

3.5. Исследование основных схем включения операционного усилителя

Общие сведения

Операционный усилитель (ОУ) представляет собой усилитель постоянного тока с высокоомным дифференциальным входом, высоким коэффициентом усиления и малым значением напряжения смещения нуля. Два часто употребляемых условных обозначения ОУ приведены на рис. 3.5.1.



Рис. 3.5.1

При подаче сигнала на инвертирующий вход приращение выходного сигнала противоположно по знаку (фазе) с приращениями входного сигнала (инвертирующее включение ОУ). Если же сигнал подан на неинвертирующий вход, то приращение выходного сигнала совпадает по знаку (фазе) с входным сигналом (неинвертирующее включение). При подаче сигналов на оба входа (дифференциальное включение) приращение сигнала на выходе пропорционально разности входных сигналов. Эти три схемы представлены на рис. 3.5.2.

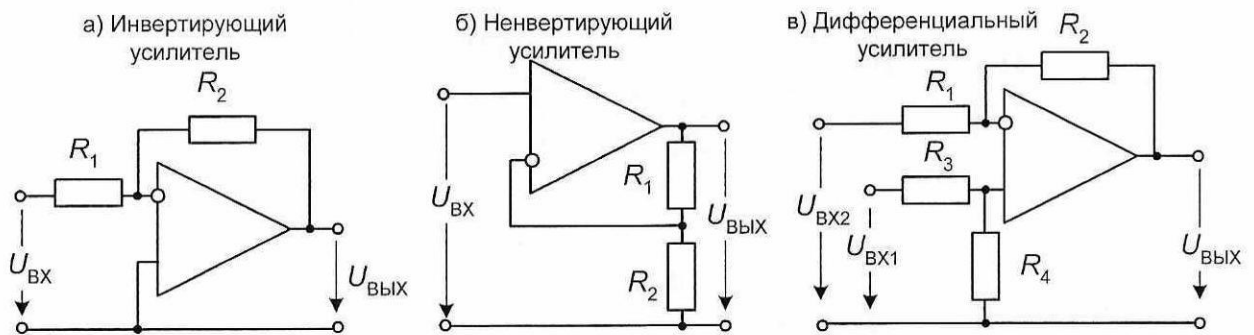


Рис. 3.5.2

Преобразование сигналов в цепях с операционными усилителями почти исключительно определяется свойствами цепей внешних обратных связей.

Так в схемах а, б и в, коэффициенты усиления входного напряжения выражаются через внешние сопротивления следующим образом:

$$а) K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R_2}{R_1}; \quad б) K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}; \quad в) K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ1} - U_{ВХ2}} = \frac{R_2}{R_1} \text{ при } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}.$$

На операционных усилителях возможно построение множества различных устройств, преобразующих величину и форму сигналов или генерирующих сигналы различной формы.

Экспериментальная часть

Задание

Для инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального усилителей построить кривые зависимости выходного напряжения от входного напряжения при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи. Изучить ослабление синфазного сигнала в дифференциальном усилителе.

Порядок выполнения эксперимента

- Установите на монтажную панель модуль ОАЭ-М9, подведите к гнездам «Подключение питания» напряжения от блока генераторов напряжений.
- Соберите цепь инвертирующего усилителя, как показано на принципиальной схеме (рис. 3.5.3).
- С помощью мультиметра измерьте величины выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ при двух различных сопротивлениях отрицательной обратной связи $R_{\text{ОС}}$ и входных напряжениях $U_{\text{ВХ}}$ согласно табл. 3.5.1. Сопротивления обратной связи присоединяются перемычками на модуле. Занесите эти значения в верхние строки табл.3.5.1, а нижние оставьте для неинвертирующего усилителя.

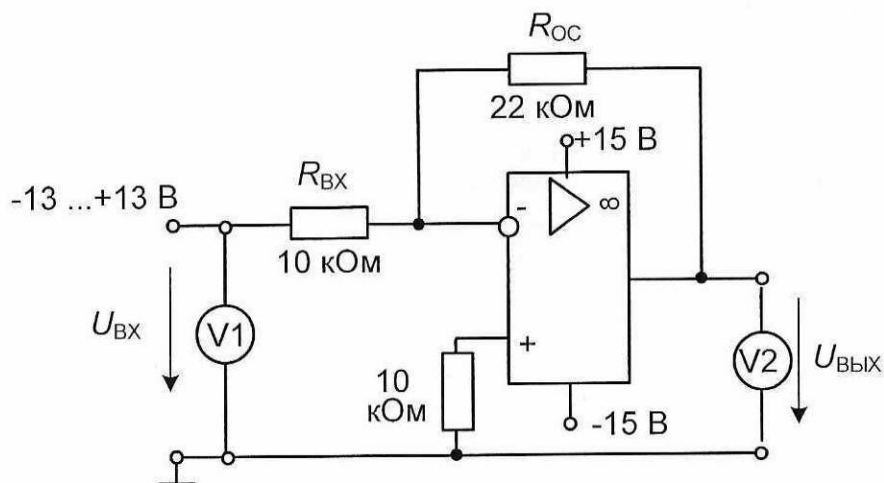


Рис. 3.5.3

- На графике (рис. 3.5.6) постройте кривые зависимостей $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи $R_{\text{ОС}}$.

Таблица 3.5.1

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$ при $R_{\text{ОС}} = 22 \text{ кОм}$											
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$ при $R_{\text{ОС}} = 47 \text{ кОм}$											

- Соберите цепь неинвертирующего усилителя (рис. 3.5.4), и снова измерьте выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ при тех же значениях сопротивления отрицательной

обратной связи R_{OC} и входного напряжения $U_{ВХ}$ согласно таблице 3.5.1. Постройте графики на том же рис.3.5.7.

