї комбінаційні частоти.Для цього потрібно тільки настроїти контур на частоту. Смуга пропускання контуру має бути досить широкою щоб у ній вклалися комбінаційні частоти  і разом з тим досить вузькою, щоб до неї не потрапили ані низькочастотний сигнал, ані другі гармоніки віді(рис.5)



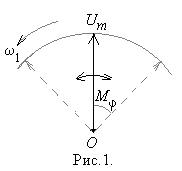
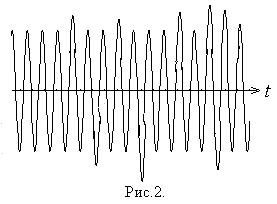
***Фазова модуляція:*** крім амплітуди гармонічний сигнал може бути охарактеризований ще двома параметрами: фазою і частотою, які також можна варіювати “в такт” з низькочастотним інформаційним сигналом, тобто створювати фазову або частотну модуляцію несучого високочастотного сигналу.

При фазовій модуляції (ФМ) миттєве значення величини високочастотного сигналу має вигляд:  (1), де фаза сигналу  пропорційна миттєвому значенню інформаційного низькочастотного сигналу :  (2)

де - константу пропорційності.

Якщо модулюючий сигнал є гармонічним  де  , то  (3), де - є так званий індекс фазової модуляції. Він повинний бути пропорційним амплітуді модулюючого низькочастотного сигналу. Фазово-модульований сигнал можна зобразити на

векторній діаграмі (рис.1) у вигляді вектора  незмінної величини, який коливається навколо свого середнього положення, відхиляючись від нього на кут  пропорційний до  Певною перевагою ФМ є дещо краща завадозахищеність порівняно з амплітудною модуляцією. Дійсно, імпульсні завади, які виникають від грозових розрядів або роботи індустріальних пристроїв, накладаючись на високочастотний сигнал, створюють короткочасні викиди, які після детектування стають причиною трісків у звуковому сигналі (рис.2).



При фазовій модуляції можна за допомогою амплітудного обмежувача позбутися цих викидів і зберегти незмінний за амплітудою високочастотний сигнал. Усування завад при цьому звичайно не буває повним, бо завада може дещо змістити фронт коливань ліворуч чи праворуч, імітуючи тим фазову модуляцію. Проте, рівень завад все ж таки дещо зменшується.

***Частотна модуляція*** При частотній модуляції (ЧМ) у такт з низькочастотним сигналом змінюється частота високочастотного сигналу  де . Цей процес схематично зображений на рис. 4. В моменти, коли миттєве значення  велике, велика і частота високочастотного сигналу. Навпаки, у моменти, коли  зменшується, зменшується і частота ВЧ сигналу. При гармонічному низькочастотному сигналі  миттєве значення частоти дорівнює

 (5) де  - девіація частоти. Вона пропорційна амплітуді модулюючого низькочастотного сигналу 

Фазова і частотна модуляції тісно пов’язані між собою. Дійсно. високочастотний сигнал можна представити у такому загальному вигляді:

 (6) де  - миттєві фаза високочастотного сигналу.

У відсутності частотної модуляції миттєва фаза  зростає пропорційно до часу ; за наявності ЧМ вираз (6) може бути записаний у вигляді (8)

Доведений вище взаємозв’язок між ФМ та ЧМ дає можливість використовувати ЧМ-апаратуру для отримання фазової модуляції і навпаки - ФМ-апаратуру для реалізації частотної модуляції. Так, наприклад, для одержання ЧМ можна скористатися фазовим модулятором (рис.5а). тільки модулюючий низькочастотний сигнал слід спочатку пропустити через інтегруючу комірку. Можна здійснити і зворотну операцію: за допомогою частотного модулятора отримати фазову модуляцію (рис.5б). Потрібно лише спочатку продиференціювати модулюючий сигнал пропустивши його через диференціючу комірку .**Лінійний детектор, змішувач.**; . ***Якщо розписати квадратний член, то одержимо:***



 - постійний струм, тобто .

Принципова схема супергетеродинного приймача НВЧ – діапазону. Відгук пропорційний квадрату сигналу.

Розглянемо характеристики приймача:

1.Втрати перетворення: , бо існують втрати на дзеркальні канали, тощо. У діапазоні 40ГГц типове значення .

2.Шум-фактор (класичне визначення): .

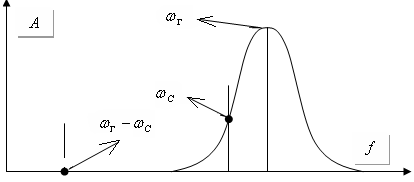
Шум завжди підсилюється більше ніж сигнал, тому  показує, у скільки разів шум підсилюється більше, ніж сигнал. , бо немає схем в яких .  де - шум, згенерований всередині.

