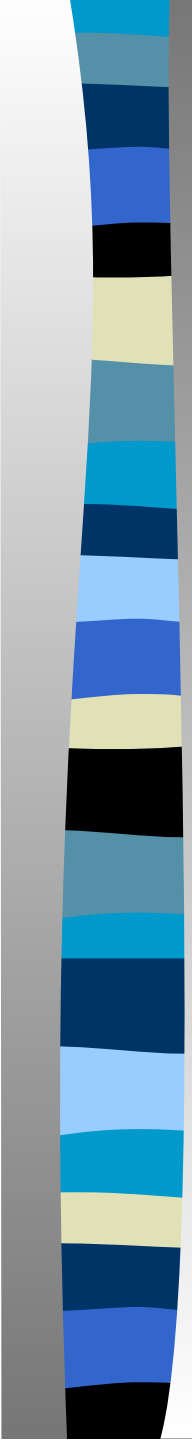


Амплитудные
фазочастотные
зависимости
биполярных
транзисторов



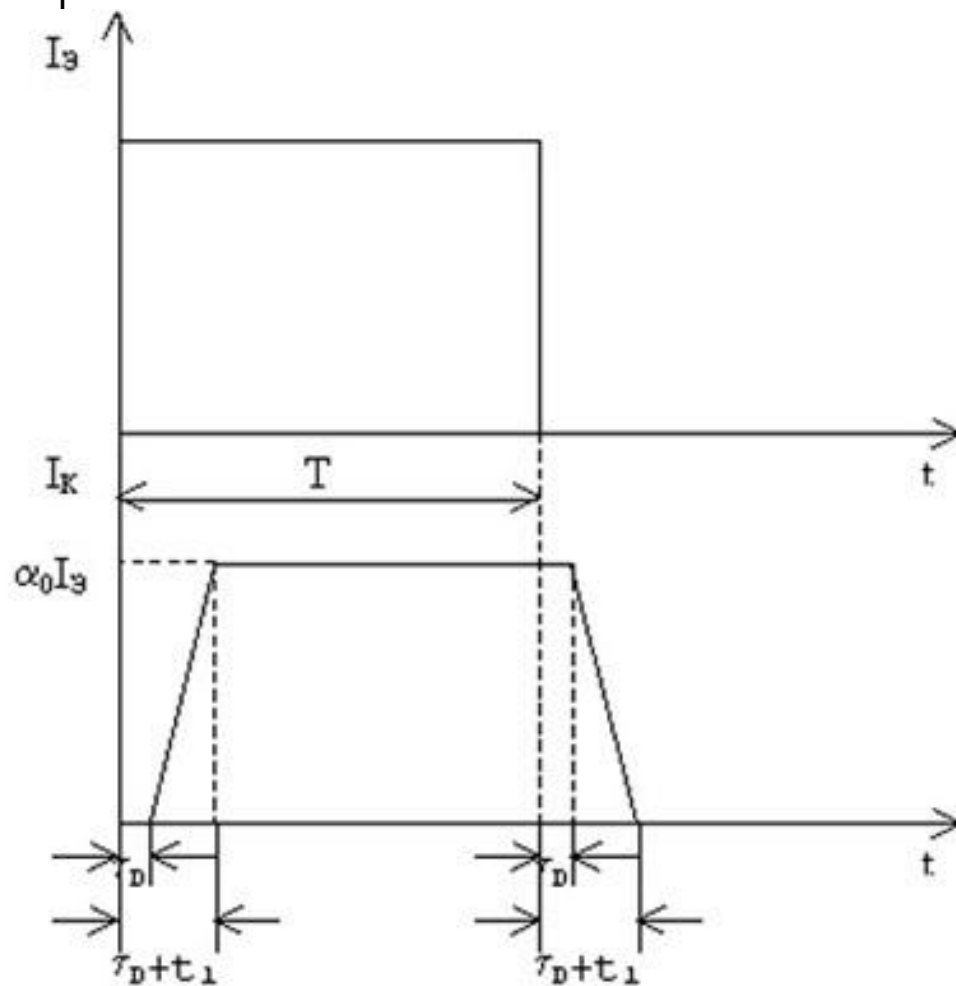
Процесс распространения инжектированных в базу неосновных носителей заряда от эмиттерного до коллекторного перехода идет диффузионным путем. Этот процесс достаточно медленный, и инжектированные из эмиттера носители достигнут коллектора не ранее, чем за время диффузии носителей через базу, определяемое $\tau_D = W \cdot L_p / D$

