

**КИЇВСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ
ВІЙСЬКОВОЇ ПІДГОТОВКИ**

**КАФЕДРА
ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
ПІДГОТОВКИ**

ПРЕДМЕТ
“ОСНОВИ ПОБУДОВИ ВІЙСЬКОВИХ
ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ”

ТЕМА №16: АТЕНЮАТОРИ І
ВИМІРЮВАННЯ ПОСЛАБЛЕНЬ

ЗАНЯТТЯ №1: ПРИЛАДИ ДЛЯ
ВИМІРЮВАННЯ ПОСЛАБЛЕНЬ

НАВЧАЛЬНА МЕТА:

- 1. Надати загальні відомості і класифікацію атенюаторів.**
- 2. Надати характеристики атенюаторів різних типів.**
- 3. Вивчити методи вимірювання послаблень, засоби вимірювання послаблень та методи їх перевірки.**

ВИХОВНА МЕТА:

1. Виховувати у студентів дисциплінованість і культуру поведінки.

2. Виховувати впевненість і винахідливість при вивченні матеріалу.

3. Виховувати і розвивати творчий підхід при вивченні матеріалу на занятті і самостійній підготовці.

НАВЧАЛЬНІ ПИТАННЯ

- 1. Загальні відомості і класифікація атенюаторів.**
- 2. Характеристики атенюаторів різних видів.**
- 3. Методи вимірювання послаблень.**
- 4. Засоби вимірювання послаблень.**
- 5. Метрологічне забезпечення засобів вимірювання послаблень.**

ПИТАННЯ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ І КЛАСИФІКАЦІЯ АТЕНЮАТОРІВ

В НВЧ схемах широкого застосування дістали пристрої для послаблення і регулювання рівня потужності в трактах - атенюатори. Вони застосовуються для вимірювання амплітуди вихідного сигналу, чутливості вимірювальних приймачів, аналізаторів спектру, стробоскопічних осцилографів, розширення меж вимірювання вольтметрів, вимірювачів потужності та інших приладів.

Крім того, масового застосування в НВЧ трактах різного виду дістали чотирьохполюсники, такі як феритові пристрої, направлені відгалужувачі, мости, гібридні з'єднання і інші вузли. Постає вимоги до вимірювання їх параметрів, зокрема послаблення, яке вноситься цими чотирьохполюсниками. Однією з важливих і самостійних задач в радіотехніці і метрології є задача вимірювання великих послаблень.

Згідно з принципом дії атенюатори розділяються на резисторні, поглинаючі, граничні, поляризаційні, феритові, на напівпровідникових приладах.

По конструкції атенюатори розділяються на коаксіальні, хвилевідні, смугові.

Згідно з можливістю регулювання послаблення - на змінні (які керуються електрично і механічно) і фіксовані.

За рівнем потужності, яка послаблюється - на атенюатори низького рівня (до 1 Вт) і високого рівня.

За точністю на калібровані і некалібровані.

Атенюатори характеризуються послабленням (затуханням), тобто відношенням рівня потужності на вході до рівня потужності на виході, що можна записати у вигляді:

$$A=10 \lg (P_{вх} / P_{вих})$$

(1)

і коефіцієнтом стоячої хвилі КСХ.

ПИТАННЯ 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ АТЕНЮАТОРІВ РІЗНИХ ВИДІВ

Атенюатори резисторні (Д2)

це пристрої, в схемі яких для послаблення потужності використовуються резистори. Резисторні атенюатори розділяються на фіксовані і ступінчасті.

Фіксовані резисторні атенюатори - це Т - подібні подільники, які виконані на резисторах, наприклад в приладах С1- , С2- , С6- і т.д.

Ступінчасті атенюатори на резисторах в основному побудовані за двома схемами :

а) в діапазоні частот від постійного струму до 0,5-1 ГГц атенюаторні секції з певними значеннями послаблень (наприклад, 1, 2, 3, 4, і 10, 20, 30 40 дБ) з'єднуються послідовно за допомогою різноманітних комутуючих пристроїв (частіше всього з кулачковим механізмом управління). така схема дозволяє при мінімальній кількості резисторів (мінімальній кількості секцій) одержати ступінчасті атенюатори з широким діапазоном зміни послаблень (наприклад, від 0 до 120 дБ через 1 дБ).

б) в діапазоні частот до 12 ГГц застосовується конструкція ступінчастих атенюаторів барабанного типу.

Фіксовані атенюатори 1, 2, 3, 4, 5 і т.д. через 1 дБ 10, 20, 30, 40, 50 і т.д. через 10 дБ вмонтовуються в барабан, і за допомогою НВЧ перемикачів кожний з атенюаторів окремо підключається до високочастотного тракту.

Для забезпечення зміни послаблення від 0 до 120 дБ через 1 дБ застосовуються двох- або трьох барабанні атенюатори, тобто послідовно вмикаються дві або три секції. В цьому випадку похибка буде в 2-3 рази більшою.

Атенюатори поглинаючі (Д5)

Принцип дії поглинаючих атенюаторів (вид Д5)^{таблиця 2.} заснований на затуханні електромагнітної енергії в поглинаючих матеріалах.

