

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ
ОТ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Руководство к лабораторной работе по дисциплинам «Электродинамика и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны»
для студентов специальностей 210302, 210303, 210304,
210312, 210313, 210401, 210403, 210405

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф. СВЧиКР

_____С.Н.Шарангович
“ _____ “ _____ 2011 г.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Руководство к лабораторной работе по дисциплинам; «Электродинамика и распространение радиоволн», «Электромагнитные поля и волны»
для студентов специальностей 210302, 210303, 210304,
210312, 210313, 210401, 210403, 210405

Разработчики
доц. каф. СВЧ и КР
_____Замотринский ВА,

зав. лаб. каф. СВЧ и КР
_____Никифоров А.Н.

Содержание

1. Введение.....	4
2. Теоретические сведения.....	4
3. Описание экспериментальной установки.....	8
4. Порядок выполнения работы.....	10
5. Содержание отчета.....	10
6. Контрольные вопросы.....	11
7. Список литературы.....	11
Приложение 1. Генератор Г4-109.....	12
Приложение 2. Измерительный усилитель 28-ИМ.....	14

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с отражением электромагнитных волн, играют важную роль в таких областях радиотехники, как радиосвязь и телевидение, радиолокация и экранирование. Отражение электромагнитных волн подчиняется тем же законам Снеллиуса, что и отражение световых волн (поскольку световые волны – это тоже электромагнитные, но очень высокой частоты). Необходимо иметь в виду, что законы Снеллиуса справедливы только для идеально гладких поверхностей. Отражение в этом случае называется зеркальным. Световые волны испытывают, как правило, диффузное (рассеянное) отражение, а электромагнитные волны в диапазоне радиоволн – отражение более близкое к зеркальному. Характер отражения зависит от отношения высоты неровностей отражающей поверхности к длине волны. Для световых волн это отношение как правило много больше единицы, а для радиоволн – близко к единице или много меньше ее.

Целью данной работы является ознакомление с методикой измерения модуля коэффициента отражения электромагнитных волн сантиметрового диапазона и сравнение расчетных и экспериментальных данных для различных веществ и поляризаций радиоволн.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Дадим вначале некоторые определения. Рассмотрим падение плоской электромагнитной волны на плоскую границу раздела двух сред. Плоскостью

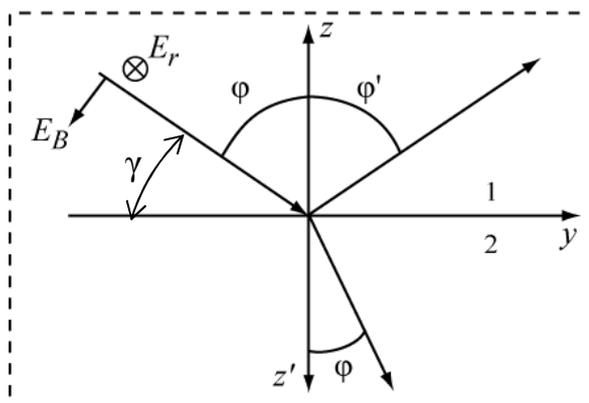


Рис.2.1

падения называется плоскость, проходящая через нормаль к поверхности раздела и направление распространения падающей волны. На рис. 2.1 плоскость падения – это плоскость рисунка. Известно, что в свободном пространстве электромагнитные волны являются поперечными, Это означает, что

электрический и магнитный векторы (\vec{E} и \vec{H}) расположены в плоскости перпендикулярной направлению распространения волны. По отношению к плоскости падения различают волны с горизонтальной и вертикальной поляризацией.

При вертикальной поляризации вектор \vec{E} лежит в плоскости падения волны, при горизонтальной – перпендикулярен ей. На рис.2.1 вектор \vec{E}_2 направлен для данного момента времени за рисунок (видно оперение стрелы). Вектора \vec{H}_e и \vec{H}_z направлены перпендикулярно соответствующим векторам электрического поля так, что их векторное произведение (вектор Пойнтинга) направлено вдоль распространения волны. Укажите сами направления векторов \vec{H} при вертикальной и горизонтальной поляризации на рисунке 2.1.