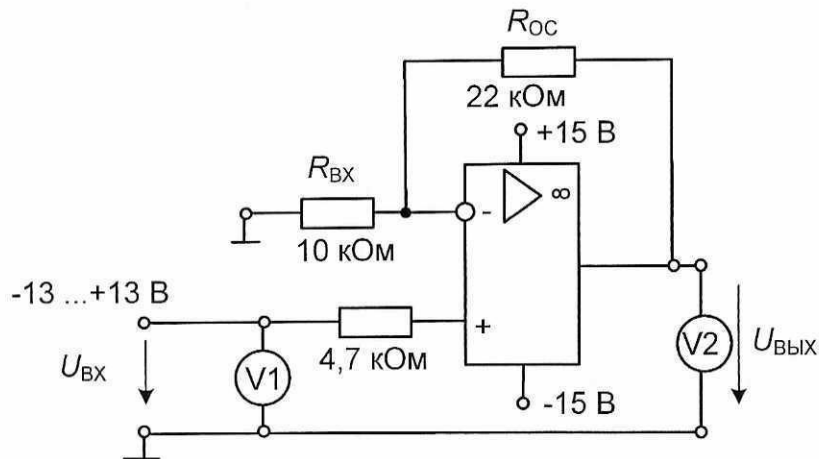


Рис. 3.5.4

- Соберите цепь дифференциального усилителя (рис. 3.5.5). Подайте сначала на оба входа одно и то же напряжение от регулируемого источника постоянного напряжения $-13...+13$ В. Потенциометр при этом не используется. Сопротивления обратной связи в этом опыте R_2 и R_4 равно 100 кОм. Присоедините их перемычками. Входные напряжения измеряйте осциллографом в режиме открытого входа, выходное напряжение измеряйте мультиметром.
- Изменяя входное напряжение согласно табл. 3.5.2, измерьте значения $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$. Занесите их в табл. 3.5.2 и постройте график выходного напряжения в функции от входного (рис.3.5.10).
- Замените в схеме два сопротивления R_2 и R_4 100 кОм сопротивлениями 10 кОм и подайте на второй вход напряжение с потенциометра, а на первый – от регулируемого источника, как показано на рис. 3.5.5.
- Установите $U_{ВХ1} = -4$ В и измерьте значения выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ при различных входных напряжениях $U_{ВХ2}$, указанных в верхней строке табл. 3.5.3. Повторите измерения для $U_{ВХ1} = 0$ В и $U_{ВХ1} = +4$ В. На рис. 3.5.8 постройте графики $U_{ВЫХ}(U_{ВХ2})$ при разных значениях $U_{ВХ1}$.
- Проанализируйте и объясните результаты.