Робочою частиною поглинаючих атенюаторів є пластина з нанесеною на неї шаром поглинаючого матеріалу. За допомогою ручки і відповідного механізму пластину можна переміщати до середини хвилеводу або коаксіальної лінії, тим самим збільшуючи розсіювання електромагнітної енергії в поглинаючому шарі. Це приводить до збільшення затухання електромагнітної хвилі, яке вноситься атенюатором.

В табл. 1 наведені характеристики резисторних і поглинаючих атенюаторів.

Таблиця 1.

Найменування	Тип	Діапазон частот, ГГц	Діапазон послаблення, ДБ	Похибка встановлення послаблення, ДБ	КСХ	ВЧ тракт, мм	Доп. вх. потужн Вт	Маса, кг
Атенюатор резисторний змінний	Д2-13	0,5-3	9-40	+0,5	1,4-1,5	16/4,6	3	2,5
	Д2-14	1-3	9-40	+0,5	1,4	16/7	3	2,5
	Д2-22	0-1,5	0-109	+0,06-1	-	16/7	1	-
Атенюатор резисторний ступінчастий	Д2-23	0-15	0-109	+0,06-2	-	16/4,6	1	-
	Д2-24	0-15	0-59	+0,06-1	-	16/7	1	-
	Д2-25	0-15	0-59	+0,06-1	-	16/7	1	-

Атеню атор резистор ний фіксо ваний	Д2-26	0-3	2	+0,4-0,5	1,15-1,	7/3	2	0,15
	Д2-27	0-3	3	+0,4-0,5	5	7/3	1,5	0,15
	Д2-28	0-3	4	+0,4-0,5	1,15-	7/3	1	0,15
	Д2-29	0-3	6	+0,4-0,5	1,5	7/3	1	0,15
	Д2-31	0-3	10	+0,4-0,5	”	7/3	1,5	0,15
	Д2-33	0-5	3	+1	1,45-	16/7	1	0,15
	Д2-34	0-5	5	+1	-1,2	16/7	1	0,15
	Д2-36	0-5	10	+1	”	16/7	1	0,15
	Д2-37	0-5	15	1,5	”	16/7	1	0,15
	Д2-38	0-5	20	1,5	”	16/7	1	0,15
	Д2-40	0-5	40	1,5	”	16/7	1	0,18
	Атеню атор поглина ючий змінний	Д5-17	1,5-3	1-30	-	1,3	16/4,6	1
Д5-18		3-7	1-20	-	1,4	10/4,3	1	1,5
Д5-20		11,5-17	1-30	+0,5-1,6	1,08	17x8	0,5	0,9
Д5-21		8,3-11,5	1-30	+0,5-1,6	1,08	23x10	0,5	0,95
Д5-22		7.5-10,2	1-30	+0,5-1,6	1,8	28x12	0,5	0,95

Межовий атенюатор це - відрізок круглого хвилеводу, на вході і на виході якого увімкнені відрізки коаксіальних ліній з збуджуючими і приймальними елементами. Затухання, яке виражене в децибелах

$$A = 8,68 \alpha \ell + A_{\text{поч.}} \quad \text{З}$$

лінійна функція відстані ℓ між збуджуючими і приймальними елементами.

Початкове послаблення $A_{\text{поч}}$ складає близько 10 - 25 дБ. Це - недолік атенюатора. Основні технічні характеристики граничних атенюаторів наведені в табл.2.

Таблиця 2.

Тип атенюатора	Діапазон частот, ГГц	Діапазон послаблення, ДБ	Похибка встановлення послаблення, ДБ	КСХ	ВЧ тракт, мм	Допустима вхідна потужність, Вт	Маса, кг
Д4-3	0,1-1,0	30-120	1,0-1,5	1,5	16/4,6	10	5
Д4-4	0,5-3	30-100	1,2-1,5	1,3	16/4,6	1	5
Д4-5	1,0-3,0	25-100	1,2-1,5	1,3	16/7	1	5

Поляризаційні атенюатори (ДЗ)

Це пристрої, які застосовуються для каліброваного послаблення енергії електромагнітних хвиль, дія яких заснована на залежності поглинання електромагнітних хвиль від площини їх поляризації.

Принцип дії таких атенюаторів полягає в зміні ступеня поглинання електромагнітної енергії спеціальною пластиною, яка розміщена в круглому хвилеводі і обертається разом з ним, в залежності від кута повороту пластини відносно площини поляризації електромагнітних хвиль.

Послаблення, яке вноситься атенюатором, визначається кутом повороту поглинаючої пластини і може бути відраховане за допомогою шкали, яка кінематично зв'язана з секцією, яка обертається, і тарована в децибелах згідно з розрахунковою формулою.

Конструктивно поляризаційний атенюатор складається з трьох секцій хвилеводів, які з'єднані послідовно. Середньою секцією є круглий хвилевід, який вільно обертається між двома крайніми хвилевідними секціями, які нерухомо закріплені в корпусі.