При падении электромагнитных волн на границу раздела двух сред возникают отраженные и преломленные волны. Направления распространения для них определяются законами Снеллиуса

$$\varphi' = \varphi, \quad k_1 \sin \varphi = k_2 \sin \psi, \quad (2.1)$$

Коэффициентом отражения называется отношение комплексных амплитуд полей E (или H) отраженной и падающей волн, взятое в точке отражения на отражающей поверхности S .

$$\begin{aligned} \dot{R}_z &= \frac{\dot{E}_{omp}}{\dot{E}_{nad}} \Big|_S = \frac{\dot{Z}_{c2} \cos \varphi - \dot{Z}_{c1} \cos \psi}{\dot{Z}_{c2} \cos \varphi + \dot{Z}_{c1} \cos \psi}; \\ \dot{R}_e &= \frac{\dot{H}_{omp}}{\dot{H}_{nad}} \Big|_S = \frac{\dot{Z}_{c1} \cos \varphi - \dot{Z}_{c2} \cos \psi}{\dot{Z}_{c1} \cos \varphi + \dot{Z}_{c2} \cos \psi}; \end{aligned} \quad (2.2)$$

В формулах (2.1) и (2.2) $k_{1,2}$ и $\dot{Z}_{c1,2}$ комплексная постоянная распространения и комплексное характеристическое сопротивление каждой среды.

Предположим, что волна падает из воздуха на поверхность вещества с параметрами ϵ_r и σ – относительной диэлектрической проницаемостью и проводимостью вещества и $\mu_r = 1$ (вещество немагнитное), Поскольку воздух по сво-

им электрическим параметрам подобен вакууму, то коэффициентам отражения в зависимости от поляризации можно придать вид

$$\dot{R}_e = \frac{\dot{\epsilon}_r \sin \gamma - \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \cos^2 \gamma}}{\dot{\epsilon}_r \sin \gamma + \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \cos^2 \gamma}}, \quad \dot{R}_z = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \cos^2 \gamma}}, \quad (2.3)$$

где $\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r - j60\lambda\sigma$ - относительная комплексная диэлектрическая проницаемость вещества, λ - длина волны в воздухе, $\gamma = 90^\circ - \varphi$ - угол скольжения (рис.2.1).

Непосредственное измерение $E_{отр}$ и $E_{над}$ на поверхности S , как правило, затруднено. Поэтому, на практике коэффициенты отражения -определяют, сравнивая отраженные сигналы от исследуемого вещества и от вещества с известным коэффициентом отражения при неизменном $E_{над}$. В качестве такого вещества обычно использует какой-либо металл, для которого из-за большого значения проводимости (порядка 10^7 См/м) значение $\dot{\epsilon}_r \approx -j\infty$ и коэффициенты отражения, согласно формулам (2.3), принимают значения $\dot{R}_e \approx 1$ и $\dot{R}_z \approx -1$. Например для меди $\sigma = 5,6 \cdot 10^7$ См/м и на частоте 10 ГГц $|R_e| = |R_z| = 0,9998$.

В данной лабораторной работе измеряется только модуль коэффициента отражения, поскольку измерение фазы коэффициента отражения потребовало бы значительного усложнения экспериментальной установки. В качестве исследуемых веществ выбраны вода и песок, как представители земной поверхности, значительно отличающиеся по своим электрическим параметрам.

Значения ϵ_r и σ для некоторых видов земной поверхности на низких и высоких частотах приведены в таблице. Видно, что на высоких частотах эти параметры зависят от частоты, в этом проявляется явление дисперсии. В данной работе в качестве одной из отражающих поверхностей используется песок, близкий по своим параметрам к сухой почве.