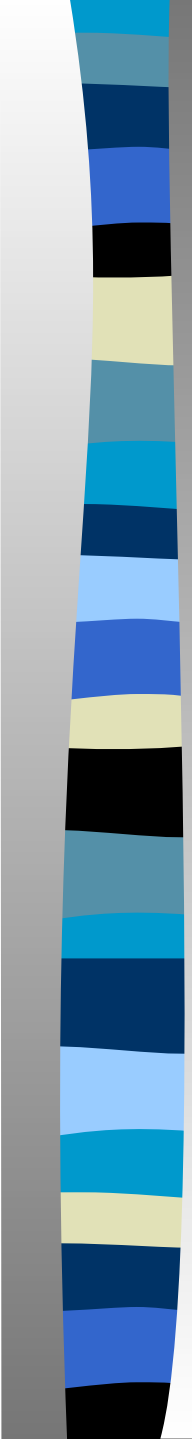
Такое запаздывание приведет к сдвигу фаз между током в эмиттерной и коллекторной цепях.

Биполярный транзистор в схеме с общей базой

Пусть в эмиттерной цепи от генератора тока в момент времени $t = 0$ подали импульс тока длительностью T , большей, чем время диффузии τ_D . Ток в коллекторной цепи появится только через время τ_D , причем вследствие распределения по скоростям в процессе диффузионного переноса фронт импульса будет размываться в пределах некоторого временного интервала t_1 . Через время $\tau_D + t_1$ в коллекторной цепи установится ток, равный $\alpha_0 I_э$. Через время $t = T$, когда импульс тока в эмиттерной цепи закончится, в коллекторной цепи будет продолжать течь ток $\alpha_0 I_э$ до времени $T + \tau_D$.

Затем, также вследствие размытия фронта импульса, коллекторный ток будет спадать до нуля в течение времени t_1 .