Обидві крайні секції - це переходи з прямокутного хвилеводу на круглий. В середині кожної секції (вздовж неї) розміщені поглинаючі пластини, які паралельні широким стінкам хвилеводів і одна одній і розділяють секції наполовину.

Пристрій відрахування складається з шкали, яка встановлена безпосередньо на поворотній секції, проекційної оптичної системи. Шкала виконана у вигляді сегменту із матового скла і тарована в децибелах.

Проекційна оптична система складається з проекційної лампи, об'єктива, двох дзеркал і екрана.

За допомогою проекційної оптичної системи ділянки шкали, які відповідають встановленому послабленню, проектується на екран атенюатора.

Енергія електромагнітної хвилі, яка розповсюджується вздовж прямокутного хвилеводу, попадає в одну з крайніх секцій атенюатора, в якому електромагнітна хвиля із хвилі N10 в прямокутному хвилеводі перетворюється в хвилю N11 в круглому хвилеводі без послаблень.

Потім електромагнітна енергія поступає в круглу середню секцію атенюатора, яка обертається, де в залежності від положення поглинаючої пластини послаблюється і поступає в другу крайню секцію атенюатора, здійснюється зворотне перетворення хвилі Н11 в Н10 в прямокутному хвилеводі.

Затухання, яке визначається в децибелах, в залежності від кута повороту θ визначається за допомогою формули

$$A = 40 \lg \sec \theta + A_{\text{поч.}} \quad \mathbf{4}$$

Основні технічні характеристики поляризаційних атенюаторів наведені в табл.3.

Таблиця 3.

Тип атенюатора	Діапазон частот, ГГц	Діапазон послаблення, дБ	Похибка встановлення послаблення, дБ	КСХ	ВЧ Тракт, мм	Маса, кг
ДЗ-27	5,65-8,25	0,5-60	+-(0,01-0,004А) дБ Вище 50 дБ +-0,6	1,15	35x15	165x230x530; 8,3
ДЗ-34А	23,05-17,44	0,5-70	+-(0,01-0,004А) дБ Вище 50 дБ +-0,7	1,2	17x8	350x270x210; 5,5

Феритові атенюатори, або феритові вентилі (Э6)

також відносяться до розв'язуючих пристроїв.

Вони володіють специфічними властивостями : в прямому напрямку пропускають енергію з дуже малим затуханням (0,5 - 1 дБ) і мають велике затухання (більше 20 дБ) для енергії, яка розповсюджується в зворотному напрямку.

Тим самим досягається розв'язка генератора від впливу навантаження без помітних втрат з потужності. За конструкцією вентилі розділяються на коаксіальні і хвилевідні.

Основні технічні характеристики коаксіальних і хвилевідних вентилів наведені в табл.4.

Таблиця 4.

Тип атенюатора	Діапазон частот, ГГц	Послаблення в прямому напрямку дБ	Послаблення в зворотному напрямку, дБ	КСХ	Рівень потужності в тракці	ВЧ Тракт, мм	Маса, кг
Э6-29	0,9-1,8	1,5	15	1,3	2	16/7	2,25
Э6-36	4-7	1,5	20	1,3	5	10/4	1,15
Э6-42	5,64-8,24	1,5	20	1,3	2	35*15	2,4

Атенюатори на напівпровідникових приладах

Атенюатори на основі р-і-п - діодів і діодних малогабаритних збірок мають ступінчате з кроками 1 і 10 дБ регулювання послаблення до 30-60 дБ.

Похибка встановлення послаблення в залежності від діапазону частот, широкосмуговості цих пристроїв коливається в межах $\pm 0,5$ до $\pm 1,5$ дБ.

Такі атенюатори мають малі габарити і масу, можливість електронного управління і знаходять широке застосування в сучасній вимірювальній техніці.

Основними перевагами їх є :
можливість цифрового відліку послаблення ;
можливість дистанційного управління ;
можливість вмонтування у вимірювальну
апаратуру і інші.

Основні технічні характеристики деяких
атенюаторів, які електрично перестроюються
наведені в табл. 5.

Таблиця 5.

Тип атенюатора	Діапазон частот, ГГц	Максимальне Послаблення, дБ	Початкове послаблення, дБ	Допустима потужність, Вт
АЦ003	12-37,5	20	0,7-1	1,5
ВЦ011	9,3-9,9	40	0,7	1,5
ВЦ007	3+-0,5	40	1,0	-

В матеріалі даного питання розглянуто характеристики атенюаторів різних видів: атенюатори резисторні, атенюатори поглинаючі, граничні (межові) атенюатори , поляризаційні атенюатори, феритові атенюатори, або феритові вентиля, атенюатори на напівпровідникових приладах.

ПИТАННЯ 3

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПОСЛАБЛЕНЬ

В основному всі методи вимірювання послаблення в високочастотних трактах це - як правило, різновидність методу заміщення (порівняння із еталонним атенюатором). За способом увімкнення еталонного атенюатора всі методи вимірювання послаблення, які засновані на методі заміщення, розділяються на наступні :

послідовного заміщення на високій частоті

паралельного заміщення на високій частоті

послідовного заміщення на проміжній частоті

паралельного заміщення на проміжній частоті

заміщення на низькій частоті

Метод заміщення на проміжній частоті найбільш універсальний і знайшов широкого застосування при вимірюванні послаблення.