Вид поверхности	f=0		f=3 ГГц		f=10 ГГц	
	ϵ_r	σ	ϵ_r	σ	ϵ_r	σ
Морская вода	75	1 - 6	70	1 -6	65	10-20
Пресная вода	80	$10^{-3} - 10^{-2}$	75	1-2	64	10-20
Сухая почва	3-6	$10^{-5} - 10^{-3}$	3-6	$10^{-3} - 10^{-2}$	3-6	0,1-0,2
Влажная почва	20-30	$10^{-2} - 10^{-1}$	20-30	0,6-1	10-20	1-2

Поверхности песка можно придать волнистую поверхность и пронаблюдать изменение коэффициента отражения в зависимости от высоты неровности и от ориентации вектора E относительно неровностей. В электродинамике и оптике для оценки характера отражения принят критерий Релея

$$h_{\text{дон}} \leq \frac{\lambda}{16 \sin \gamma} \quad (2.4)$$

Если это соотношение выполняется, то отражение можно считать зеркальным, в противном случае – смешанным с присутствием зеркального и диффузного типов отражения.

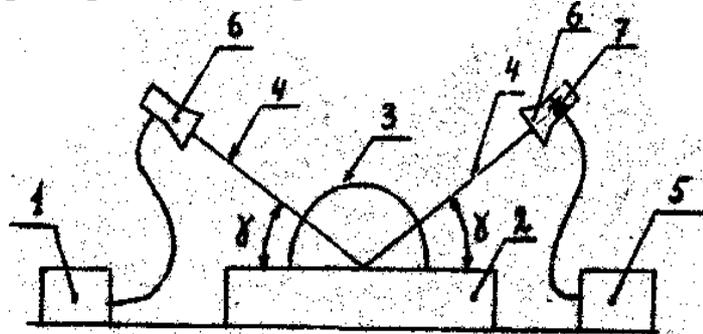
Анализ формул (2.3) показывает, что, если отражение происходит от границы воздух – идеальный диэлектрик ($\sigma=0$), то при вертикальной поляризации существует угол падения, при котором отраженная волна отсутствует и происходит полное преломление падающей волны. Этот угол падения называется углом Брюстера – φ_B и ему соответствует угол скольжений γ_0

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_r}{1 + \epsilon_r}} \quad \text{и} \quad \sin \gamma_0 = \sqrt{\frac{1}{1 + \epsilon_r}} \quad (2.5)$$

При горизонтальной поляризации такого угла не существует. Если вещество обладает потерями ($\sigma \neq 0$), то полного преломления при вертикальной поляризации в чистом виде не существует, но $|R_v|$ при некотором угле γ имеет минимальное значение. Приблизительно этот угол можно определить по формуле (2.4), если вместо ϵ_r подставит модуль этой величины $|\dot{\epsilon}_r| = \sqrt{\epsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}$.

3.ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрим работу экспериментальной установки (рис.2.1)



1 - генератор; 2- ящик с исследуемым веществом; 3 - транспортер;
4 - штанги; 5 - измерительный усилитель; 6 - передающая
и приемная рупорные антенны; 7 - детекторная секция.

Рис.2.1 Схема экспериментальной установки

. От генератора СВЧ-диапазона ($8 + 12$ ГГц) мощность по коаксиальному кабелю поступает на передающую рупорную антенну, которая излучает электромагнитные волны в направлении на отражающую поверхность. Отраженная волна частично улавливается приемной рупорной антенной, детектируется детекторной секцией и поступает на измерительный усилитель. Усилитель имеет регулируемую полосу пропускания в диапазоне $20 \text{ Гц} * 10 \text{ кГц}$, поэтому для того, чтобы усилитель реагировал на сигнал с частотой около 10 ГГц, на генераторе нужно установить режим внутренней модуляции, при которой высокочастотный сигнал модулируется прямоугольными импульсами с частотой повторения 1 кГц. На выходе детектора высокочастотные составляющие отфильтровываются конструктивной емкостью, а низкочастотный сигнал частотой 1 кГц поступает на усилитель, где усиливается и -измеряется. Кристаллический детектор помещен в специальную детекторную секцию, которая представляет собой отрезок прямоугольного волновода с подвижным короткозамыкающим поршнем. При изменении положения поршня стоячая волна, образующаяся в детекторной секции смещается относительно детектора. Если детектор будет находится в максимуме электрического поля, то в нем будет наводиться максимальная э.д.с. и показания

измерительного усилителя будут также максимальны. Поэтому при изменении частоты генератора нужно подстраивать детекторную секцию на максимум сигнала, перемещая поршень вращением подстроечного винта.