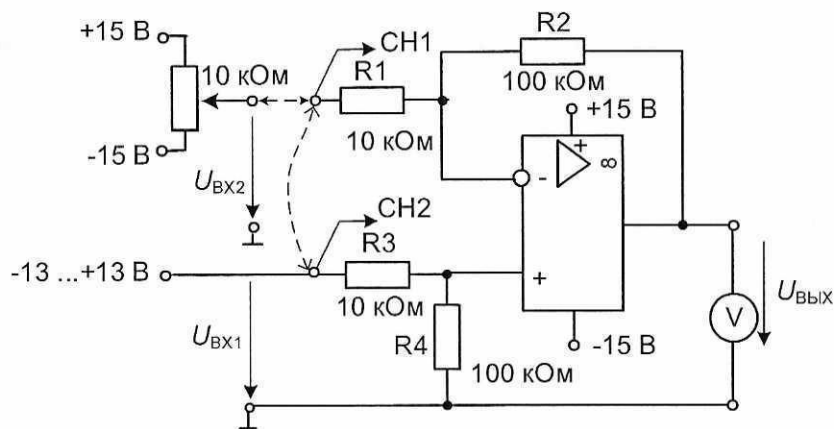


Рис. 3.5.5

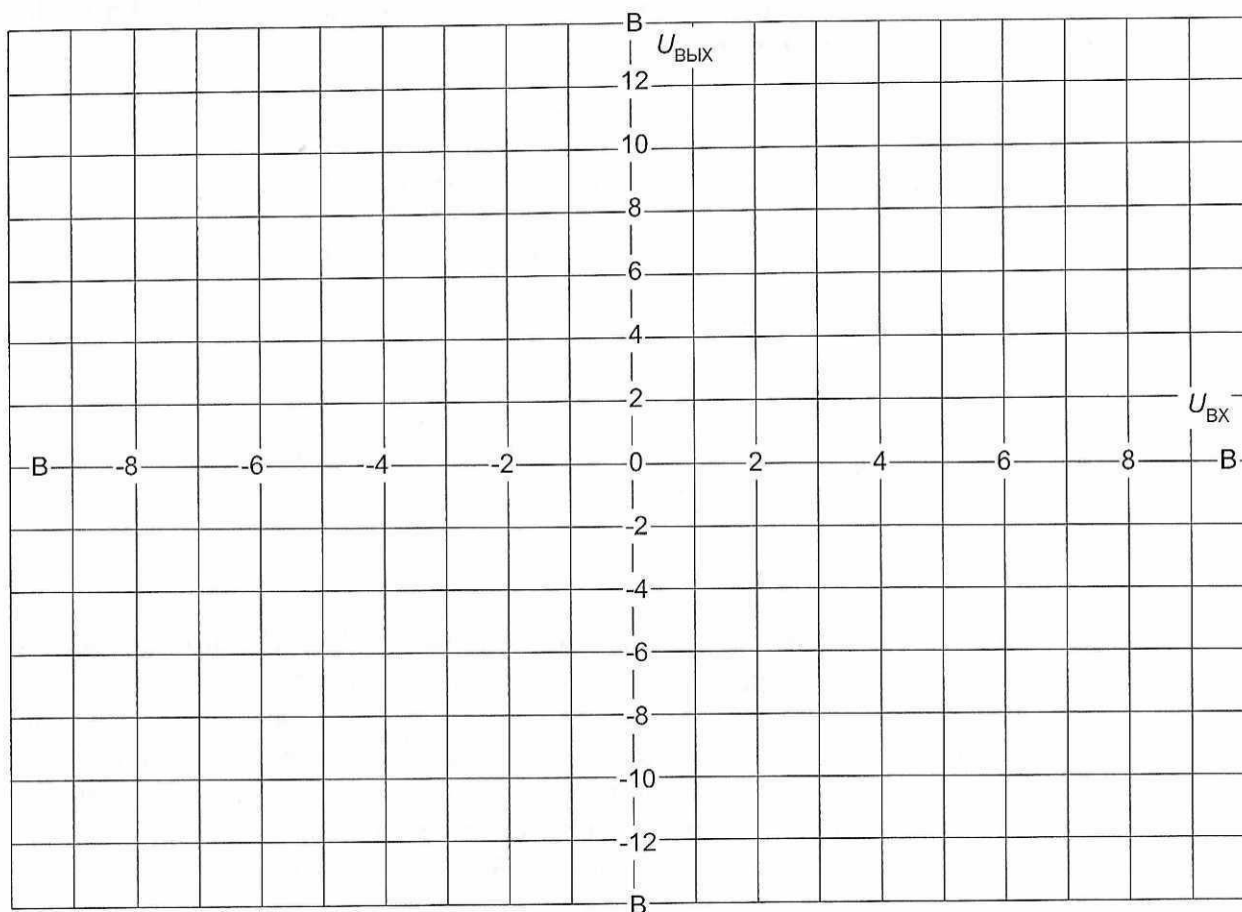


Рис. 3.5.6

Таблица 3.5.2

$U_{ВХ1}=U_{ВХ2}, В$	-12	-10	-7	-4	-2	0	2	4	7	10	12
$U_{ВЫХ}, В$											

Таблица 3.5.3

$U_{ВХ2}, В$	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6
$U_{ВЫХ}, В$ при $U_{ВХ1} = -4 В$							
$U_{ВЫХ}, В$ при $U_{ВХ1} = 0 В$							
$U_{ВЫХ}, В$ при $U_{ВХ1} = 4 В$							

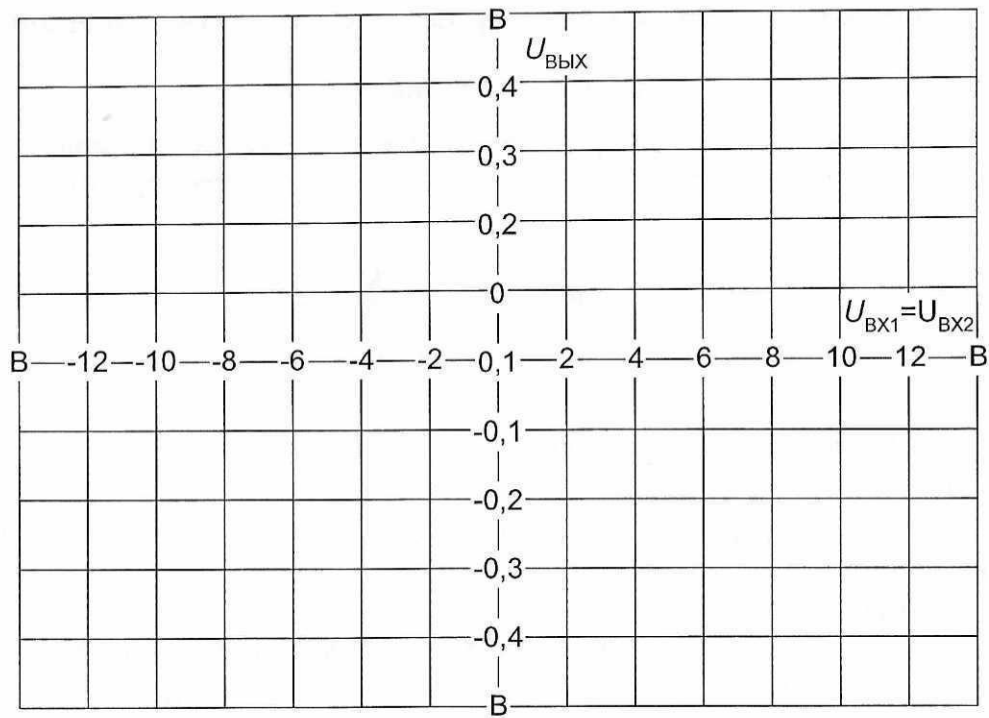


Рис. 3.5.7.

