

Лекция 15

Транзисторни усилватели

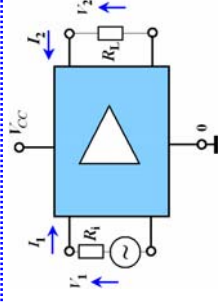
Съдържание на Лекция 15

15. Усилватели с биполярни и полеви транзистори.

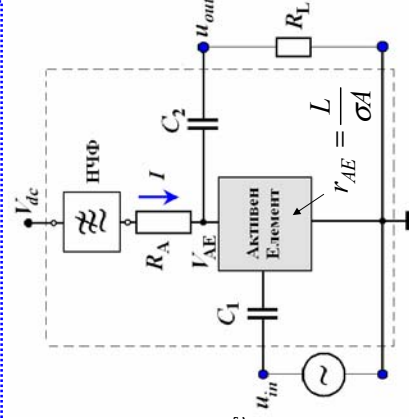
- 15.1 Общи принципи на проектирането на електронни усилватели с биполярни и полеви транзистори. Осигуряване на работната точка. Еквивалентна схема на усилвателя и неговия товар. Общ израз за коефициента на усилване.
- 15.2 Осигуряване на работната точка на усилвател с биполярен и полеви транзистор. Характеристики и обща схема. Предназначение на елементите в схемата.
- 15.3 Влияние на товара на усилвателя в различните части на честотната му лента.

Лекция 15

15.1 Общи принципи на проектирането на електронни усилватели с биполярни и полеви транзистори. Осигуряване на работната им точка. Еквивалентна схема на усилвателя и неговия товар. Общ израз на коефициента на усилване.

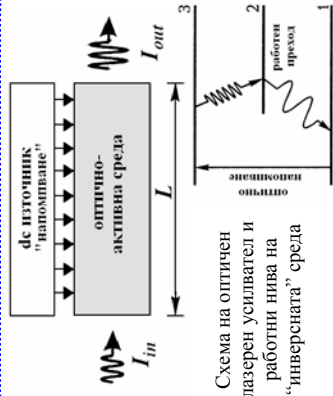


Принципна схема на резистивен усилвател

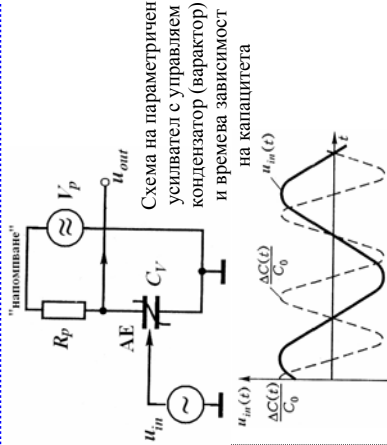


Както вече показвахме, усилвателят обикновено е четириполюсник, който на изхода си увеличава мощността на постъпващ на входа сигнал за сметка на източниците на захранване. Има и двуполносни усилватели (т. нар. отразителни усилватели), но тях няма да разглеждаме тук. Основна част на усилвателите е нелинейният *активен елемент* (АЕ), директно свързан с процеса на усилване. Той може да е от резистивен или реактивен тип. На фигурата горе е показана принципна схема на *усилвател с резистивен елемент* L , и е даден общ израз за неговото нелинейно съпротивление r_{AE} , зависещо от дължината L , площта на напречното сечение A и проводимостта σ . Усилваният сигнал изменя или σ (при ВJF, MOSFET, електронните лампи и др.) или A (при JFET, MESFET). За да работи в даден режим, резистивният АЕ трябва да се "захрани" с подходящо dc напрежение. Такава роля изпълнява dc източника V_{dc} и съпротивлението R_A (подробности на следващите страници).

Принципни схеми на оптичен и параметричен усилвател



В оптичните усилватели роля на АЕ играе активна среда – твърди, течни или газообразни материали, в които е възможно да се поддържа т.нар. инверсна населеност чрез оптично, газоразрядно или токово (dc) напояване. При тях под действие на входяния сигнал се предизвикват принудени преходи на атоми или молекули от квази-стабилно възбудено състояние в стационарно и така се реализира процес на увеличаване на интензивността в зависимост от разстоянието.