Исследуемые вещества (вода и песок) находятся в специальных ящиках, которые могут накрываться металлическим листом. Для перехода от одного ящика к другому нужно снять антенны со штанги развернуть их на 180° . Антенны закреплены в поворотных устройствах, которые позволяют устанавливать вертикальную или горизонтальную поляризацию поля. Поскольку в волноводе и рупорной антенне используется волна основного типа H_{10} , то электрический вектор ориентирован перпендикулярно широкой стенке волновода и рупора.

Вольтамперная характеристика детектора при слабых сигналах может считаться квадратичной. Поэтому/ показания измерительного усилителя α , пропорциональные току детектора, будут пропорциональны $|E|^2$. Таким образом, модуль коэффициента отражения определяется через отношение отраженных сигналов от исследуемой поверхности и металла как

$$|R| = \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_0}} \quad (3.1)$$

где α –показания усилителя для исследуемой поверхности, α_0 – показания для металла.

Используемый в данной работе генератор имеет калиброванный аттенюатор (ослабитель), проградуированный в децибелах ослабления выходной мощности.. Это позволяет отказаться от учета характеристики детектора и повысить точность измерения. Если обозначить β - коэффициент ослабления аттенюатора в децибелах при исследуемой поверхности, а β_0 – то же при металле, при условии, что отраженные сигналы одинаковы, то модуль коэффициента отражения определится как

$$|R| = 10^{\frac{\beta - \beta_0}{20}} \quad (3.2)$$

Рекомендуется эту формулу получить самостоятельно.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1 Ознакомиться с теорией работы, описанием генератора и измерительного усилителя.

4.2 Включить генератор, после его прогрева убедиться в наличии выходной мощности по показаниям индикатора генератора. Включить усилитель.

4.3 Установить частоту генератора по указанию преподавателя, или соответствующую достаточной выходной мощности генератора.

4.4 Поместить на ящик металлический лист и добиться максимальных показаний усилителя, настраивая генератор, детекторную секцию и усилитель. Усиление усилителя следует устанавливать таким, чтобы при выключенной мощности генератора показания усилителя от его собственных шумов не превышали первых значащих цифр его шкалы.

4.5 Изменяя угол γ от 20° до 70° (через 10°) измерить коэффициенты отражения для вертикальной и горизонтальной поляризаций, используя формулы (2.6) или (2.7) для обоих веществ. Сравнение с отражением от металла проводить для каждого угла и каждой поляризации.

4.6 Рассчитать теоретические зависимости $|R_{e,z}(\gamma)|$ для исследуемых поверхностей, построить их в виде графиков и нанести на них экспериментальные данные. Для песка и воды рассчитать значения углов Брюстера и сравнить их с экспериментальными.

4.7 Придать песку волнистую поверхность и пронаблюдать изменение модуля коэффициента отражения от высоты неровностей и поляризации волны. Проверить выполнение критерия Релея (2.5)

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

5.1 Схема экспериментальной установки и краткое описание методики измерений.

5.2 Таблица измеренных значений α (или β) $< 4_0$ для воды и песка при разных γ я обеих поляризаций.

- 5.3 Графики теоретических и экспериментальных зависимостей $|R_{e,z}(\gamma)|$ для воды и песка.
- 5.4 Расчетные значения углов Брюстера для песка воды и сравнение их с экспериментом.
- 5.5 Результаты исследования влияния шероховатости на коэффициент отражения.
- 5.6. Выводы по работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При рассмотрении каких явлений коэффициенты отражения играют особую важную роль?
2. Как зависят коэффициенты отражения от ϵ_r и σ ?
3. В каких случаях наблюдается полное преломление?
4. Можно ли считать, что в данной работе измеряется абсолютный коэффициент отражения?
5. Какие погрешности метода и измерительной установки присущи данной работе?
6. Почему в данной установке генератор должен работать в режиме внутренней модуляции?
7. Почему в данном методе нужно учитывать характеристику детектора и как она учитывается?
8. Волна с круговой поляризацией падает на границу идеального диэлектрика под углом Брюстера. Какую поляризацию будут иметь отраженная и преломленная волны?