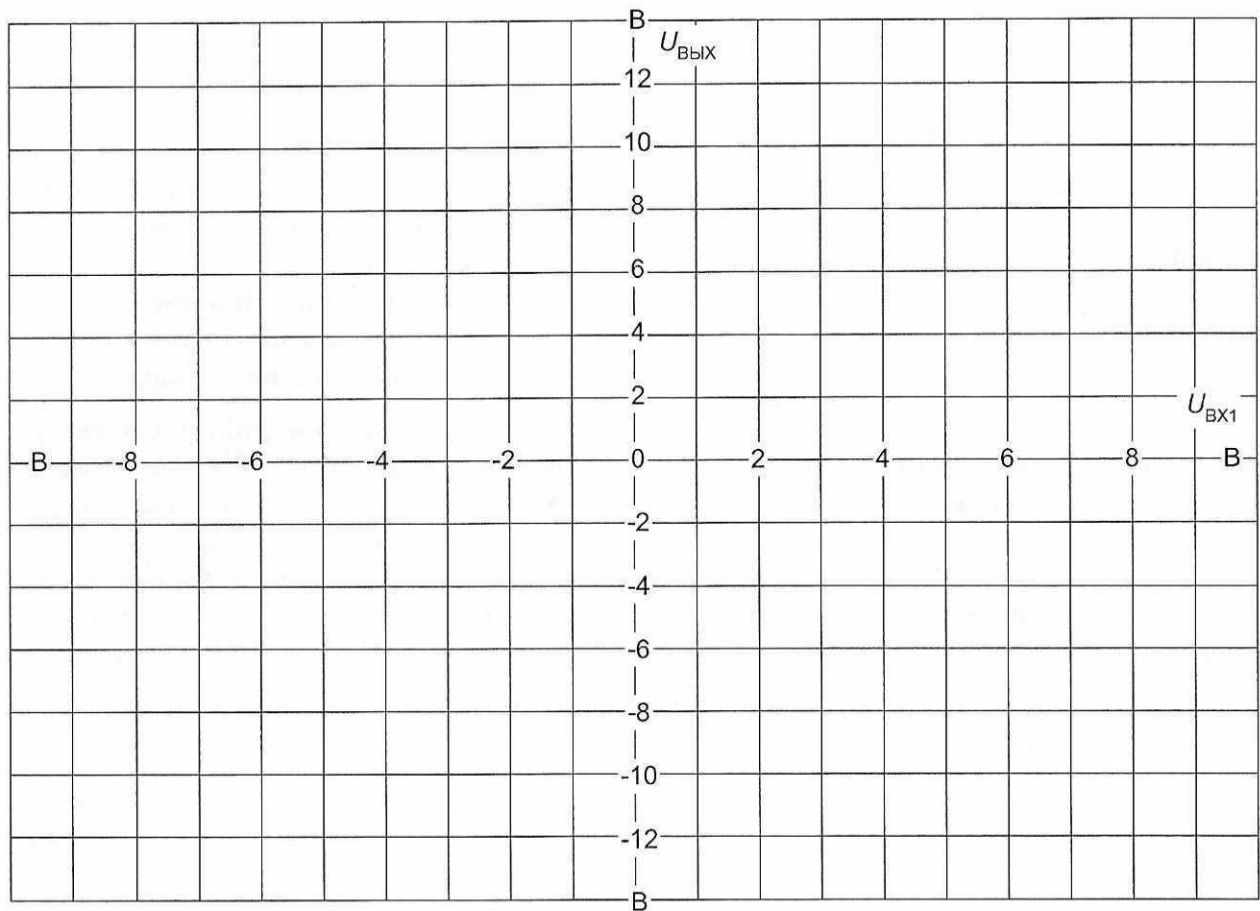


Рис.3.5.8

3.6. Снятие частотных характеристик операционного усилителя

Общие сведения

Операционный усилитель, предназначенный для универсального применения, ведёт себя как аperiodическое звено первого порядка, и его частотная характеристика описывается уравнением

$$K(j\omega) = \frac{K_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{\text{ср}}}} = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \text{ где } K(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ср}}}\right)^2}}, \varphi(\omega) = -\arctg\left(\frac{\omega_{\text{ср}}}{\omega}\right),$$

K_0 – коэффициент усиления при нулевой частоте,

ω – круговая частота,

$\omega_{\text{ср}}$ – частота среза (частота, при которой коэффициент усиления снижается в $\sqrt{2}$ раз),

$K(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика,

$\varphi(\omega)$ – фазо-частотная характеристика.

Круговая частота ω в этих выражениях может быть заменена циклической частотой f .

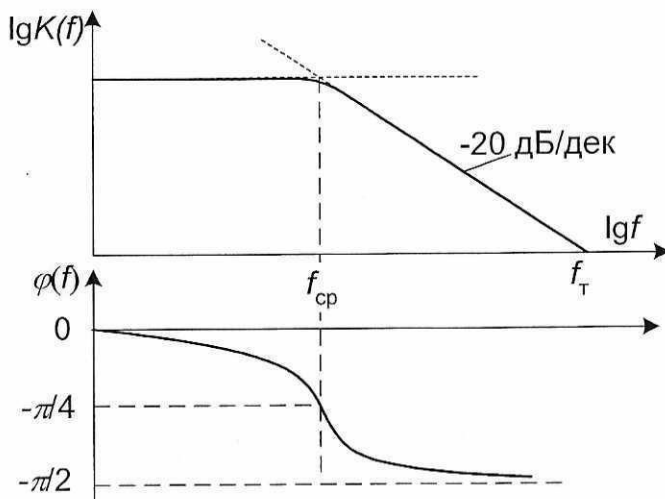


Рис. 3.6.1

Амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики обычно изображают в логарифмическом масштабе по осям f и $K(f)$. Причём, строят не точные характеристики, а их асимптотические приближения (рис.3.6.1). На рисунке $f_{\text{т}}$ – частота единичного усиления, т.е. частота при которой коэффициент усиления усилителя без обратных связей становится равным единице. Частота среза ($f_{\text{ср}}$) зависит от петли отрицательной обратной связи и может быть определена из выражения $f_{\text{т}} = K_0 f_{\text{ср}}$.

В данной работе для измерения амплитуд напряжений и углов сдвига фаз используется осциллограф. Измерять амплитуду удобно с помощью меню **Measure** осциллографа, как указано в его описании. Сдвиг фаз между входным и выходным напряжением измеряется с помощью осциллографа в режиме X – Y. Для перехода в режим XY нажмите функциональную кнопку **Acquire**, чтобы вызвать соответствующее меню в правой части экрана. Затем для параметра меню XY **Format** задается значение **ON**, чтобы включить режим XY или **OFF** для его выключения.

Подключив два синусоидальных сигнала к входам X и Y, мы увидим на экране осциллографа эллипс (рис. 3.6.2). Фазовый сдвиг определяется из выражения:

$$\varphi = \arcsin \frac{B}{A}. \quad (6.1.2)$$

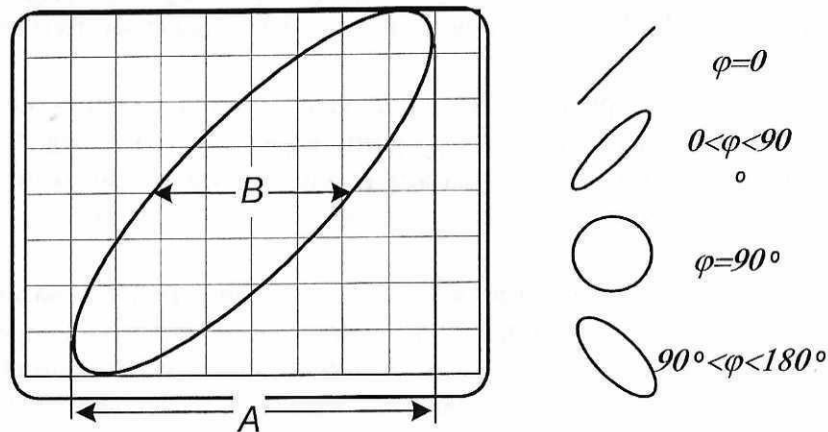


Рис. 3.6.2

Для удобства измерений и большей точности, при каждом измерении эллипс вписывают в квадрат одного и того же размера ручками плавной регулировки масштабов по двум осям.

В правой части рис. 3.6.2 показан вид эллипса в разных квадрантах изменения угла. К сожалению, в режиме X – Y невозможно определить знак угла. Чтобы определить какой сигнал опережает, а какой отстает, нужно переключить осциллограф в режим временной развертки и определить визуально по изображению двух синусоид.

Экспериментальная часть

Задание

Снять амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристику операционного усилителя в схеме инвертирующего усилителя при двух коэффициентах усиления: 200 и 100.