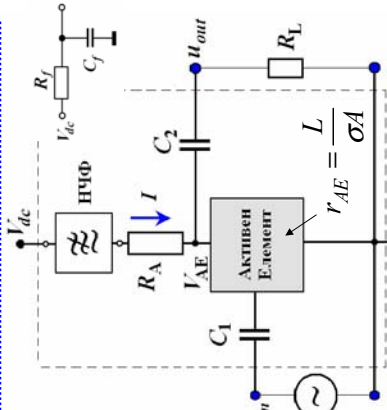


При параметричните усилватели най-често се използва реактивен елемент – управляем кондензатор на варакторен диод при обратен свързване на p-n прехода. Под действие на входяния сигнал и на сигнал от "напомпващ" генератор кондензаторът се изменя така, че се получава резултатен усилен сигнал. Има и други параметрични елементи – напр. среди с променлива диелектрична проникваемост.

Две схеми в усилвателя (dc и RF)

Отново се връщаме на усилвателя от резистивен тип. По същество, в усилвателите, както и в други активни устройства, съществуват две "вилетени" една в друга схеми – *постоянно-токовата* (dc) и *високофреkwентната* (RF). Първата определя де-режима на на усилвателя – осигуряването на положението на т. А върху товарната права в изходната характеристика, а втората – подаването на входяния сигнал, усилването му и снемането на изходния сигнал. Двете схеми работят съвместно, но не трябва да си влияят една на друга. Някои от елементите са общи и за двете схеми, но всяка схема си има и свои собствени елементи.

Де-схемата включва източникът на dc напрежение V_{dc} , активният елемент с динамично съпротивление r_{AE} и съпротивлението R_A , осигуряващо работния режим. RF-схемата включва източникът на входния променливотоков сигнал (и неговото вътрешно съпротивление R_i , R_A , активният елемент r_{AE} , съпротивлението R_A и товарното съпротивление R_L за изходящия сигнал. Накрая, в общата схема има и елементи, които осигуряват ефективно отделяне на двете схеми. На първо място това са двата блокировъчни кондензатора $C_{1,2}$, които имат безкрайно-голямо съпротивление по постоянен ток, но достатъчно ниско съпротивление [юC_{1,2}] за променлив сигнал. Друга част е нискочестотният филтър с елементи R_f/C_f , чиято цел е да подаде dc потенциала към АЕ, но да не допуска RF сигнала към де-източника.



Общ израз на усилването на електронен усилвател

Разглеждаме схемата от предната страница. Напрежението върху активния елемент е

$$V_{AE} = V_{dc} - IR_A \quad \text{или още} \quad \Delta V_{AE} = -\Delta IR_A = \Delta u_{out}$$

Ако отчетем, че величините r_{dc} и R_A са постоянни, следва че изменението на изходното напрежение са в противофаза на входното (т.е. *усилвателят е инвертиращ*).

$$\Delta u_{in} > 0 \rightarrow \Delta I > 0 \rightarrow \Delta IR_A \rightarrow \Delta V_{AE} < 0 \rightarrow \Delta u_{out} < 0$$

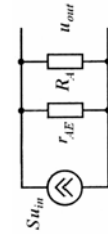
Понеже токът през активния елемент е функция на входното и изходното напрежение, то могат да се запишат следните диференциални зависимости:

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial u_{in}} \Delta u_{in} + \frac{\partial I}{\partial u_{out}} \Delta u_{out} = S \Delta u_{in} + \frac{1}{r_{AE}} \Delta u_{out} = -\frac{\Delta u_{out}}{R_A}$$

Където S е стърмяността на активния елемент в A/V или 1/Ω. Така можем да получим общ израз за коефициента на усилване на резистивния усилвател.

$$k_u = \frac{\Delta u_{out}}{\Delta u_{in}} = -S \frac{R_A r_{AE}}{R_A + r_{AE}} \approx -S_{eq} R_A \quad \text{понеже} \quad r_{AE} = \frac{L}{\sigma A} \gg R_A, R_L$$

В общия случай:



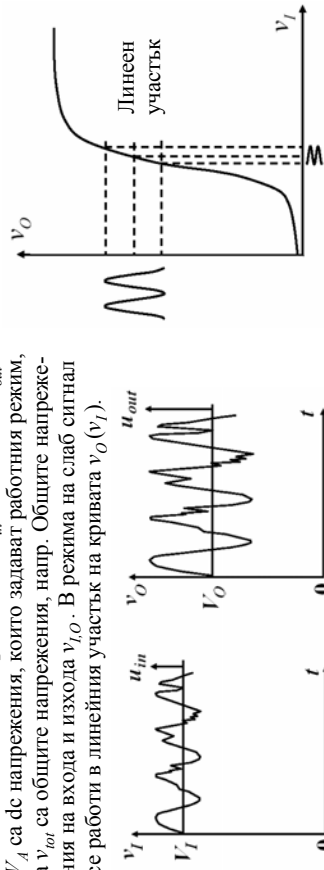
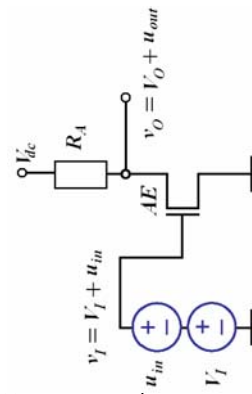
където S_{eq} е еквивалентната стърмяност на активния елемент, а $Z_A(\omega)$ е комплексният еквивалентен товарен импеданс на усилвателя.