Метод послідовного заміщення на НВЧ

При цьому методі в НВЧ тракт вмикаються послідовно два атенюатори : еталонний і, який підлягає повірці. Затухання обох атенюаторів порівнюється таким чином, щоб сума затухань їх залишалась постійною (в початковому положенні один атенюатор має максимальне затухання, інший - мінімальне ; в кінцевому положенні - навпаки).

Межі вимірювання цим методом досить великі (до 70-80 дБ), а власна похибка методу мала і визначається в основному похибкою еталонного атенюатора.

Схема вимірювання послаблення методом заміщення на НВЧ показана на рис.1.

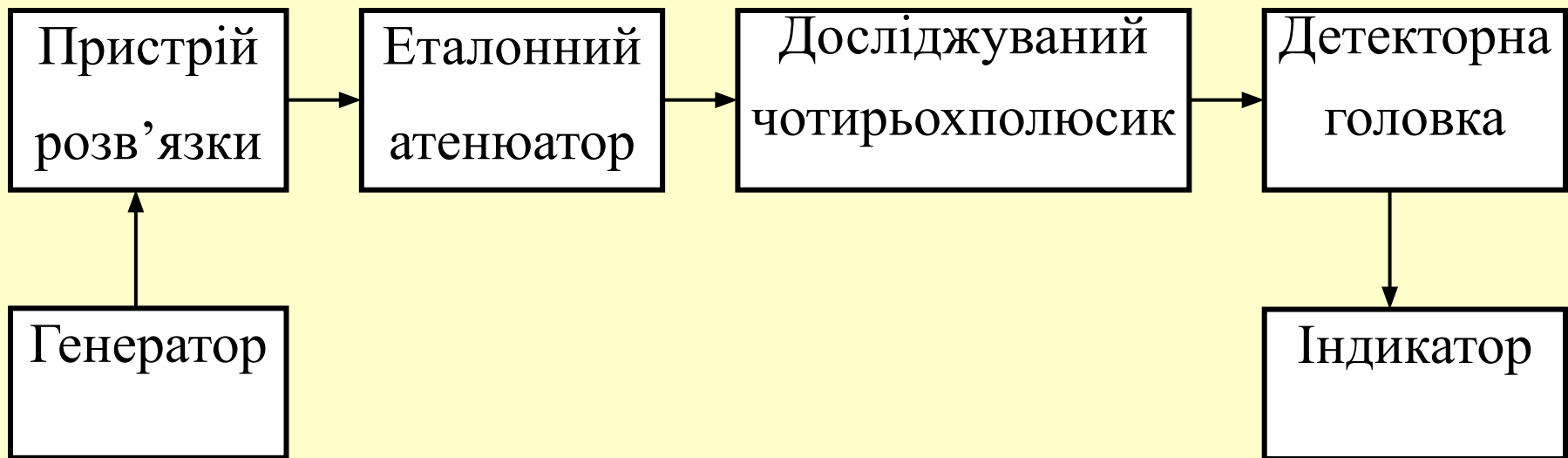


Рис.1. Схема вимірювання послаблення методом послідовного заміщення на НВЧ

Метод паралельного заміщення на НВЧ

При цьому методі НВЧ тракт складається з двох паралельних каналів, в один з яких увімкнений еталонний атенюатор, а в інший такий, що підлягає повірці. По індикатору за допомогою еталонного атенюатора встановлюється однакове послаблення в обох каналах.

Затухання атенюатора, який підлягає повірці визначається по затуханню еталонного атенюатора. Похибка вимірювання визначається похибкою еталонного атенюатора, похибкою за рахунок не ідентичності каналів і нестабільністю генератора.

Схема вимірювання послаблення методом паралельного заміщення на НВЧ показана на рис. 2.