Порядок выполнения эксперимента

- Установите модуль ОАЭ-М8 в наборную панель и соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис.3.6.3) Делитель напряжения на входе цепи (резисторах 10 кОм и 100 Ом) необходим для удобства регулирования малых входных напряжений. Сопротивление обратной связи (R_{OC}) сначала равно 200 кОм, что соответствует коэффициенту усиления 200. *Впоследствии к нему присоедините параллельно ещё 200 кОм, чтобы получить $R_{OC}=100$ кОм.*
- Включите осциллограф, подключите его входы к входу и выходу исследуемого усилителя и выведите 2 луча на середину экрана.
- Включите генератор напряжений и установите ручку переключателя формы сигнала в положение «~». Установите для начала частоту 100 Гц, а амплитуду подрегулируйте так, чтобы выходное напряжение было максимально возможным, но без существенных искажений. Отрегулируйте осциллограф.
- Переключите осциллограф в режим X – Y. *Для перехода в режим XY нажмите функциональную кнопку **Acquire**, чтобы вызвать соответствующее меню в правой части экрана. Затем для параметра меню **XY Format** задается значение **ON**, чтобы включить режим XY или **OFF** для его выключения.*

- Регулировкой усиления по входам впишите эллипс в квадрат размером, например, 80×80 мм. Запишите в табл.3.6.1 входное и выходное напряжения, размеры A и B эллипса на экране осциллографа.
- Прделайте эти измерения при всех частотах, указанных в таблице, сохраняя неизменным входное напряжение, и вписывая эллипс в квадрат при каждой частоте. Размер A при этом изменяться не будет, так как входное напряжение (канал 1) соответствует оси X . Можно и не вписывать эллипс в квадрат, но тогда размер A также будет изменяться.
- Вычислите коэффициенты усиления и фазовые сдвиги, постройте в логарифмических масштабах, как на рис. 3.6.1, графики амплитудно и фазо- частотных характеристик.
- Подсоедините параллельно к R_{oc} ещё 200 кОм (коэффициент усиления будет равен 100) и повторите опыт и построение графиков. Результаты занесите в табл. 3.6.2 и постройте аналогичные графики.

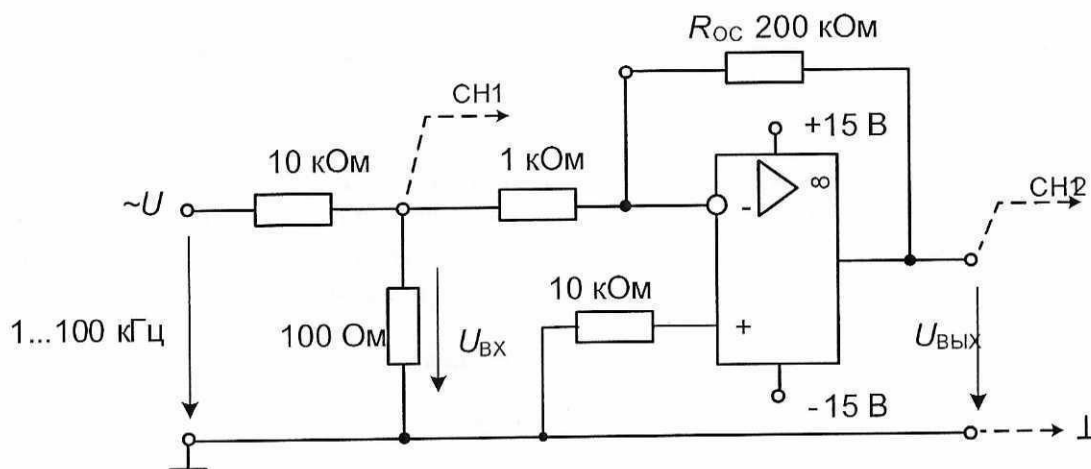


Рис. 3.6.3

Таблица 3.6.1

$R_{ВХ} = 1 \text{ кОм}, R_{ОС} = 200 \text{ кОм}$						
$f, \text{ кГц}$	$U_{ВХ}, \text{ мВ}$	$U_{ВЫХ}, \text{ В}$	K	$A, \text{ мм}$	$B, \text{ мм}$	$\varphi, \text{ град.}$
0.01						
0.1						
0.3						
0.6						
0.8						
1						
1.5						
2						
3						
4						
5						
6						
8						
10						
12						
16						
20						
30						
50						
100						

Таблица 3.6.2

$R_{ВХ} = 1 \text{ кОм}, R_{ОС} = 100 \text{ кОм}$						
$f, \text{ кГц}$	$U_{ВХ}, \text{ мВ}$	$U_{ВЫХ}, \text{ В}$	K	$A, \text{ мм}$	$B, \text{ мм}$	$\varphi, \text{ град.}$
1						
0.01						
0.1						
0.3						
0.6						
0.8						
1						
1.5						
2						
3						
4						
5						
6						
8						
10						
12						
16						
20						
30						
50						
100						

3.7. Исследование схем суммирования, интегрирования и дифференцирования на операционном усилителе.

Общие сведения

Для суммирования нескольких напряжений обычно применяется операционный усилитель в инвертирующем включении (рис. 3.7.1.а). Входные напряжения через добавочные резисторы подаются на инвертирующий вход усилителя. Поскольку потенциал этой точки равен нулю, а ток через сопротивление обратной связи равен сумме токов в добавочных сопротивлениях, получим:

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ОС}}} = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n}\right) \quad \text{или} \quad U_{\text{ВЫХ}} = -\left(\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}U_1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_2}U_2 + \dots + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_n}U_n\right).$$

При $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_{\text{ВХ}}$, получим:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_{\text{ВХ}}}(U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

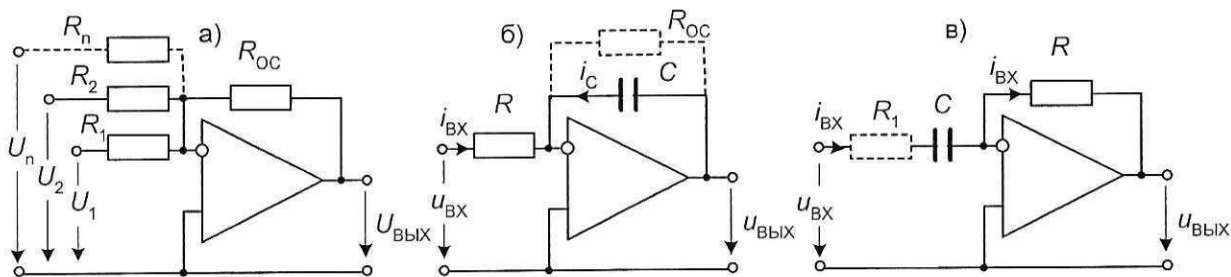


Рис. 3.7.1

Простейшая схема интегрирования представлена на рис. 3.7.1б. В ней мгновенное значение выходного напряжения равно напряжению на конденсаторе:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt + u_c(0).$$

Но $i_c(t) = -i_{\text{ВХ}}(t) = -u_{\text{ВХ}}(t)/R$, поэтому

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = u_{\text{ВЫХ}}(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{ВХ}}(t) dt.$$

Постоянное слагаемое $u_{\text{ВЫХ}}(0)$ определяет начальное условие интегрирования. Для «обнуления» начальных условий конденсатор необходимо перед началом интегрирования разрядить. При отсутствии входного сигнала выходное напряжение может дрейфовать вследствие интегрирования токов утечки. Для уменьшения этого дрейфа параллельно конденсатору включают большое сопротивление $R_{\text{ОС}}$. Но оно ограничивает частотный диапазон интегратора в области низких частот.