Приближение на слаб сигнал

В зависимост от предназначението и входния сигнал електронните усилватели могат да работят в режим на "слаб сигнал", режим на "силен сигнал" и импулсен режим. В лекцията ще разгледаме само режим на слаб сигнал. При него към постояннотоковите dc сигнали в схемата на усилвателя се наслагват и относително слаби променливо-токови RF сигнали, т.е.:

$$v_{tot} = V_A + u_{RF}$$

Тук u_{RF} са променливотоковите сигнали в различни точки на схемата, напр. на входа u_{in} и на изхода u_{out} . V_A са dc напрежения, които задават работния режим, а v_{tot} са общите напрежения, напр. Общите напрежения на входа и изхода $v_{I,O}$. В режима на слаб сигнал се работи в линейния участък на кривата $v_O(v_I)$.

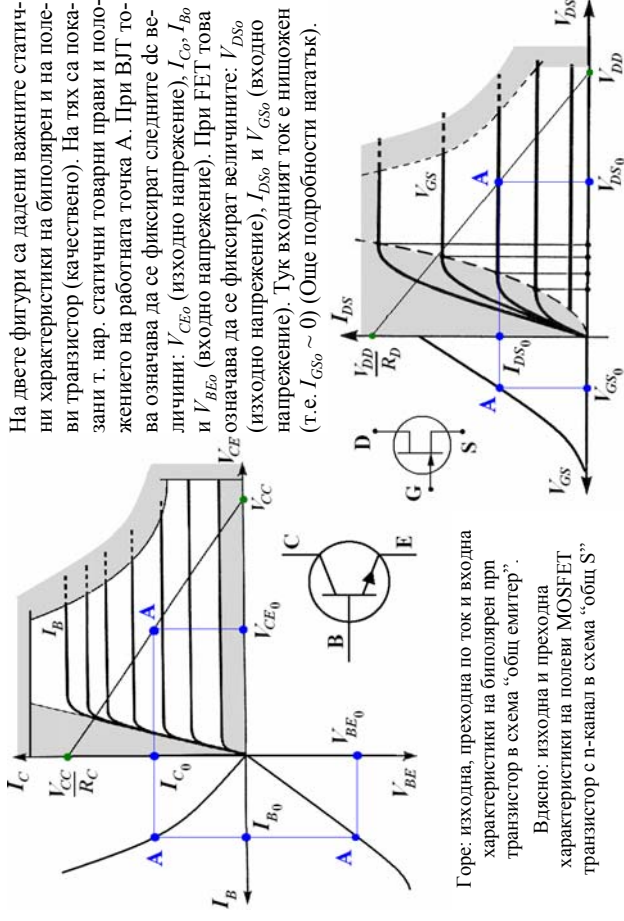


Лекция 15

15.2 Практическо осигуряване на работната точка на усилвател с биполярен и полеви транзистор. Характеристики и обща схема. Предназначение на елементите в схемата.

Работен режим клас А в усилватели с ВJT и FET

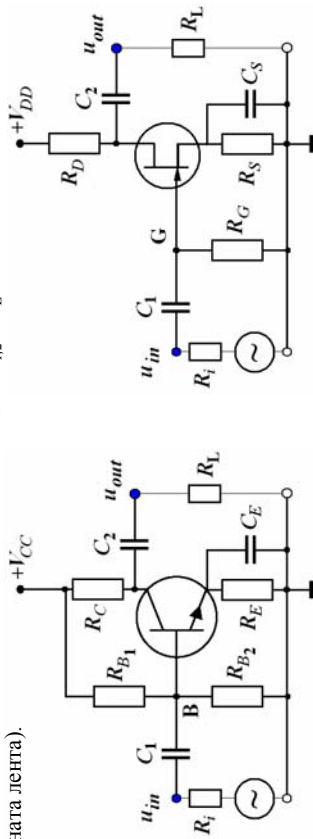
На двете фигури са дадени важните статични характеристики на биполярен и на полеви транзистор (качествено). На тях са показани т. нар. статични товарни прави и положението на работната точка А. При ВJT това означава да се фиксират следните две величини: V_{CE0} (изходно напрежение), I_{C0} , I_{B0} и V_{BE0} (входно напрежение). При FET това означава да се фиксират величините: V_{DS0} (изходно напрежение), I_{D0} и V_{GS0} (входно напрежение). Тук входният ток е нищожен (т.е. $I_{GS0} \sim 0$) (Още подробности нататък).