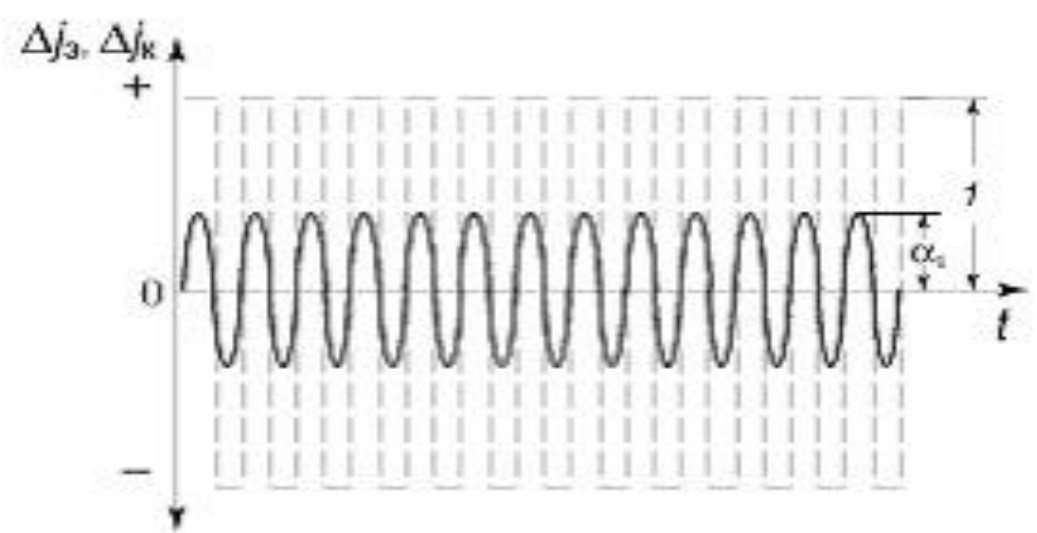
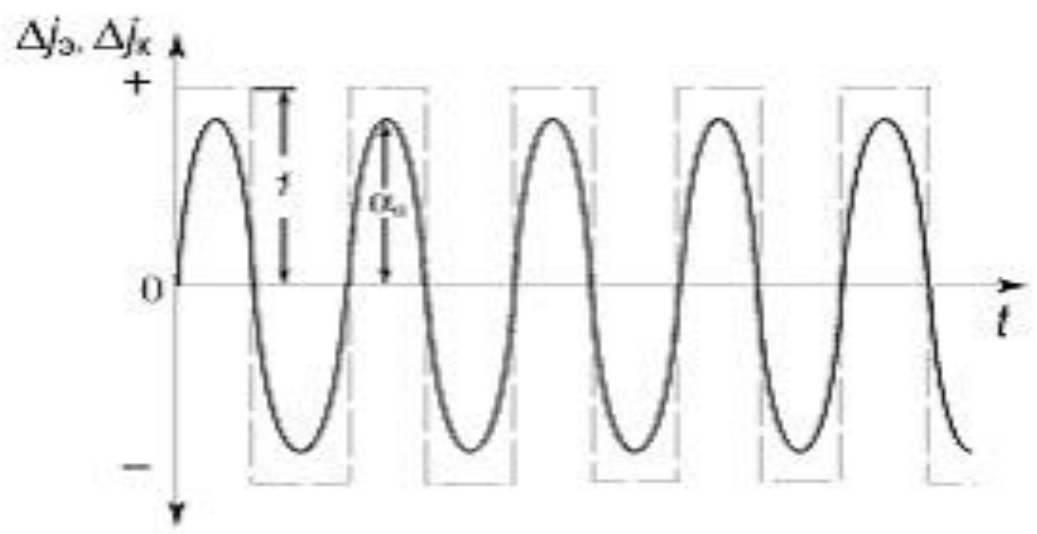
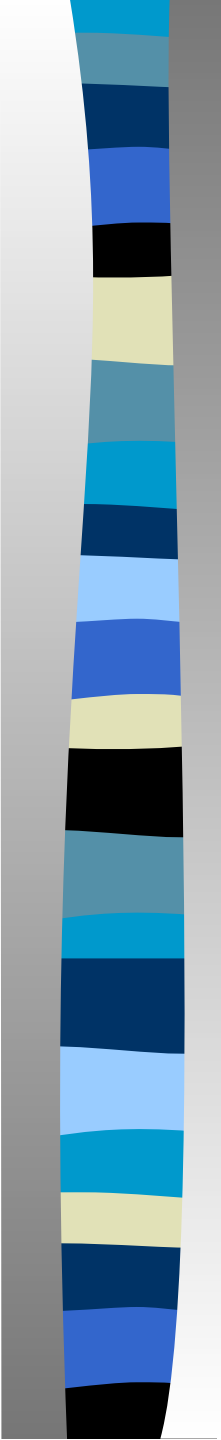


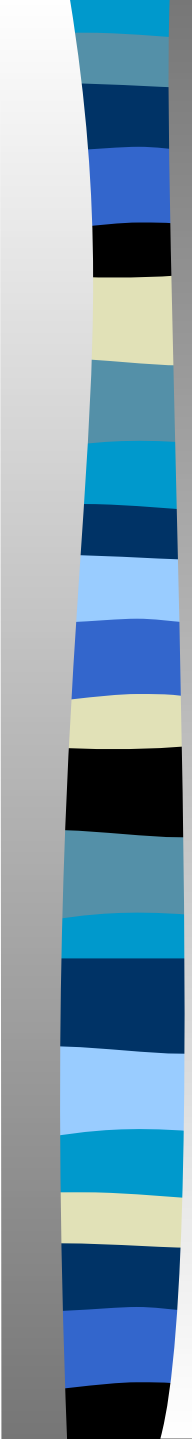


Таким образом, при больших длительностях импульсов эмиттерного тока частота сигналов в коллекторной цепи останется неизменной, амплитуда коллекторного тока составит $I_K = \alpha I_{\text{Э}}$ и будет наблюдаться сдвиг фаз ϕ между эмиттерным и коллекторным токами. В общем случае ϕ определяется как