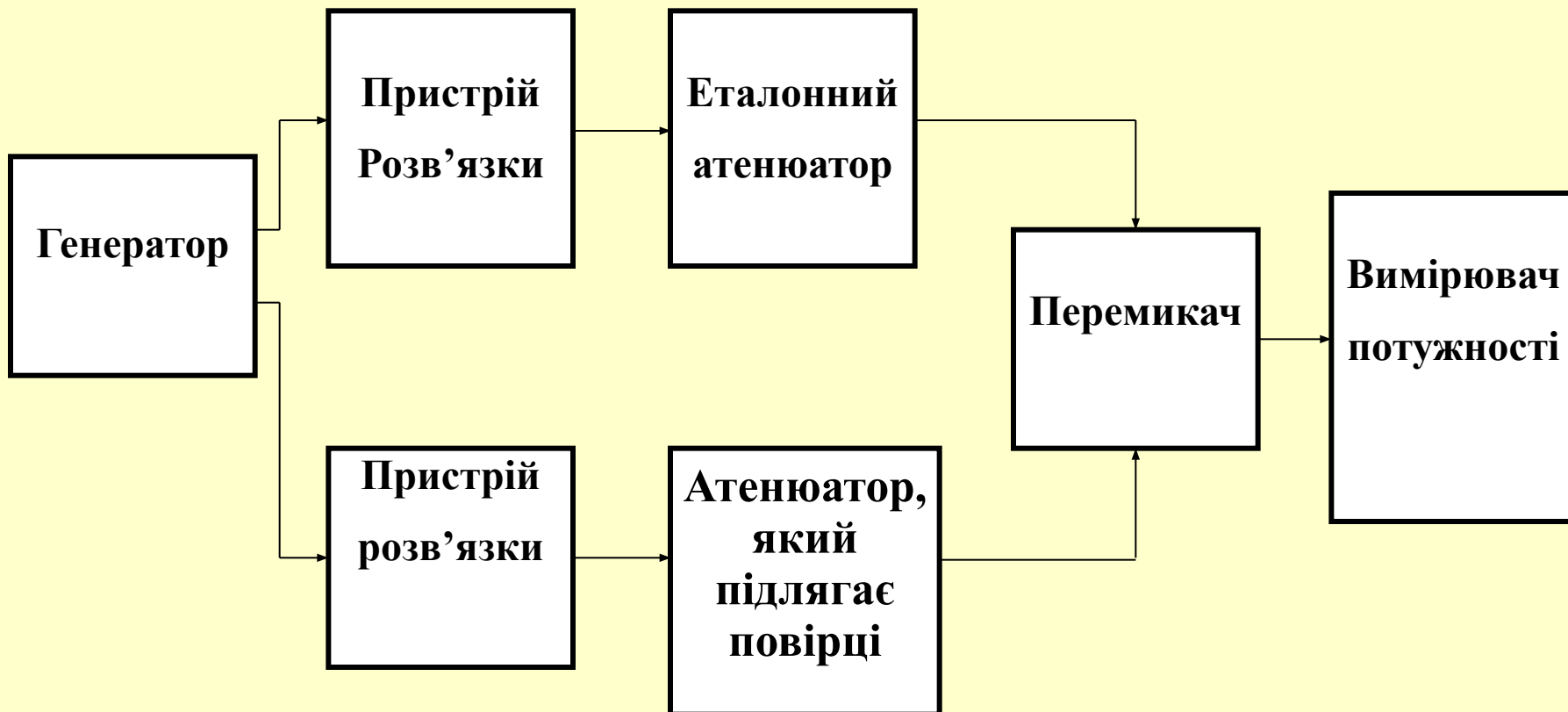


Рис.2.Схема вимірювання послаблення методом паралельного заміщення на НВЧ.

Метод заміщення на низькій частоті (метод квадратичного детектування)

Цей метод полягає в порівнянні затухання, яке вноситься чотирьохполюсником, з коефіцієнтом поділу подільника, який стоїть в схемі індикатора і, який працює на частоті модуляції ВЧ генератора.

Напруга частоти модуляції виділяється на кристалічному детекторі, який працює на квадратичній ділянці своєї характеристики.

В такому випадку продетектована напруга пропорційна НВЧ потужності.

$$A_{дб} = 10 U_1 / U_2, \quad (5)$$

де U_1 – напруга на виході детектора без чотирьохполюсника, який підлягає дослідженню;

U_2 – таж сама напруга при увімкненому чотирьохполюснику.

Цей метод забезпечує вимірювання послаблення в діапазоні 35-70 дБ з похибкою $\pm 0,1-0,15$ дБ.

Схема вимірювання послаблення методом заміщення на низькій частоті наведена на рис. 3.



Рис.3. Схема вимірювання послаблення методом заміщення на низькій частоті

Метод вимірювання послаблення за допомогою направлених відгалужувачів

При застосуванні цього методу послаблення чотирьохполюсника визначається шляхом виділення, детектування НВЧ сигналів в тракті за допомогою направлених детекторів до і після чотирьохполюсника і подальшого їх порівняння.

Цей метод застосовується при панорамній індикації і вимірюванні послаблень.

Схема вимірювання послаблення за допомогою направлених відгалужувачів зображена на рис. 4.