Горе: изходна, преходна по ток и входна характеристики на биполярен прп транзистор в схема "общ емитер".
Влясно: изходна и преходна характеристики на полеви MOSFET транзистор с п-канал в схема "общ S"

Обща схема на усилвател и предназначение на елементите

Долу са изобразени двете най-популярни схеми на ВJT и FET усилватели в схеми OE и OS, които вече бяха разглеждани. Основните елементи са: активният елемент (BJT или FET), неговият товар по dc ток R_A (R_C или R_D) и по променлив ток R_L ($R_C \parallel R_L$ или $R_D \parallel R_L$), и източника на dc захранване V_{CC} или V_{DD} . Останалите елементи имат вспомогателен характер. Елементите R_E и R_S реализират ОВ по ток с цел температурна стабилизация, ако потенциалите в т. В или G са постоянни (този проблем беше вече обяснен в Лекции 11 и 12, обяснете веригата символи: ако $I_C \uparrow \Rightarrow I_E \uparrow \Rightarrow R_E \uparrow \Rightarrow V_{BE} \downarrow \Rightarrow I_B \downarrow \Rightarrow I_C \downarrow$; причина $I_C = \beta I_B$). Кондензаторите C_E и C_S шунтират ООВ по ток за променлив ток; затова $1/\omega C_{E,S} \ll R_{E,S}$. Делителят $R_{B1,2}$ осигурява постоянството на потенциала в т. В; целта е токът през делителя да е $\gg I_{B0}$ (при FET потенциалът в т. G е относително стабилен поради слабия ток през G и няма нужда от специален делител. Накрая блокировъчните кондензатори $C_{1,2}$ отделят dc режима от RF сигналите на входа и изхода ($1/\omega C_{1,2} \ll R_L$ за най-ниската честота от четотната лента).



Как да определим работния режим (пример ВJT)?

Това е важен въпрос, който се разглежда по-подробно в лабораторния практикум. В зависимост от целта се избира подходящ транзистор на дадена фирма. Много от необходимите параметри се намират в каталога на продукта (вж. примера долу за ВJT). От него се определят препоръчителните стойности на V_{CE0} , I_{C0} , коефициент на усилване по ток $\beta = h_{21}$ и др.). При тези параметри работният режим се определя така:

$$I_{B0} = \frac{I_{C0}}{\beta} = h_{21E} R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE0}}{I_{C0}} R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE0}}{I_{R_B} + I_{B0}} R_{B2} = \frac{V_{BE0}}{I_{R_B}}$$

Това е най-простият начин за проектиране; при по-специфични режими – потърсете специализирани източници.

Datasheet

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CE0}	Collector-Emitter Voltage	40	V
I_{C0}	Collector Base Current	10	mA
h_{21}	Current Gain	100	

Absolute Maximum Ratings* * At 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CE0}	Collector-Emitter Voltage	40	V
V_{BE0}	Collector-Base Voltage	5	V
I_{C0}	Collector Base Current	10	mA
I_{B0}	Collector-Emitter Current	10	mA
P_{tot}	Power Dissipation	300	mW

OFF CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CE0}	Collector-Emitter Saturation Voltage	0.2	V
I_{C0}	Collector Base Saturation Current	0.1	mA
V_{BE0}	Collector-Base Saturation Voltage	0.7	V
I_{B0}	Collector-Emitter Saturation Current	0.1	mA

ON CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CE0}	Collector-Emitter Saturation Voltage	0.2	V
I_{C0}	Collector Base Saturation Current	0.1	mA
V_{BE0}	Collector-Base Saturation Voltage	0.7	V
I_{B0}	Collector-Emitter Saturation Current	0.1	mA