Мінімальну потужність, яку приймає приймач  - шум-фактор. Він показує, у скільки разів еквівалентні



шуми більше, ніж зовнішні шуми.

Визначимо  для змішувача: , - бо це пасивний прилад.

Для наступної схеми можна записати: звідки  - врахуємо шуми подальших каскадів. В середньому .

Вт. , бо впевнений прийом при Р в 2 рази менший, ніж максимальній.

## Балансний змішувач.

Якщо уявити, що у генератора є деякий контур, то при перекритті  та  може виникнути биття генератора з самим собою навіть при відсутності сигналу. Балансний змішувач бореться саме з цим – він знищує гармоніки гетеродина.

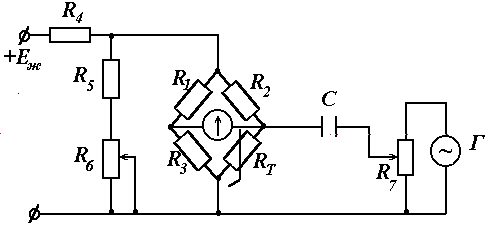
**10.Вимірювання потужності НВЧ хвилі**

***Вимірювання потужності НВЧ за допомогою термісторів.***

Термістором називають терморезистор із спеціального напівпровідникового матеріалу з великим від`ємним температурним коефіцієнтом опору. Застосовують два типи термісторів: стержневий та бусинковий. Термістори стержневого типу мають більш високу електричну міцність і відносно менший реактивний опір. Бусинковий термістор при інших рівних умовах, має меншу поверхню охолодження і тому має більшу чутливість. Основними перевагами термісторів є висока чутливість і велика стійкість до перевантажень. Хвилеводна термісторна камера вміщує термісторну вставку та хвилеводний перехід, який забезпечує узгодження опору термісторної вставки з хвилевим опором нормалізованого прямокутного хвилеводу, до якого підключають вимірювач потужності. Суттєвим недоліком термісторних ватметрів є обмеження максимальної величини вимірювальної потужності. Практично стандартні термістори спроможні без руйнування витримувати потужність, що не перевищує декількох десятків міліват. Верхню границю вимірювальної потужності можна збільшити, якщо перед термісторною камерою розмістити калібрований атенюатор. У цьому випадку результат вимірювання визначається відліком по шкалі приладу, помноженим на величину затухання, що вноситься атенюатором. У вимірювачах малої потужності НВЧ застосовують атенюатори поглинаючого та граничного типів.

Важливою частиною вимірювача потужності НВЧ є мостова схема. Приріст опору термісторів можна виміряти за допомогою схем простих омметрів, але таке вимірювання не буде точним. Більш високу точність дають мостові вимірювальні схеми. Застосовуються два способи вимірювання опору термістору - за допомогою неврівноваженого та врівноваженого мостів.

Високу точність вимірювання забезпечує врівноважений міст, за допомогою якого досягається порівняння вимірювальної потужності НВЧ з каліброваною потужністю постійного струму. На рис.6 дана схема врівноваженого моста з безпосереднім відліком результату вимірювання. Живлення моста постійним струмом здійснюється за допомогою резистору *R*4. Паралельно мостовій схемі включений шунтуючий ланцюг, що створений резистором *R*5 та реостатом *R*6, на движку якого закріплена відлікова шкала потужності. Струм живлення моста *Iп*, отже і потужність, що розсіюється на термістор і є функцією положення движка реостата *R*6. Максимум струму є в приведеному реостаті. Цьому положенню движка відповідає нульовий відлік по шкалі потужності ( *P*НВЧ =0).



*Рис.6 Схема зрівноваженого моста*.

Процес вимірювання потужності за допомогою врівноваженого моста складається з двох етапів. Перший - вихідне балансування моста, що здійснюється при відсутності потужності НВЧ та при повністю введеному реостаті *R6* (PНВЧ =0). Міст врівноважують за допомогою потенціометру *R7*, змінюючи змінну напругу, що підводиться до термістора. Початкове врівноваження моста виключає із результату вимірювання помилки, що обумовлені коливаннями температури навколишнього середовища та старінням термістора.

На другому етапі здійснюють безпосереднє вимірювання потужності НВЧ, при цьому початковий режим рівноваги моста підтримується незмінним і після надходження вимірювальної потужності НВЧ. Це досягається зменшенням потужності постійного струму при Pпт  так, що сума розсіюваних потужностей завжди лишається незмінною.*P*НВЧ + *P*пт = *P*0 (26),де *P*0- потужність, що розсіюється на термісторі при попередньому врівноваженні.