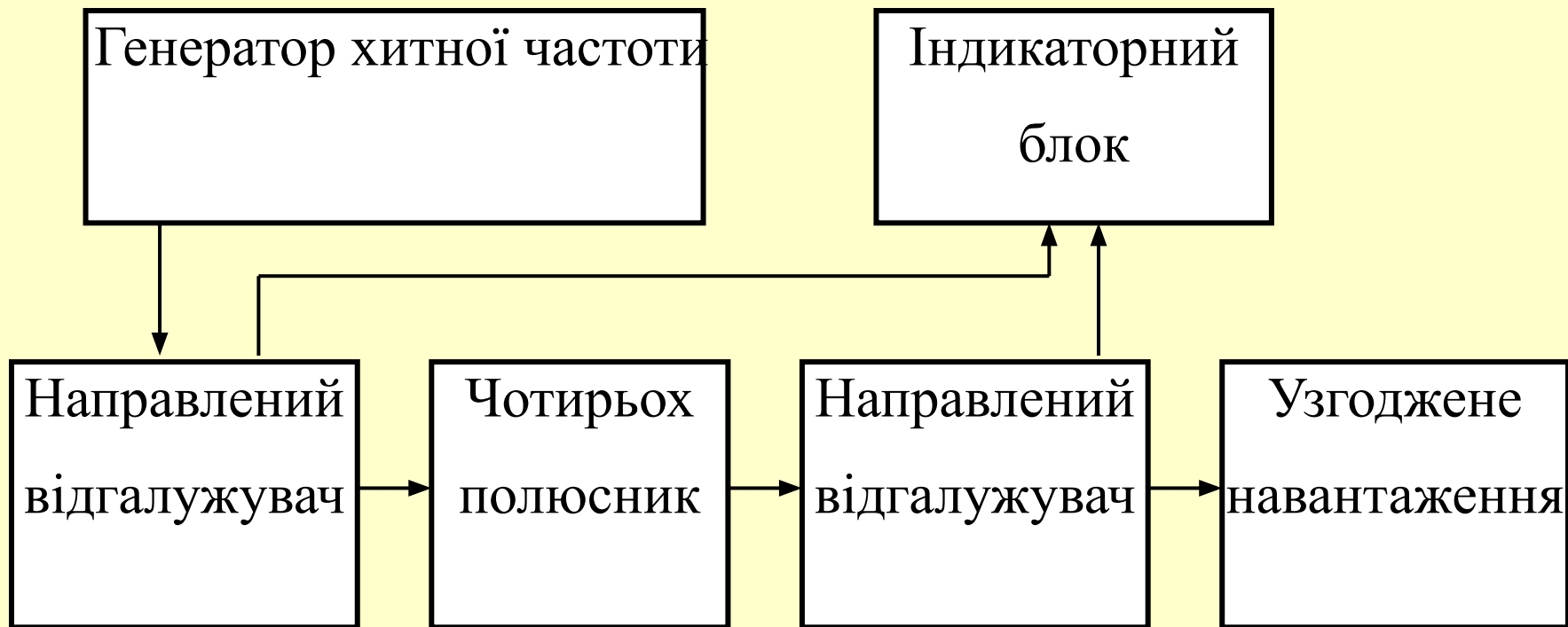


Рис.4. Схема вимірювання послаблення методом направлених відгалужувачів

Метод послідовного заміщення на проміжній частоті (супергетеродинний метод)

Метод полягає в порівнянні затухання, яке вноситься чотирьохполюсником в тракт НВЧ, з затуханням еталонного атенюатора на проміжній частоті еталонної установки.

Цей метод універсальний, так як дозволяє працювати в широкому діапазоні частот з одним і тим же еталонним атенюатором і забезпечує похибку вимірювання приблизно 1 % затухання в децибелах. Діапазон вимірювання послаблення значний і становить 100-120 дБ.

Схема вимірювання послаблення методом послідовного заміщення на проміжній частоті зображена на рис. 5.