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б.М. Петров Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов. - М.: Горячая линия- Телеком, 2007.-558 с. (100)
2. Л.А.Боков Электромагнитные поля и волны: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003-214 с. (50)

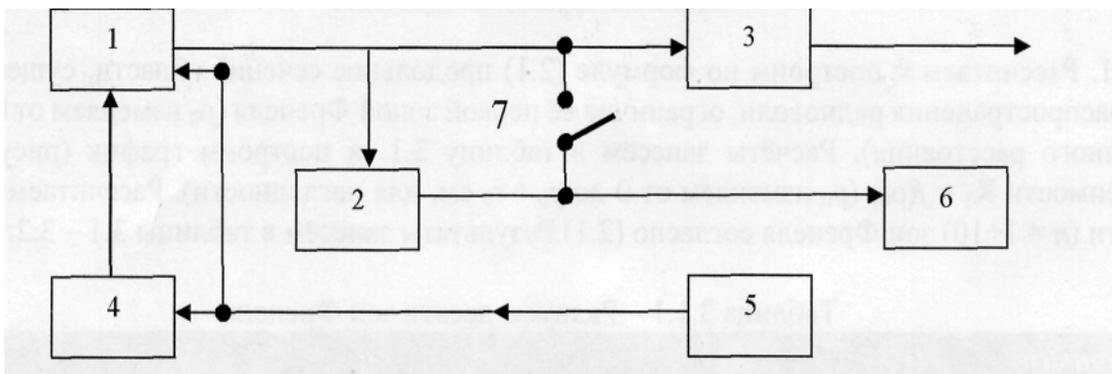
3. Замотринский В.А., Падусова Е.В., Соколова Ж.М., Шангина Л.И. Электромагнитные поля и волны: Уч.пособие. –Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006.-175с. (40)

4. Мандель А.Е., Замотринский В.А. Распространение радиоволн – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006. 164с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ГЕНЕРАТОР Г4-109

Структурная схема генератора Г4-109



1- клистронный блок, 2 - волномер, 3 - аттенюатор, 4 -модулятор, 5 - блок питания , 6 - индикаторный прибор, 7 - переключатель.

Генератор сигналов Г4-109 является источником высокочастотных сигналов, калиброванных по частоте, уровню выходной мощности, режимам модуляции и предназначен для различных радиотехнических измерений в лабораторных условиях.

Технические данные генератора.

1.Рабочий диапазон частот 8.51-10.3 ГГц и 10.3 -12.16 ГГц перекрывается двумя клистрономы К -113ГЭ и К -113ВЭ.

2.Уровень выходной калиброванной мощности регулируется в пределах 10^{-3} - 10^{-14} Вт (0 -110 дБ) с помощью встроенного аттенюатора, имеющего ре-

гулировки : плавную от 0 до -60 дБ и ступенчатую от 0 до -50 дБ. Уровень выходной некалиброванной мощности не менее 8 мВт.

3 .Генератор может работать в режиме непрерывных и модулированных колебаний, внутренняя модуляция - симметричными прямоугольными импульсами (меандром) с частотой следования 1 кГц.

Назначение ручек управления

«Установка частоты» - две ручки перестройки частоты для 1 и 11 поддиапазонов,

« поддиапазоны» переключатель поддиапазонов,

« режимы генератора»-непрерывный (нг), внутренняя модуляция меандром, внешняя модуляция,

«отражатель» - изменяет напряжение на отражателях клистронов для установки максимальной мощности генерации,

«уст, мощ.»- служит для установки уровня мощности, поступающей от генераторного блока в волноводный тракт,

«частотомер» служит для перестройки резонатора внутреннего частотомера, Выше расположена шкала частотомера,

«чувствительность» - изменяет чувствительность усилителя частотомера,

1« Уровень мощности dB mW» - сдвоенная ручка управления выходным аттенуатором. Ручкой плавной регулировки устанавливается ослабление, отсчитываемое по шкале, ручкой ступенчатой регулировки - одно из фиксированных значений -50, 0 или +7 дБ.