Із співвідношення (26) слідує, що для встановлення рівноваги моста потужність постійного струму повинна бути зменшена на величину, що дорівнює *P*пт = - *P*НВЧ (27)Останнє забезпечують пропорційним зменшенням опору *R*6, яке стає мірою величини вимірювальної потужності НВЧ. Результат вимірювання можна прочитати за шкалою, що пов`язана з движком реостата *R*6 та проградуйованою в одиницях потужності. Для збільшення точності відліку у якості *R*6 використовують спеціальний реостат, забезпечений спіральною шкалою.

***Из електронных лекций мелкова:***

НП – детектори не можуть використовуватись для вимірювання, бо з часом вони самі змінюються, тобто не існує однакових НП – детекторів. Найбільш точні методи – калориметричні, але вони розраховані на великі потужності (>1Вт). Використовують термістори і болометри:













НВЧ

• - НП-бусинка. Це все поміщують у термостат. Але це знову ж дає мало переваг у порівнянні з НП-детекторами.



,где ɳ - ККД,

з’являється тому, що НВЧ діє по поверхні, а постійний струм – на весь балориметр.

Намалюємо вимірювальний міст:

1)Баланс моста: Rб=R

2)Подаємо НВЧ

3)Підстроюємо струмом знову на баланс

Рдж+Рнвч=Рдж0

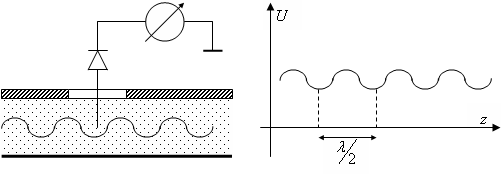
ΔРдж=Рнвч –вимірювання.Це є метод компенсації Джоулевого нагрівання.

Балориметри та термістори вимірюють малі потужності. Для великих використовуються атенюатори.

Ми на лекціях розглядали тільки методи з використанням болометрів і термісторів, які описані вище. Інші просто існують, і принципів ми їх не знаємо☺.**ну короче, я бы вообще этот список не писал, ибо это взято из книжки в которой описаны они все, но на свой страх и риск как хотите.Удачи.**

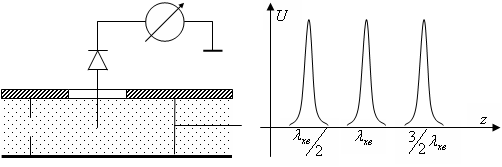
Загалом методи вимірювання потужності можна поділити на такі групи:

1. Для вимірювання поглинутої потужності
2. Калорометричний метод
3. Болометричний метод.
4. Термоелектричний метод.
5. Для вимірювання потужності що пройшла
6. Поглинаючої стінки
7. Зондовий метод
8. З використанням направлених відгалужувачів.
9. Для вимірювання імпульсної потужності.

**11. Вимірювання частоти НВЧ хвилі.**

Найпростіший вимірювач – вимірювальна лінія. Намалюємо її:

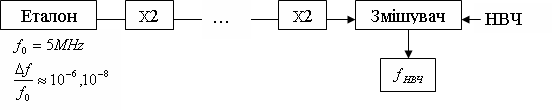
Тут максимум та мінімум – нечіткі, тому краще помістити у резонатор:

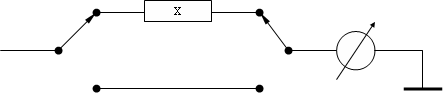
. Це – ВСТ, хвильоводи середньої потужності. Для більшої точності є гетеродинні вимірювачі частоти, котрі працюють зі стандартними генераторами частот.



Гетеродином може бути кварц чи молекулярний випромінювач на  (точність 10-12), також іноді використовується ефект Мьосбауера (точність 10-17).На всякий случай:(( Ефéкт Мессбáуера — фізичне явище резонансного поглинання гамма-випромінювання атомів у твердому тілі. Ядро ізольованого атома не поглинає гамма-кванти тієї ж енергії, що й випромінює. Причина цього в тому, що при великій енергії фотона не можна нехтувати втратою енергії на віддачу ядра. Випромінюючи гамма-квант, ядро згідно із законом збереження імпульсу повинно рухатися в протилежному напрямку. Поглинаючи гамма-квант, ядро вбирає в себе його імпульс і рухається в тому ж напрямку. В оптичному діапазоні енергія віддачі маленька, і атоми зазвичай поглинають на тій же частоті, що й випромінюють.))