$$\phi = \arctg(\tau_D \omega / 2\pi)$$

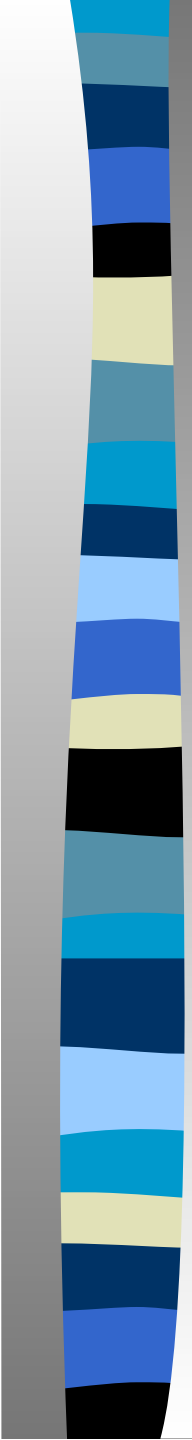
Будем уменьшать период эмиттерного тока. При некоторой длительности эмиттерного импульса «плоского» участка на коллекторном токе $I_K = \alpha I_{\text{Э}}$ уже не будет.





При дальнейшем уменьшении периода эмиттерного импульса T начнет уменьшаться амплитудное значение коллекторного тока, поскольку за это время инжектированные носители не успевают дойти до коллекторного перехода. Это соответствует возникновению частотной зависимости амплитудного значения коэффициента передачи $\alpha(\omega)$ – или амплитудной фазо-частотной зависимости.

Величина $\alpha(\omega)$ – комплексная и определяется модулем и фазой ϕ_α . Зависимость $\alpha(\omega)$ возникает вследствие инерционности переноса носителей от эмиттера к коллектору.



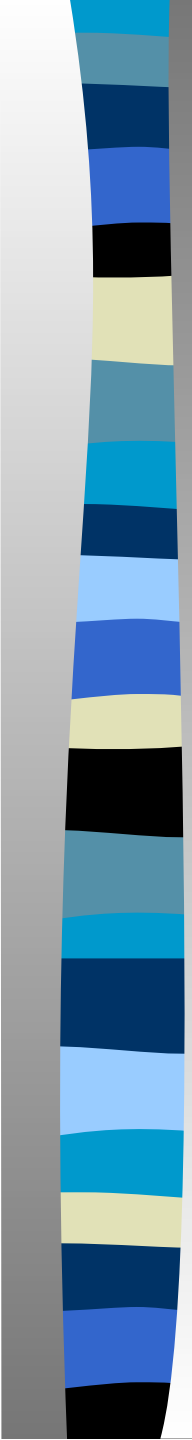
Чтобы охарактеризовать $|\alpha|$ и ϕ_α вводится понятие предельной (граничной) частоты усиления по току ω_α . Предельная частота – это частота, при которой модуль коэффициента передачи уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со статическим значением α_0 .

$$\frac{|\alpha(\omega_\alpha)|}{\alpha_0} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Поскольку коэффициент передачи α определяется произведением коэффициентов инжекции γ и переноса χ

$$\alpha = \gamma * \chi,$$

то основное значение в зависимости $\alpha(\omega)$ играет зависимость коэффициента переноса от частоты $\chi(\omega)$.

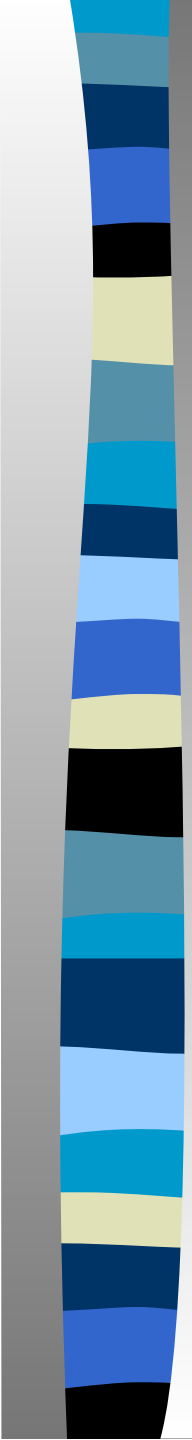


Для определения частотной зависимости коэффициента переноса $\chi(\omega)$ нужно решить уравнение непрерывности. В комплексной форме выражение для этой зависимости, может быть записано так

$$\chi(\omega) = \frac{i_k}{i_{\text{эр}}} = \frac{1}{\operatorname{ch} \left[(1 \pm i\omega L_p)^{\frac{1}{2}} \frac{W}{L_p} \right]}.$$