«част, -мощ.» переключает индикаторный прибор с измерения частоты на измерение мощности,

« уст «0» » служит для балансировки схемы измерения мощности.

Порядок работы с прибором

1. Включить прибор и дать ему прогреться в течение нескольких минут.
2. Ручкой "режим генератора " установить режим внутренней модуляции.
3. Установить ориентировочно требуемую частоту.

4. Дальнейшие действия с прибором выполняются по ходу выполнения работы.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ 28-ИМ

Измерительный усилитель 28-ИМ предназначен для усиления и измерения слабых сигналов звуковой частоты, а в комплекте с измерительными линиями - для измерения КСВ.

Технические данные усилителя.

1. Диапазон частот 0,2- 10 кГц.
2. Вход усилителя рассчитан на работу от кристаллического детектора или болометра и имеет входное сопротивление не менее 500 Ом.
3. Усилитель может работать при широкой полосе пропускания и при узкой, разбитой на три поддиапазона.
4. При широкой полосе стрелка прибора отклоняется на всю шкалу при подаче на вход усилителя напряжения не более 25 мкВ , при узкой полосе - не более 10 мкВ.
5. Усилитель дает возможность измерять напряжения в пределах от 5 мкВ до 250 мВ с точностью $\pm 5\%$ от верхнего предела шкалы.
6. В усилителе имеется выход на коаксиальное гнездо и переключатель, дающий возможность отключать вольтметр с выхода усилителя.

Назначение ручек управления

1. Верхняя ручка «Входное напряжение» позволяет ослаблять входной сигнал в указанное число раз. В положении «*1» ослабления нет, в положении «x 1.25» ослабление в 1.25 раз и т.д.

Нижняя ручка «Входное напряжение» позволяет ослаблять сигнал в 10, 100 и 1000 раз. В положении «к» производится калибровка усиления прибора.

2. Переключатель «кристалл – болометр» подключает вход прибора либо к кристаллическому детектору, либо к болометру.

3. Переключатель « Диапазон частот» позволяет изменять полосу

пропускания усилителя с широкой (200 Гц - 10 кГц) на одну из узких.

4. Ручка «Плавная регулировка частоты» позволяет точно настроиться на частоту входного сигнала при работе на одной из узких полос пропускания усилителя.

5. Ручка «Установка нуля» служит для установки нуля индикаторного прибора.

6. «Усиление» позволяет плавно изменять коэффициент усиления прибора.

7. Индикаторный прибор имеет две шкалы. По нижней шкале (0 -25 μV) производится отсчет входного напряжения в микровольтах при условии, что усиление прибора откалибровано. Верхняя шкала проградуирована в относительных уровнях входного сигнала (0 — 100 делений).

8. Тумблер « Вольтметр вкл.-выкл.» позволяет отключать индикаторный прибор от выхода усилителя. Это используется при калибровке усиления прибора.

Работа сприбором.

1. Поскольку во всех лабораторных работах не требуется измерения абсолютного значения напряжений, то калибровку усиления прибора производить, как правило, не следует. При измерениях лучше пользоваться верхней шкалой, как более подробной.

2. Для уменьшения уровня собственных шумов и повышения чувствительности прибора следует работать на узкой полосе пропускания, соответствующей частоте модуляции генератора (обычно 1 кГц).

3. Не следует устанавливать слишком большое усиление , поскольку при этом показания индикатора отражают уровень собственных шум при отсутствии сигнала. Практически уровень усиления должен быть таким, чтобы показания прибора при самой чувствительной шкале не превышали 10 делений по верхней шкале прибора при отсутствии сигнала.