## Випромінювання затухання.

Розглянемо метод відношення потужностей:



Якщо детектор лінійний, то , якщо ж детектор квадратичний, то .Однак, цей спосіб неточний, він залежить від приладу. Тому існує його модифікація – метод еталонного атенюатора. Тут використовується прецизійний атенюатор:

#### Х

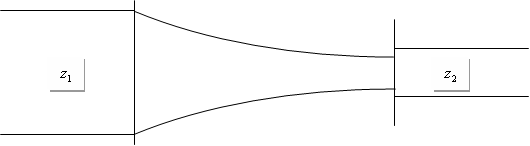
ПА

, - незалежно від властивостей детектора, бо на ньому завжди 100 поділок.

## 12. Узгодження опорів в техніці НВЧ.

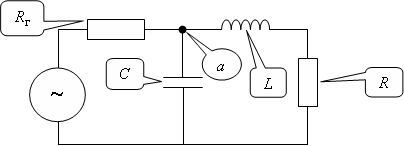
## Чвертьхвильовий трансформатор.

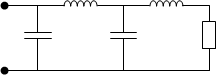
Нехай маємо два хвильоводи: , ; та стоїть задача передати енергію з одного в інший. Це можна зробити, з’єднавши їх відрізком хвильоводу з деяким опором .

Виявляється, що ,  для узгодження. Підрахуємо це: . Тут , тоді , це фактично резонансний пристрій. Для широкосмугового узгодження роблять багато “східців”:

Або ж плавний перехід (однак він більш довгий):

## Узгодження в МЕ.

Потрібно щось увімкнути між генератором та опором, щоб виділялась максимальна потужність. Зробимо так як показано на малюнку: Підрахуємо опір в точці *а*: , , , , тобто . Таким чином маємо коливальний контур на частоті . Тобто, - це повинно дорівнювати , тобто  - цим умовам має задовольняти контур .

Таким чином, для узгодження опір необхідно включати в паралельний коливальний контур. Тепер ми знаємо повну теорію узгодження.Щоб збільшити ширину смуги пропускання, використовують більш складні ланцюги, це зв’язані ланцюги, тут смуга пропускання ширша:

А що робити, якщо необхідно узгодити комбінований опір, наприклад . В таких випадках включають послідовно : , а потім узгоджують так само як і в попередньому випадку.

Взагалі, використовують два методи:

1. Комбінація штирів. 2. Комбінація .

**13. Генератор Гана**

У 1963 р. Дж.Б.Ганн виявив виникнення електричних коливань в однорідному кристалі напівпровідника при підведенні постійного електричного поля. Прилади на основі цього ефекту називають або генераторами НВЧ коливань на основі ефекту Ганна (генераторами Ганна), або діодами Ганна ( хоч такі прилади і не мають *p-n-*переходу).

Нехай при подачі постійної напруги на кристал між анодом і катодом виникає велика напруженність поля *E*0(але *E*0*<E*пор). У цьому випадку усі електрони легкі і густина струму через кристал має максимальне значення

** 4

Якщо поблизу катода існує найменша неоднорідність кристала (що є дуже ймовірним), то локальна напруженість поля у цій частині буде дещо вищою ніж величина поля у останній частині кристалу і може перевищувати порогову величину. Порогова напруженість поля у цій частині кристалу забезпечує ріст концентрації ”важких електронів” з малою рухливістю та зменшення концентрації “легких“ електронів з великою рухливістю, що призводить до локального збільшення опору. Відбувається перерозподіл падіння напруги по довжині кристалу. Напруженість поля у деякій частині кристалу (у домені) збільшується, а в останній частині зменшується. Отже, виникнення домену на одній з неоднорідностей кристалу виключає можливість виникнення доменів на інших неоднорідностях, тобто одночасно в кристалі може існувати тільки один домен.

В області домену електрони з меншою рухливістю рухаються під дією поля з меншою швидкістю , ніж електрони за границею домену. У зв’язку з цим “легкі” електрони доганяють домен, перетворюючись там у “важкі” і створюючи область підвищеної концентрації електронів - область від’ємного заряду. “Легкі” електрони з боку катода рухаються до анода швидше, ніж “важкі” електрони домену. У зв’язку з цим з боку анода створюється область домену із зниженою концентрацією електронів - область додатнього об’ємного заряду (рис.3).

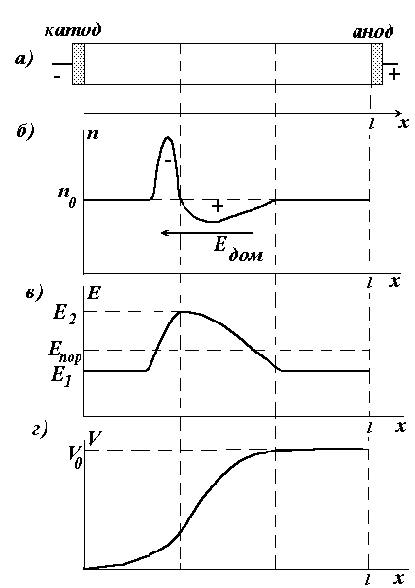


Рис.3. Структура електричного домена у генераторі Гана: *а)* схематичне зображення генератора; розподіл вздовж генератора Гана: *б)* концентрації електронів; *в)* напруженості електричного поля; *г)* напруги.