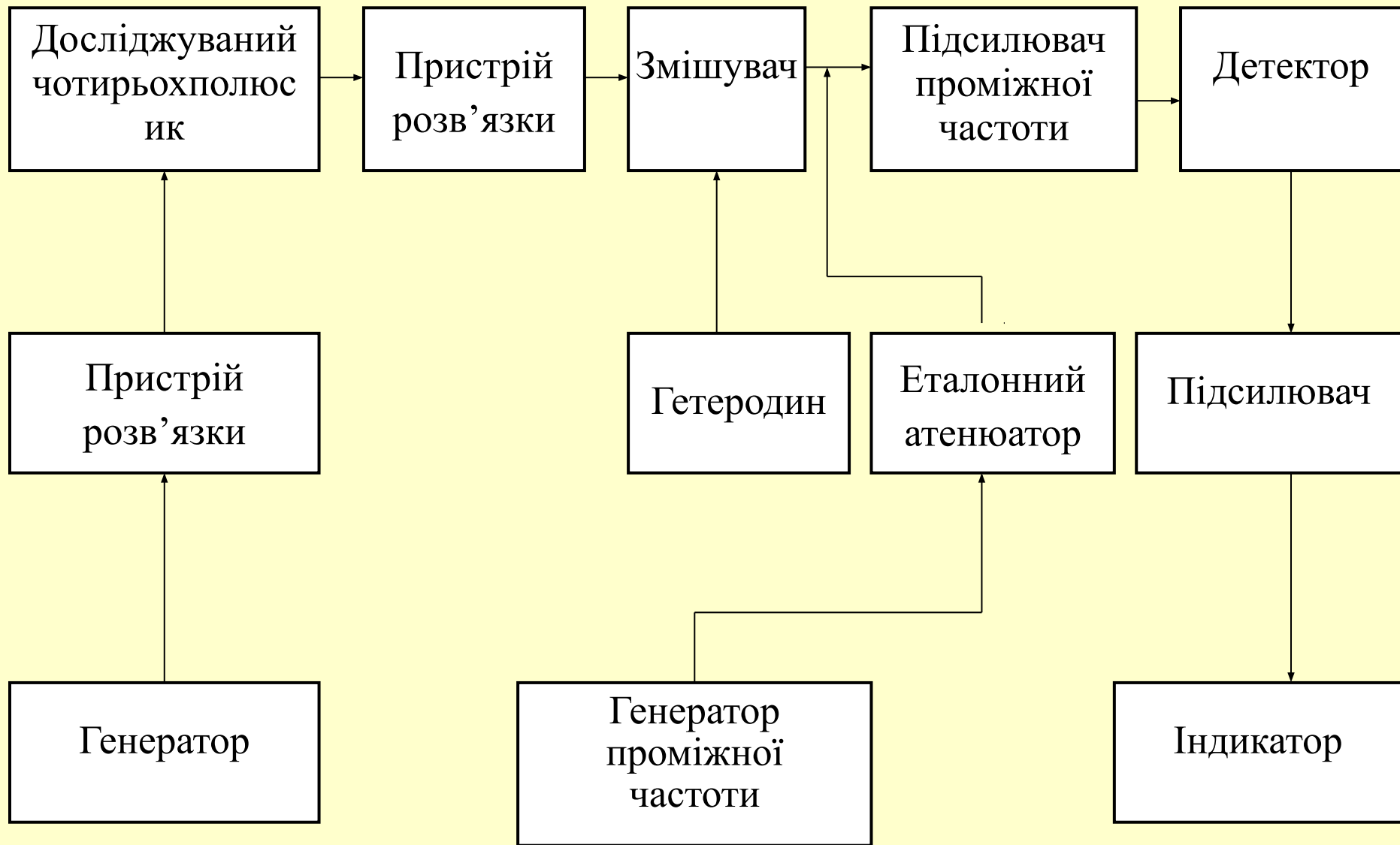


Рис.5.Схема вимірювання послаблення методом послідовного заміщення на проміжній частоті.

ПИТАННЯ 4

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПОСЛАБЛЕНЬ

Виходячи із методів вимірювання послаблень, всі сучасні засоби вимірювання послаблення можна розділити на наступні :

установки для перевірки атенюаторів;

панорамні вимірювачі КСХ і послаблення;

вимірювачі комплексних коефіцієнтів передачі;

поляризаційні атенюатори.

Установки для перевірки атенюаторів

В основу принципу дії установок покладено модуляційний метод паралельного порівняння (заміщення) на проміжній частоті (супергетеродинний).

Прикладами установок для перевірки атенюаторів можна навести наступні : Д1-9, Д1-14, ДК1-12 і ДК1-15.

Технічні характеристики деяких установок для перевірки атенюаторів наведені в табл. 6.

Параметри	Д1-9	ДК1-12	Д1-14	ДК1-15
Діапазон частот, ГГц	0,0001-17,44	0,0001-17,44	0,0001-37,5	37,5-78,3
Діапазон вимірювання:				
Таблиця 6. послаблення, ДБ	0-100	0-140	0-100	0-80
фази, град	-	0-360	-	0-360
Похибка, ДБ	0,040-1	0,02-2,5	0,05-1,53	
систематична				±(0,1-1,1)
випадкова			Не більше 0,25	
КСХН входу, не більше	0,1-0,7 1,3	0,02-1 1,15	1,5	1,2-1,5
ВЧ тракт, мм	16/7; 16/4,6 35x15 23x10 16x8	7/3; 16/4,6 16x8	7/3; 16x8 11x5,5 7,2x3,4	5,2x2,6 3,6x1,8
Габаритні розміри, мм	480x320x475	480x320x475	480x240x475	480x480x120 480x480x160
Маса, кг	43	95	28,5	54

2 і 4 – розв’язуючі атенюатори. Від зовнішнього генератора 3 на вхід атенюатора, який підлягає повірці, 1 надходять модульовані меандром високочастотні сигнали, які після послаблення в ньому перетворюються за допомогою гетеродина 5 і змішувача 6 в сигнали U_x проміжної частоти, які поступають на підсилювач проміжної частоти 9 (ППЧ) установки.

На інший вхід ППЧ надходить через еталонний атенюатор 7 модульований протифазним меандром сигнал U_0 від внутрішнього генератора проміжної частоти 8. Амплітуда цього сигналу визначається значенням послаблення еталонного атенюатора A_0 і рівнем сигналу генератора проміжної частоти. Протифазна імпульсна модуляція сигналів від зовнішнього і внутрішнього генераторів дозволяє за допомогою індикаторних пристроїв установки (11, 14, 15, 16) здійснювати порівняння і виділяти сигнал різниці.