Амплитудно-частотная характеристика идеального интегрирующего усилителя описывается выражением:

$$K(\omega) = \frac{1}{\omega RC}.$$

Поменяв местами конденсатор с резистором в схеме интегрирования, получим дифференцирующий усилитель (рис. 3.7.1в). Резистор $R1 \ll R$ вводится для повышения устойчивости усилителя на высоких частотах.

В этой схеме:

$$i_{\text{вх}}(t) = C \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}; \dots u_{\text{вых}}(t) = -Ri_{\text{вх}}(t) = -RC \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}.$$

Выражение амплитудно-частотной характеристики дифференцирующего усилителя имеет вид:

$$K(\omega) = \omega RC.$$

- При снятии частотных характеристик в данной работе амплитуды входного и выходного напряжения измеряются с помощью осциллографа.

Примечание: Измерять амплитуду удобно с помощью меню **Measure** осциллографа, как указано в его описании.

Экспериментальная часть

Задание

Исследовать свойства суммирующего усилителя при постоянных входных напряжениях. Пронаблюдать с помощью осциллографа интегрирование и дифференцирование сигналов различной формы. Снять амплитудно-частотные характеристики интегрирующего и дифференцирующего усилителей.

Порядок выполнения экспериментов

- Установите модуль ОАЭ-М10 в наборную панель и соберите цепь суммирующего усилителя (рис. 3.7.2).
- Включите блок генераторов напряжений, включите мультиметры и установите потенциометром напряжение $U_{\text{ВХ2}} = 2 \text{ В}$.
- Изменяя напряжение $U_{\text{ВХ1}}$ от -10 В до $+10 \text{ В}$, снимите зависимость $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ1}})$ (таблица 3.7.1) и постройте график (рис. 3.7.3).
- Снимите ту же зависимость при $U_{\text{ВХ2}} = -2 \text{ В}$ и также постройте график.
- Замените сопротивление обратной связи 10 кОм сопротивлением 22 кОм и снова снимите зависимость $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ1}})$ при $U_{\text{ВХ2}} = 2 \text{ В}$ и при $U_{\text{ВХ2}} = -2 \text{ В}$. На том же рисунке постройте графики.

Таблица 3.7.1

$U_{ВХ1}, В$	$U_{ВЫХ}, В$			
	$U_{ВХ2}=+2 В,$ $R_{OC}=10 кОм$	$U_{ВХ2}=-2 В,$ $R_{OC}=10 кОм$	$U_{ВХ2}=+2 В,$ $R_{OC}=22 кОм$	$U_{ВХ2}=-2 В,$ $R_{OC}=22 кОм$
-10				
-8				
-6				
-4				
-2				
0				
2				
4				
6				
8				
10				