Таким чином, домен уявляє собою сформовані області об’ємних зарядів, але всередині домену під час росту напруженості електричного поля зростає швидкість “важких“ електронів. В той же час за границями домену швидкість електронів зменшується через те, що зменшується напруженість поля в результаті перерозподілу падінь напруги. В деякий момент часу швидкості руху електронів всередині домену та за його границями вирівнюються, і настає стан динамічної рівноваги.

Тому, стан динамічної рівноваги характеризується різними величинами напруженості поля за границями домену *Е*1  і всередині домену *Е*2 , але з однією і тією же швидкістю руху “легких” та “важких” електронів, тобто

** (5)

чи

**1 *Е*1 *= *2 *Е*2 (6)

де  - швидкість руху електронів за границями домену, - швидкість руху електронів всередині домену, що відповідає швидкості руху домену від катода до анода.

Очевидно, що , тому що *E*1<*E*0. Тому після утворення домену щільність струму зменшується до

*Imin = qn*0 (7)

Мінімальне значення щільності струму через кристал буде зберігатися під час всього руху домену через кристал чи на протязі часу прольоту

*tпр =l/* (8)

де *l* - довжина кристалу.

При досягненні аноду домен зникає і щільність струму зростає до величини *Imax* , що відповідає відсутності домену. Негайно після цього біля катоду формується новий домен і процес періодично повторюється.

**14. Генератори на лавино-пролітних діодах.**

ЛПД був створений в 1959 р. А.С.Тагером.

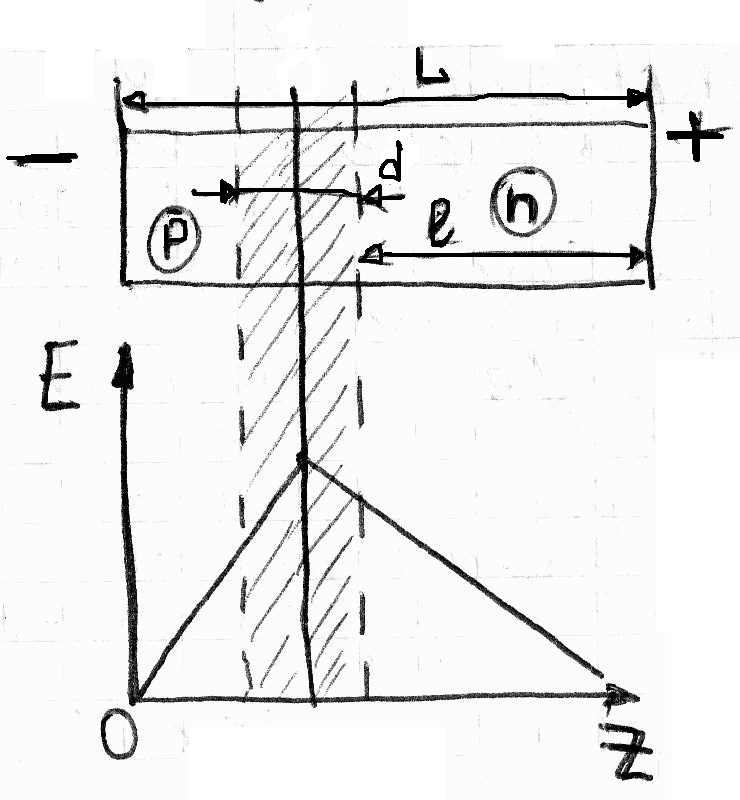
Механізм його роботи оснований на ефекті від’ємного динамічного опору, який виникає при лавинному пробої н/п діода внаслідок ударної іонізації.

Вперше генерація спостерігалася на германієвих обернено-зміщених діодах, які мають різкий злам у ВАХ. Пізніше – на кремнієвих, арсенід-галієвих...

ЛПД по частоті перекрили весь діапазон НІЧ від 0.5 до 500 ГГц. Мають суттєве підвищення ККД до 20-30% в см-діапазоні та 60-70% в дм-діапазоні.

На основі ЛПД створено ряд приладів НІЧ: генератори, підсилювачі, джерела шуму та ін.