Используя это соотношение, можно получить выражение граничной частоты через конструктивно-технические параметры БТ:

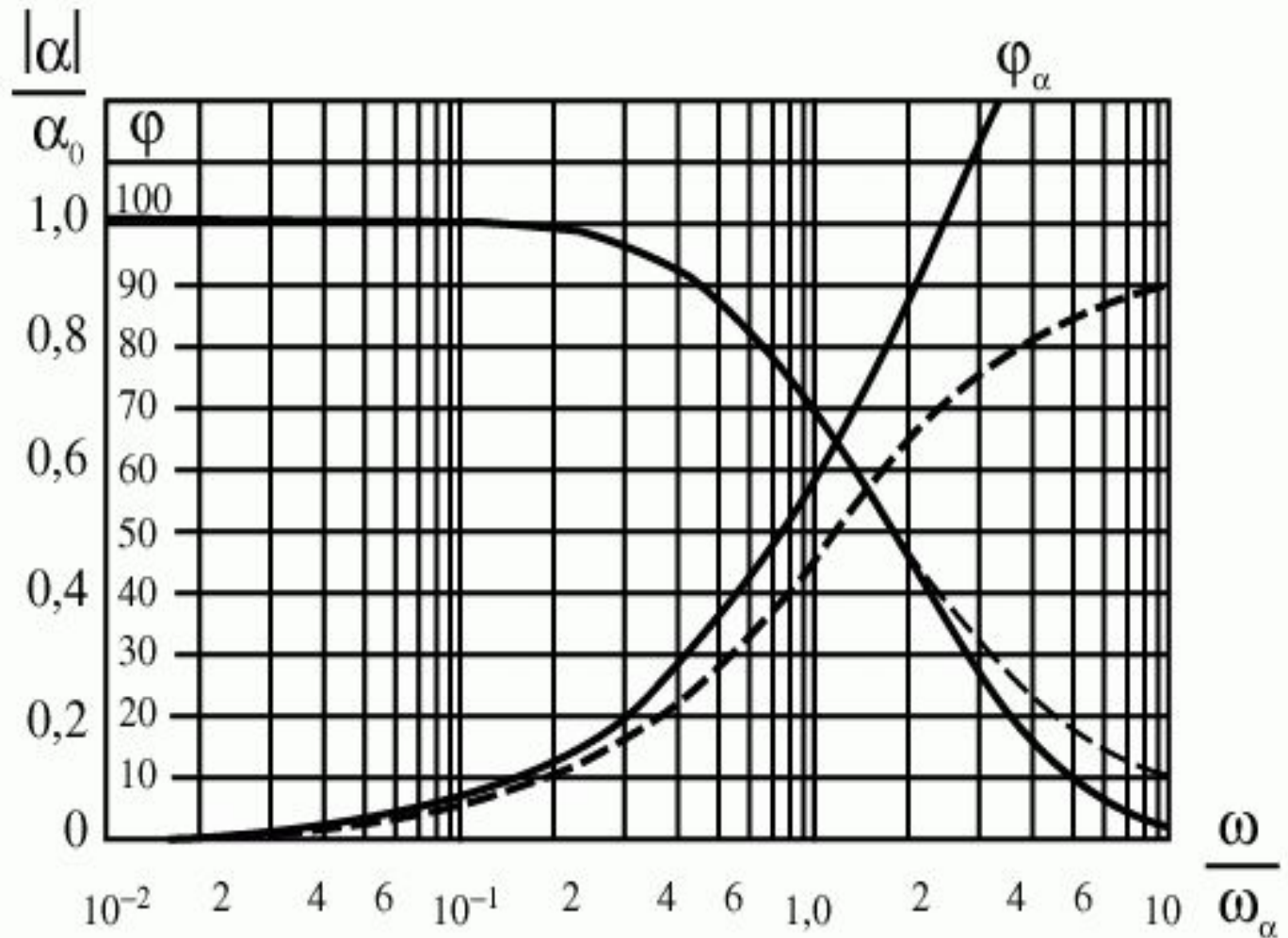
$$\omega_{\alpha} = \frac{\sqrt{2} \cdot L_p^2}{\tau_p W^2}$$