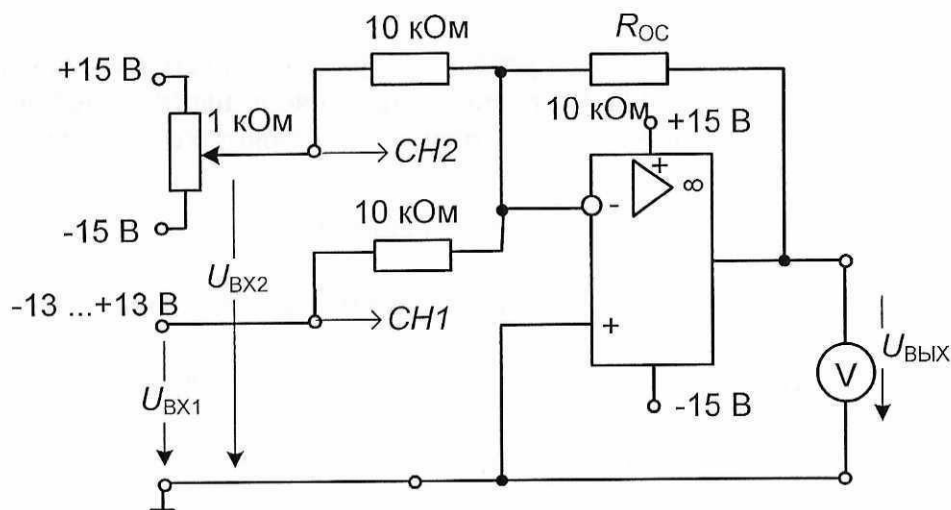


Рис. 3.7.2

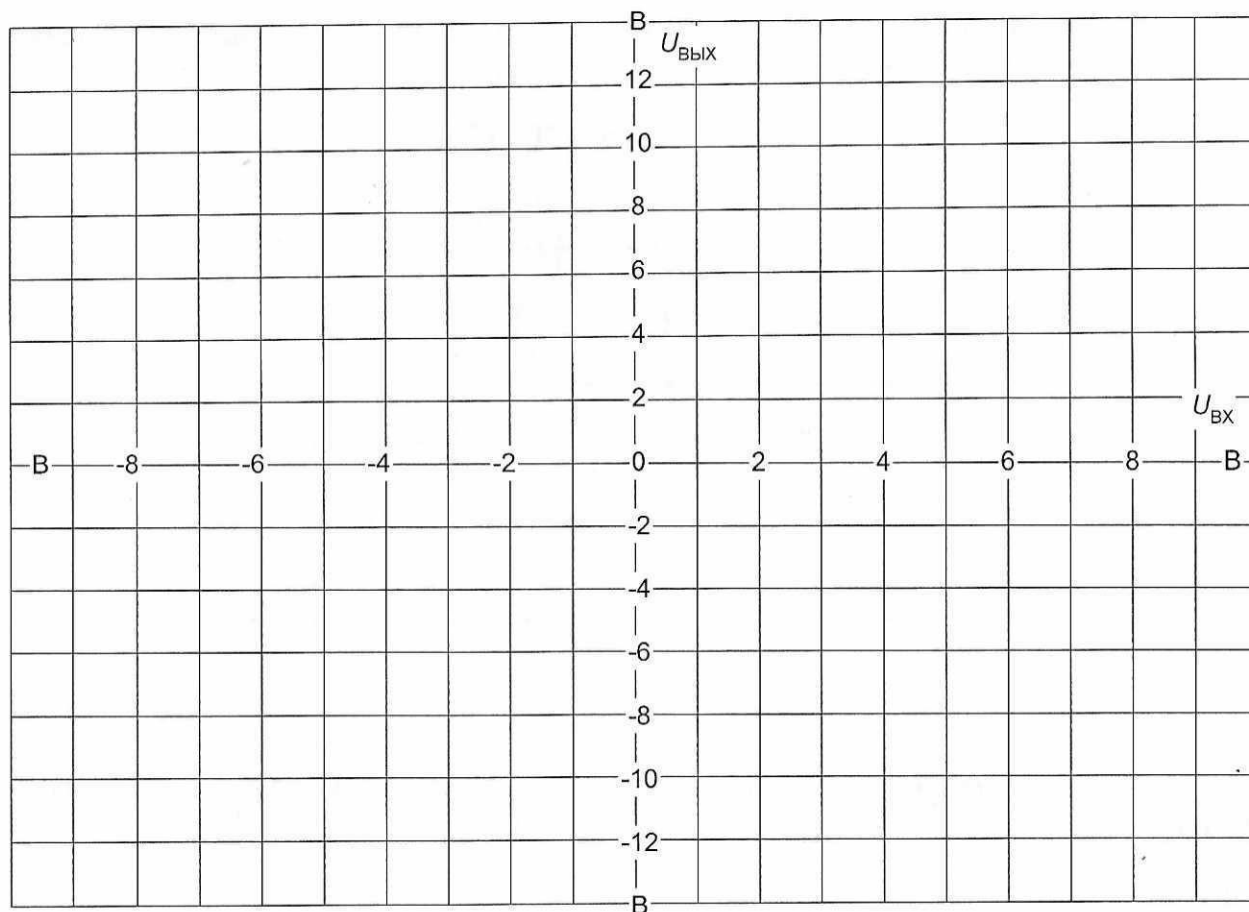


Рис. 3.7.3

- Соберите цепь интегрирующего усилителя (рис. 3.7.4). Включите осциллограф. Мультиметры здесь не понадобятся, так как они не предназначены для измерения при высоких частотах. Амплитуды напряжений в этом опыте измеряются осциллографом. Осциллограмму напряжения на выходе выводите в режиме инвертирования.

Примечание: Измерять амплитуду удобно с помощью меню **Measure** осциллографа, как указано в его описании.

- Ручку регулирования амплитуды напряжения поверните влево до упора (нулевая амплитуда) и включите генератор. Установите форму сигнала «~», частоту 1 кГц. Включите осциллограф. Настройте осциллограф для наблюдения входного и выходного напряжений.
- Регулятором амплитуды установите на входе синусоидальное напряжение, и убедитесь, что происходит интегрирование входного сигнала (напряжение на выходе отстает от напряжения на входе на 90°). Переведите переключатель в положение « \wedge », затем « \sqcup » и по форме выходного сигнала убедитесь, что происходит интегрирование. (Если наблюдается ограничение вершин выходного сигнала, то уменьшите входное напряжение).
- Снова подайте на вход синусоидальное напряжение максимальной амплитуды, при которой ещё нет ограничения выходного сигнала и, увеличивая частоту согласно табл.3.7.2, снимите зависимость выходного напряжения от частоты.

- Вычислите коэффициент передачи интегрирующего усилителя $K = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ и на рис. 3.7.6 в логарифмическом масштабе постройте график.

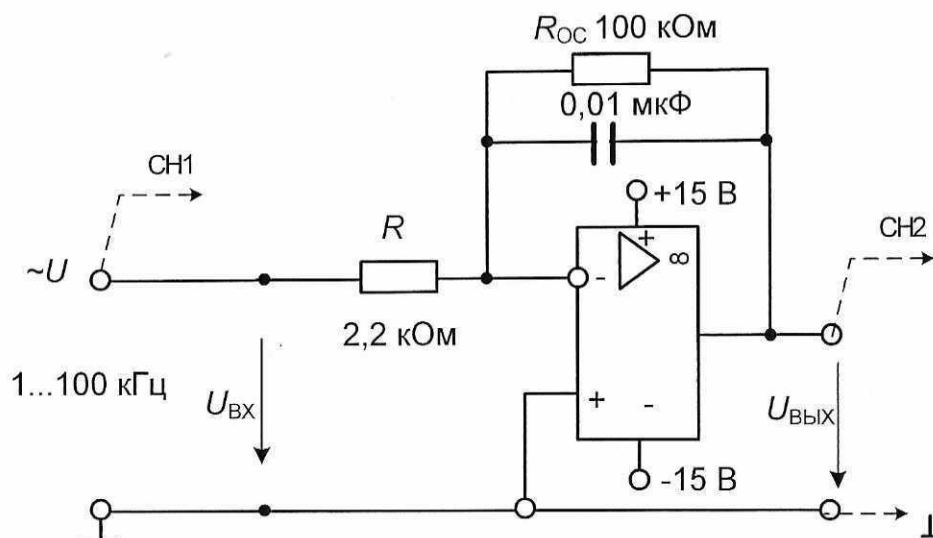


Рис. 3.7.4

Таблица 3.7.2

f , кГц	Интегрирующий усилитель			Дифференцирующий усилитель		
	$U_{\text{ВХ}}$, мВ	$U_{\text{ВЫХ}}$, В	K	$U_{\text{ВХ}}$, мВ	$U_{\text{ВЫХ}}$, В	K
1						
1,5						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
15						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						

- Соберите цепь дифференцирующего усилителя (рис. 3.7.5). Включите осциллограф. Амплитуды напряжений в этом опыте, также как и в предыдущем, измеряются осциллографом с инвертированием выходного сигнала.
- Ручку регулирования амплитуды напряжения поверните влево до упора (нулевая амплитуда) и включите генератор. Установите форму сигнала «~», частоту 1 кГц. Включите осциллограф. Настройте осциллограф для наблюдения входного и выходного напряжений.