Розглянемо механізм роботи ЛПД; для цього будемо використовувати діод з широким p-n-переходом:

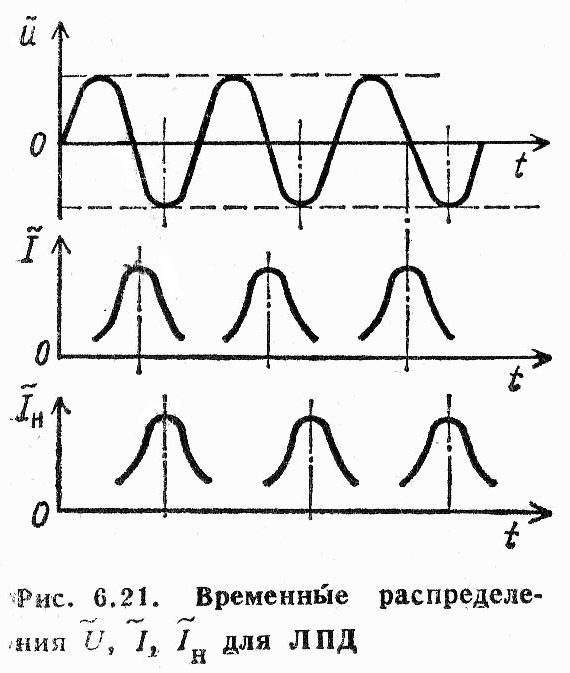
Рис 1.

Оскільки ми з’ясували, що ЛПД працює на ефекті дин. від'ємної провідності (динамічною називається тому, що проявляється лише для змінних складових струму та напруги в певному діапазоні частот). То з’ясуємо як вона виникає.

Прикладемо обернену напругу, за допомогою цього ми розширимо заборонену зону, в якій майже відсутні вільні носії заряду. В області металургічної границі поле досягає максимуму.

По мірі збільшення зворотної напруги напруженість поля в переході p-n зростає. Електрон (дірка) прискорені електричним полем на довжині вільного пробігу в переході p-n, при зіткненні з атомом можуть вибити електрон → народжується нова пара електрон – дірка і т.д.

Коли поле в площині металургічної границі досягає Екр – починається інтенсивний процес ударної іонізації – виникає лавинне помноження числа носіїв.

Утворені в шарі помноження носії дрейфують під дією сильного електричного поля: дірки через р-шар, а електрони – через n-область. В цей час поле проявляє гальмуючу дію. Саме лавинна природа струму емісії обумовлює інерційність. Для розвитку лавини необхідно певний час (миттєве значення поля Е визначає не величину лавинного струму, а швидкість його зміни).

Зміна струму емісії Іе відстає від зміни електричного поля на час τ3. Отже, у нас під дією змінної напруги в шарі помноження будуть формуватися згустки електронів.

На виході будемо мати короткі імпульси струму(Рис 2.)

Бачимо, що змінна складова струму знаходиться у протифазі до прикладеної напруги. При цьому в діоді спостерігається диф. від’ємна провідність.

Можна виділити три діодні структури, які можуть використовуватися у якості ЛПД:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| p+ | n | i | n |

1) діод Ріда

|  |  |
| --- | --- |
| p | n |

2) діод Тагера

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| p | i | n |

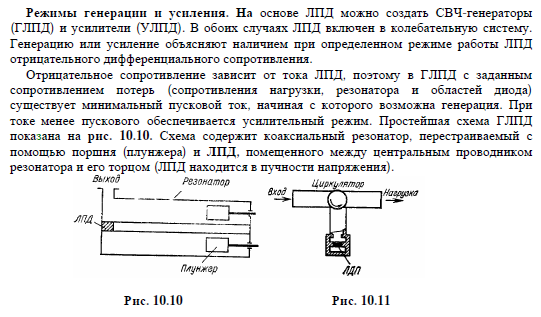
3) діод Місави

Можна виділити два основні режими роботи ЛПД:

1) impatt – не дуже високі амплітуди поля НВЧ. КПД – 25% ;

2) trapatt – різкий неоднорідний розподіл електричного поля, значна напруга НВЧ на діоді.

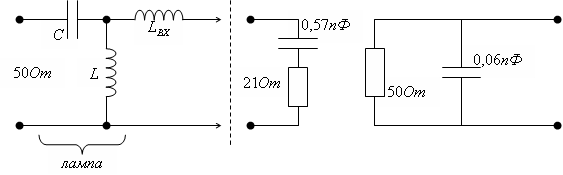
Виникаючі носії заповнюють весь простір дрейфу у вигляді електронно-діркової плазми. Провідність діода різко зростає і через нього за час від’ємного напівперіоду „проштовхується” імпульс струму великої амплітуди. Саме цим і обумовлена велика від’ємна провідність ЛПД в trapatt-режимі.