Вимірювання послаблення A_x пристрою, який підлягає дослідженню, (атенюатора) здійснюється наступним чином. При нульовому (початковому) послабленні досліджуваного пристрою 1 встановлюється послаблення еталонного атенюатора 7 таким, при якому досягається нульове значення сигналу різниці (нульові покази індикатора 16). Здійснюється відлік показів еталонного атенюатора A_{z1} . Потім встановлюється послаблення пристрою, який підлягає дослідженню, на значення A_x , яке підлягає контролю, і знову вирівнюються сигнали на вході індикатора (намагаються досягти нульових показів індикатора) змінюючи послаблення еталонного атенюатора. Фіксується друге значення A_{z2} . Значення послаблення, яке введене атенюатором 1 A_x , визначається як різниця показів еталонного атенюатора : $A_x = A_{z2} - A_{z1}$.

Для забезпечення процесу автоматизації до складу установок входять фільтр 14, фазовий детектор 15, блок управління 12 і інші.

Основною перевагою методу паралельного порівняння на проміжній частоті полягає в можливості вимірювання послаблення сигналів в широкому діапазоні ВЧ і НВЧ за допомогою одного еталонного атенюатора, який працює на проміжній частоті. Це зіграло вирішальну роль при виборі принципів роботи еталонних засобів вимірювання послаблення, таких як установки типів Д1-9, ДК1-12, Д1-14, ДК1-15, ДК1-16 і ін.

Установки Д1-9 і Д1-14 за принципом дії аналогічні, але у установки Д1-14 покращені технічні характеристики в частині розширення робочого діапазону частот і границь вимірювання послаблення.

ПИТАННЯ 5

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОСЛАБЛЕНЬ

Повірка установок для калібрування атенюаторів здійснюється шляхом повірки на проміжній частоті еталонного атенюатора, який вмонтований в установку, за допомогою іншого еталонного атенюатора (Д1-13 або Д1-11), який пройшов атестацію в органах Держстандарту.

Схема повірки показана на рис.7.

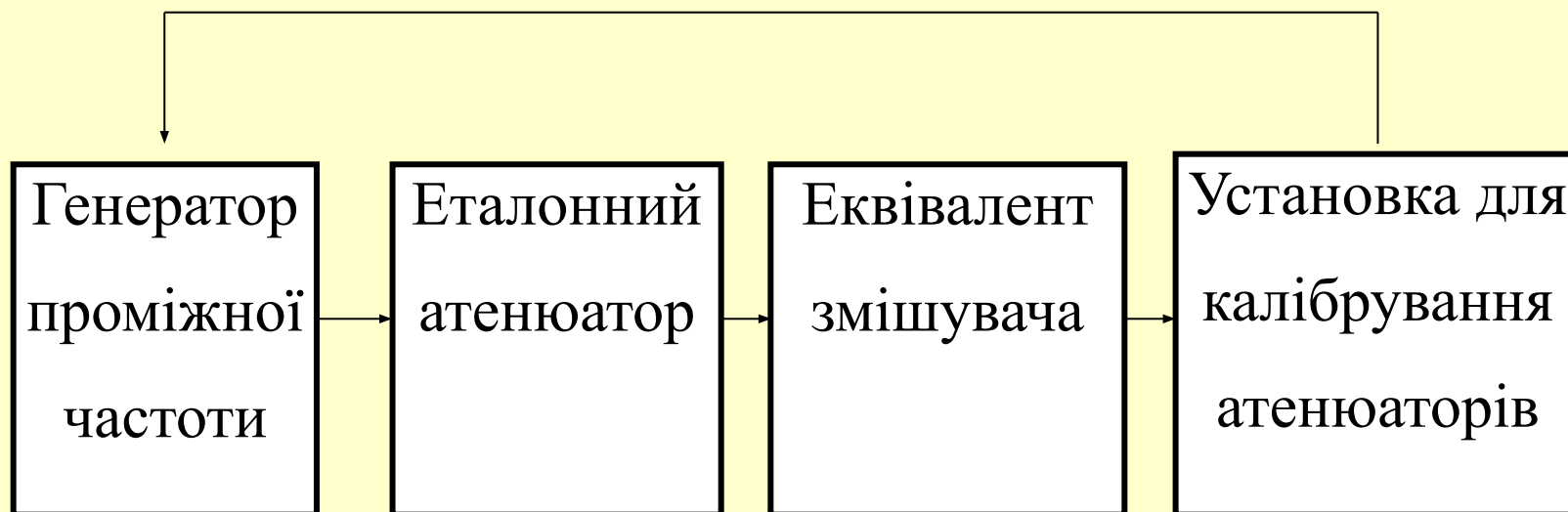


Рис.7. Схема повірки установки для калібрування атенюаторів

Здійснюються багаторазові вимірювання декількох значень послаблення атенюатора (Д1-13 або Д1-11) на проміжній частоті установки (наприклад 6,5 ГГц) і кожний раз визначається значення A_i за допомогою еталонного атенюатора установки. Обчислюються середньоарифметичні значення для кожного значення послаблення :

$$A_{o.a.} = \sum(A_i / n), \quad (5)$$

де n – кількість вимірювань для кожного значення послаблення.

Повірка поляризаційних атенюаторів здійснюється за допомогою установок ДК1-12 і ДК1-15, інші атенюатори – на установках Д1-14 і Д1-15.