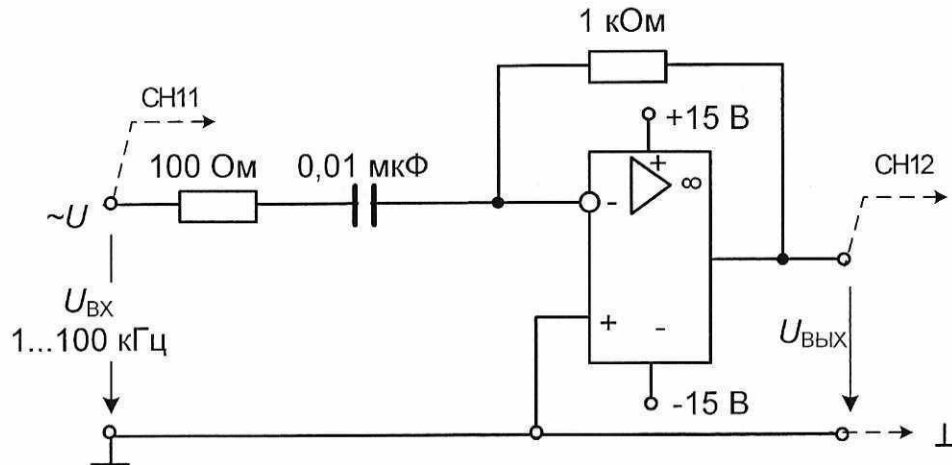


Рис.3.7.5

- Регулятором амплитуды установите на входе синусоидальное напряжение, и убедитесь, что происходит дифференцирование входного сигнала (напряжение на выходе опережает входное напряжение на 90°). Переведите переключатель в положение « \wedge », затем « \sqcup » и по форме выходного сигнала убедитесь, что происходит дифференцирование. (Если наблюдается ограничение вершин выходного сигнала, то уменьшите входное напряжение).
- Снова подайте на вход синусоидальное напряжение максимальной амплитуды, при которой ещё нет ограничения выходного сигнала. Установите частоту 100 кГц и, **уменьшая** частоту согласно табл.3.7.2, снимите зависимость выходного напряжения от частоты. При уменьшении частоты выходное напряжение уменьшается, а при увеличении увеличивается и может наступить ограничение по напряжению питания.
- Вычислите коэффициент передачи дифференцирующего усилителя $K = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ и на рис. 3.7.6 постройте график.

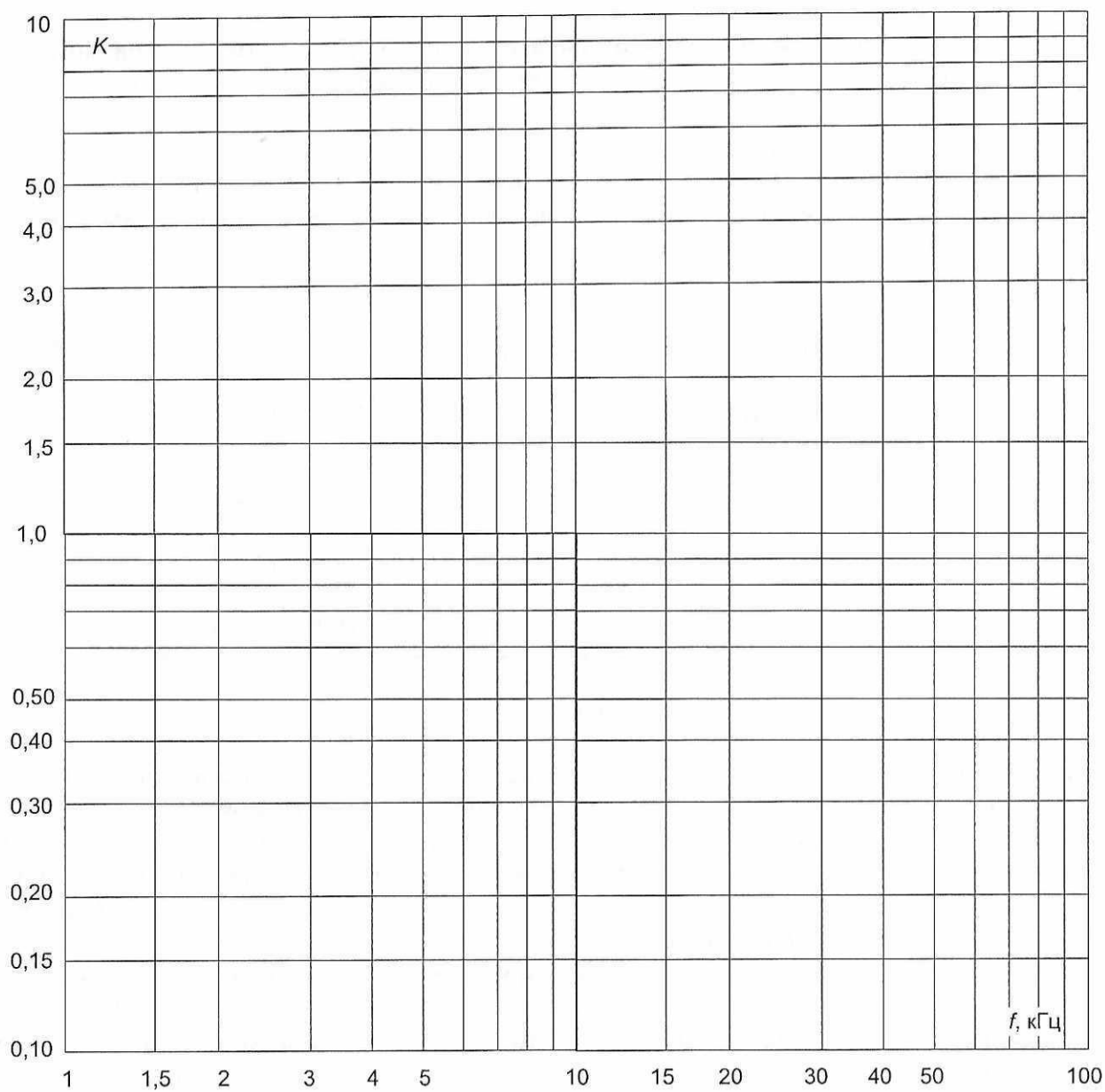


Рис.3.7.6