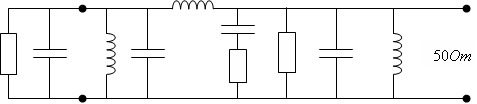
Розсмоктування носіїв заряду проходить дуже повільно і закінчується до моменту переходу напруги до позитивного напівперіоду.

**15. Підсилення НВЧ сигналів.**

# *Підсилювачі на НВЧ - транзисторах.*

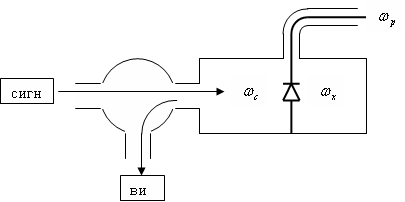
Підсилювачі НВЧ відрізняються від звичайних тим, що треба узгодити вхід-вихід та каскади.

Наприклад розглянемо еквівалентну схему транзистора АП-326А:

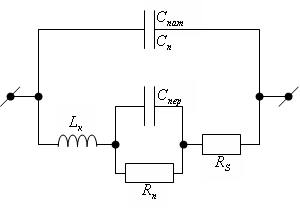
Для узгодження з лінією 50 Ом підключають  і трансформатор (лампу).  підбирається так, щоб узгодити з опорам 50 Ом. Аналогічно створюється резонанс та узгодження по опору на виході:

Принципова схема підсилювача:

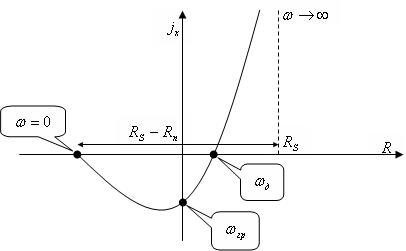
## Параметричний підсилювач на НП-діодах.

. Система генерує , при , якщо ж  то система не генерує, проте зовнішній сигнал не підсилюється.  - частота накачки.

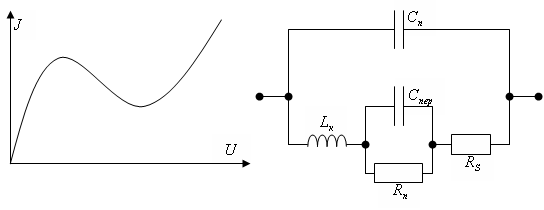
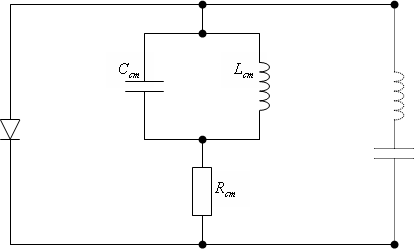
Інший варіант:- сигнал, - холостий, - накачка. .

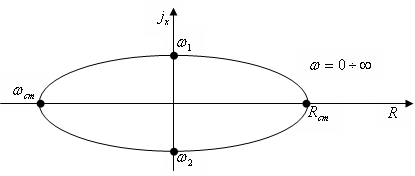
Умова існування резонансу на сигнальній частоті: , Тоді змінюючи  та , можна регулювати частоту, змінюючи умови резонансу. Схема була б “найбільш” мікроелектронною, якби можна було використати власні частоти діода. Спробуємо зробити це: розглянемо еквівалентну схему (див. Мал.):

Тут може бути послідовний резонанс  і паралельний , , .

Останнім часом роблять  малим, отже  дуже велика, і її не використовують. Можна використовувати . Розглянемо телевізійний параметричний підсилювач.  - позначені частоти відповідних резонаторів.

## Генерування та підсилення НВЧ. Підсилювач на тунельному діоді.

ВАХ  тунельного діоду має від’ємну ділянку, де . Будь-який діод можна представити еквівалентною схемою: В термінах цієї схеми буде  (тут ми врахували опір переходу ). Звичайні значення . Підрахуємо загальний опір діоду . Знехтуємо паразитичною ємністю , тоді , тут введено позначення: , . У формулі  - по модулю, тобто його від’ємність вже враховано. Графічний вигляд опору чи іншої комплексної величини, де параметром є частота, представляється годографом. Зобразимо його: - це резонансна частота діода, вона відповідає чисто реактивному опору.  - гранична частота, на якій опір перестає бути від’ємним. Може бути картина, коли <0, тоді наступає самозбудження, оскільки тут резонанс і від’ємний опір. Щоб запобігти цьому, вводять стабілізуючі ланки для обмеження смугу частот від’ємного опору:

На резонансній частоті контуру  опір всієї ланки ,а на всіх інших частотах: .Таким чином, маємо два паралельно з’єднані опори. Один з них , , тоді сумарний опір .Тоді при  буде , підсилення не буде. Тепер годограф буде мати інший вигляд, смуга буде на частотах .