С учетом этого выражения для граничной частоты ω_α соотношение для комплексного значения коэффициента переноса преобразуется к следующему виду:

$$\kappa(\omega) = \kappa_0 - j \frac{\omega}{\omega_\alpha} \cdot G(\alpha).$$

Графическая зависимость модуля коэффициента переноса и угла фазового сдвига приведена на следующем рисунке



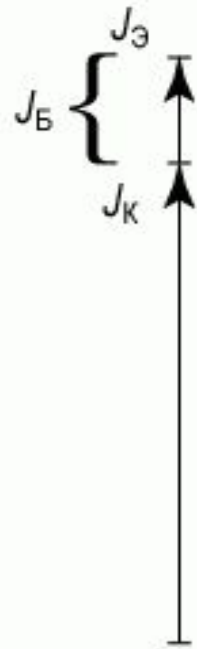


Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером

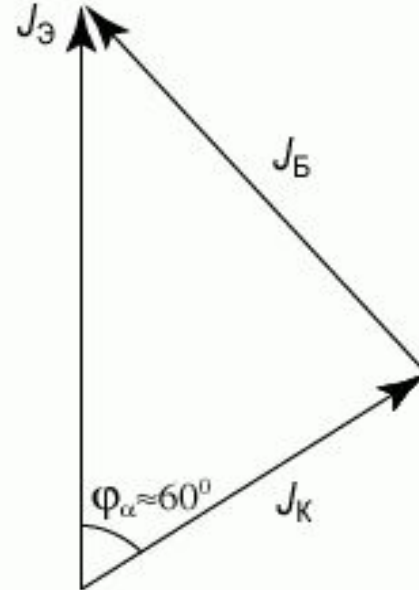
Коэффициент передачи эмиттерного тока α и коэффициент передачи базового тока β связаны соотношением:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Для нахождения связей частотных параметров БТ в схеме с общей базой и в схеме с общим эмиттером рассмотрим векторные диаграммы для токов.

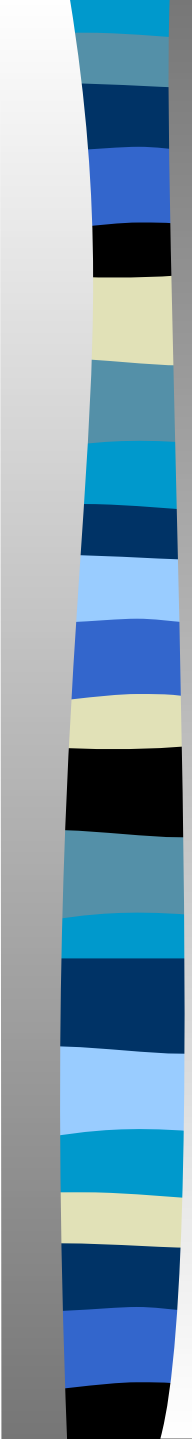


(а)

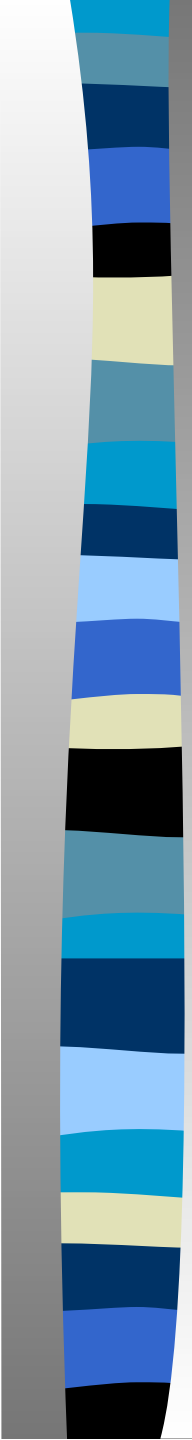


(б)

При малой частоте $\omega \ll \omega_{\alpha}$ фазы эмиттерного $I_{\text{э}}$, коллекторного $I_{\text{к}}$ и базового $I_{\text{б}}$ токов, как видно из рисунка (а), совпадают и величина базового тока $I_{\text{б}}$ равна разности $I_{\text{э}} - I_{\text{к}}$.