Крім цих елементів, у схемі використовуються узгоджуючі трансформатори.

Коефіцієнт підсилення підсилювача на тунельному діоді . При цьому тут вхід та вихід не розв’язані, тому, по суті, коефіцієнт підсилення є коефіцієнтом відбиття. Такі підсилювачі нестійкі, нестабільні – параметрично залежать від навантаження.

Транзистор має розв’язані вхід та вихід (зв’язок порядку МОм). Тому зараз використовують саме транзистори.

*Регенеративний підсилювач* – це генератор в недозбудженому режимі.

Перевага транзисторів – триполюсна схема ( земля, вхід та вихід), хоча швидкодія гірша чим у діода.

**16. Невзаємні елементи НВЧ.**

Закон Ньютона каже, що . Однак, в загальному випадку: , тобто зв’язок не векторний, а тензорний – напрямок руху не завжди співпадає з напрямком сили. Приклад – гіроскоп чи дзига. В природі існують середовища, що працюють таким чином – електро- чи магнітно- гіротропні. У них намагніченість - , поляризація - .









, , - антисиметричний, . Ферити мають магнітогіротропні властивості, плазма має електрогіротропні властивості. Зараз використовують магнітогіротропність, тому її й розглядатимемо.

,бо .

## Тензор магнітної проникності фериту.

Рівняння Ландау-Лівшица руху в МП: . Ми будемо шукати  в . . Нехай маємо феромагнітне середовище в , при цьому орієнтація доменів , оскільки це енергетично вигідно.

Нехай тепер , тобто додали невелике змінне поле у перпендикулярному напрямку. Звичайно, при цьому зміниться : .

Тепер треба знайти , тобто . Розглядатимемо лінійну задачу, нелінійності не враховуємо. Можна представити .



.Ми знехтували ,  прирівнявши їх відповідно з , .

,  оскільки добутки  мають другу ступінь малості. З цієї системи одержимо розв’язок:

.Тут гіромагнітна частота , тобто маємо гіромагнітний ефект у фериті.



*Ферит – це магнітний діелектрик.*

При  (нескінченності не буде, оскільки  можна замінити як ) буде . Нехай ,  тоді , . Таким чином точка обертається по годинниковій стрілці.





Виявляється, магнітний момент, як і спін електрона, може рухатись лише по правому колу.Таким чином, лівополяризоване поле не буде впливати. На даних властивостях працюють всі прилади.

## Прилади. *Вони бувають трьох основних типів:*

1. Резонансні. , характеристика поглинання поля:
2. Прилади на ефекті **зміщення поля**.

Помістимо феритову кулю в поле. Хвиля рухається, налітає на кульку. Якщо куля в центрі, то поле на кулі матиме поперечну поляризацію. На стінці поляризація буде повздовжньою. Якщо куля ні в центрі, ні на стінці, то поле буде обертатися, тобто кругова поляризація.Таким чином у хвилеводі існують точки поздовжньої, поперечної та кругової поляризації.Оскільки моменти в фериті обертаються в одну сторону, то поляризація в різних точках хвилеводу буде різна. Взаємодія буде протилежною при зміні напрямку поля, напрямку хвилі та при симетричній зміні положення зразка у хвилеводі.

При взаємодії фериту з полем , при відсутності взаємодії .

У циркуляторі з феритом хвиля в одному напрямку буде взаємодіяти з феритом сильніше, ніж у протилежному (як і в хвилеводі – див. Мал.). Відповідно і довжина хвилі, що обертається за часовою стрілкою, буде , а для хвилі, що обертається проти, . Змінюючи радіус та , можна налагодити прилад так щоб хвиля повністю переходила:1->2, 2->3, 3->1 і не інакше.

1. Прилади на **ефектах Фарадея**.

***Фарадеївський вентиль і циркулятор.***Ці прилади працюють на великих потужностях. Вхідна та вихідна щілини повернуті на  одна відносно іншої. Всередині – ферит, навколо – електромагнітна котушка. Підбираємо параметри так, щоб хвиля змінювала поляризаційний кут на  після проходження .

Отримуємо циркулятор , . Якщо замість 2 поставити заглушку, то отримаємо вентиль, бо хвиля піде .

## Мікросмужкові лінії з феритом. *Замість діелектрику беремо , .*

Площина поляризація задана металевими смужками і не може обертатися. Можна змінювати . Є також три варіанти намагнічення [1], [2], [3].

1. . 2. , оскільки в цьому напрямку змінне , і не може взаємодіяти.3.  (нас цікавить ).