При значении частоты эмиттерного тока, равной граничной частоте $\omega = \omega_\alpha$, в схеме с общей базой коллекторный ток в $2^{1/2}$ раз меньше эмиттерного тока. На векторной диаграмме (б) видно, что при фазовом сдвиге $= 60^\circ$ величина базового тока I_δ также равна разности $I_\varepsilon - I_\kappa$, но в этом случае речь идет о векторной разности. Модуль же значения базового тока I_δ при $\omega = \omega_\alpha$ значительно больше, чем при $\omega = 0$. При этом видно, что величина коэффициента передачи базового тока $\beta = I_\kappa / I_\delta$ при $\omega = 0$ значительно больше, чем при $\omega = \omega_\alpha$. Если модуль коэффициента передачи эмиттерного тока $\alpha(\omega)$ уменьшился при этом в $2^{1/2}$ раз, то модуль коэффициента усиления базового тока $\beta(\omega)$ уменьшился существенно больше.



Определим предельную частоту ω усиления по току биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером как частоту ω_β , при которой модуль коэффициента усиления $\beta(\omega_\beta)$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со статическим значением β_0

$$\frac{|\beta(\omega_\beta)|}{\beta_0} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Найдем соотношение между предельной частотой для схемы с общим эмиттером $\omega_\beta = \beta(\omega) / \beta_0 = 1 / (2^{1/2})$ и предельной частотой для схемы с общей базой $\omega_\alpha = \alpha(\omega) / \alpha_0 = 1 / (2^{1/2})$. Проанализировав векторную диаграмму токов при условии, что $\omega = \omega_\beta$, получим:

$$\text{tg}\varphi \approx \varphi = \frac{\omega_\beta}{\omega_\alpha}$$



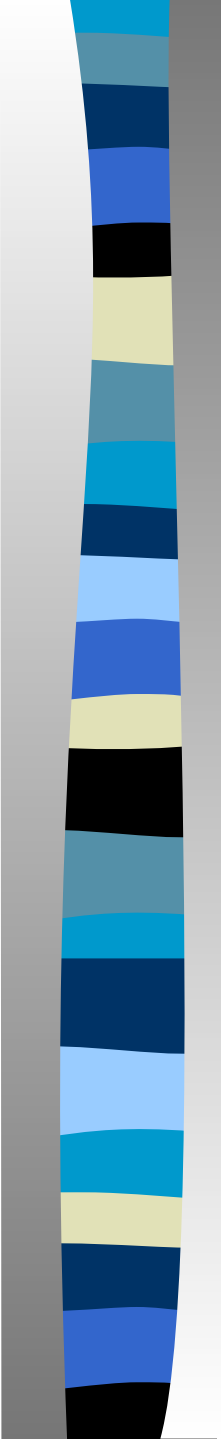
Частоты ω_α и ω_β могут быть выражены через физические параметры транзистора:

$$\omega_\alpha = \frac{2,43 \cdot L^2}{\tau_p W^2} = \frac{2,43 \cdot D \tau_p}{\tau_p D \tau_D} = \frac{2,43}{\tau_D}.$$

Величина $\omega_\beta \approx \omega_\alpha / \beta$, а значение β равно $\beta = (1/2) (L/W)^2$, тогда

$$\omega_\beta = \frac{2,43 \cdot L^2}{\tau_p W^2} = \frac{2,43 \cdot D \tau_p}{\tau_p D \tau_{эф}} \frac{1}{2} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \approx \frac{1}{\tau_p}.$$

Для описания частотной зависимости $\beta(\omega)$ подставим в выражение для β частотно-зависимый коэффициент переноса $\alpha(\omega)$.
Получим:


$$\beta(\omega) = \frac{\alpha(\omega)}{1 - \alpha(\omega)} = \frac{\alpha_0 e^{-0.2i \frac{\omega}{\omega_\alpha}}}{1 + i \frac{\omega}{\omega_\alpha}} \frac{1}{1 - \frac{\alpha_0 e^{-0.2i \frac{\omega}{\omega_\alpha}}}{1 + i \frac{\omega}{\omega_\alpha}}}$$

Частотная зависимость модуля коэффициентов передачи по току в схеме ОБ - α и ОЭ - β :