Определяне на работния режим при FET

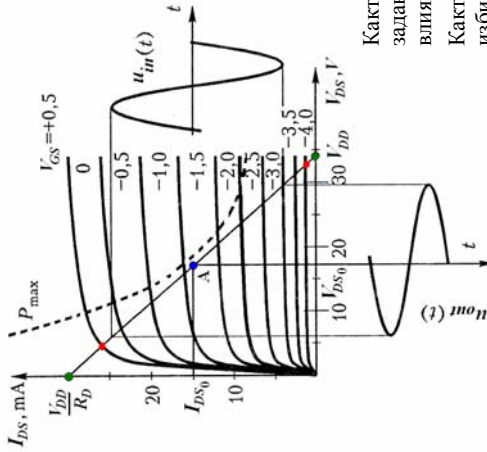
При полевите транзистори работният режим се определя по подобен начин. На изходната характеристика товарната права минава през точките $V_{DS} = V_{DD}$ и $I_{DS} = V_{DD}/R_D$, а т. А ($V_{DS}^{\text{оп}}$, $I_{DS}^{\text{оп}}$) се определя в средата на участъка между насищане и отсечка. Долу са дадени необходимите работни формули за работната точка:

$$I_{DS}^{\text{оп}} = \frac{V_{DD} - V_{DS}^{\text{оп}}}{R_D + R_S} \quad I_{GS}^{\text{оп}} \cong 0$$

$$V_{GS}^{\text{оп}} = V_{DD} - I_{DS}^{\text{оп}} R_S \quad V_{GS}^{\text{оп}} \cong -I_{DS}^{\text{оп}} R_S$$

Както отбелязахме, веригата $R_S \parallel C_S$ ($R_S \gg 1/\omega C_S$) задава автоматично потенциала на G по де то без влияние на променливо-токовата съставка.

Както при ВJT, така и при FET, работната т. А се избира близо до средата на линейния участък на изходната характеристика (вж. примерната графика вляво за FET). Такъв избор осигурява определен максимален динамичен обхват на входния сигнал и $u = V_{GS} \pm u_{\text{инт}}^{\text{макс}}$ при която линейността на усилвателя се запазва относително ниска. Ако амплитудата на входния сигнал се увеличи над тази максимална, нелинейността силно расте поради навлизане в участъците на насищане и отсечка.



Примерен анализ на честотната зависимост на усилвател с FET

Сега ще анализираме накратко честотното поведение на коефициента на усилване (за пример избираме FET усилвателя (схемата в началото на §15.2 и силно-опростената еквивалентна схема вляво). Двете й части, входната и активната изходна, могат да се разглеждат като два последователно-свързани четириполюсника и затова сумарният коефициент на усилване k_0 на централната честота f_0 е:

$$|k_0(f_0)| = |k_{in}(f_0)| \cdot |k_{out}(f_0)|$$

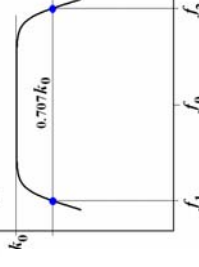
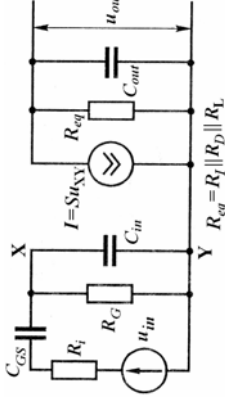
В областта около f_0 (при условия, че $R_i \ll R_G$, т. е. $u_{XY} \sim u_{in}$) комплексният коефициент се дава с израза ($k_{in} = u_{XY}/u_{in} \sim 1$):

$$k(f) = -S R_{eq}$$

където R_{eq} е еквивалентното съпротивление на изхода, а S е струмността на транзистора (в случая = преходната проводимост на FET). На ниски k_L и високи k_H честоти изразите са

$$|k_L| \cong \frac{\omega R_G C_{GS}}{\sqrt{1 + (\omega R_G C_{GS})^2}} \cdot |k_{out}| \quad |k_H| \cong S \frac{R_{eq}}{\sqrt{1 + (\omega R_{eq} C_{out})^2}}$$

При $f_1 = 1/R_G C_{GS}$, $k_L \sim 0.707 k_0$, а при $f_2 = 1/R_{eq} C_{out}$, $k_H \sim 0.707 k_0$. Това са и двете гранични честоти, ограничаващи честотната лента на усилвателя отдолу и отгоре. При $2\pi f R_{eq} C_{out} \gg 1$ и $k = 1$ се получава т. нар. транзитна честота $f_T \sim S / 2\pi C_{out}$, до която устройството е усилвател.



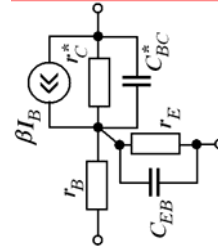
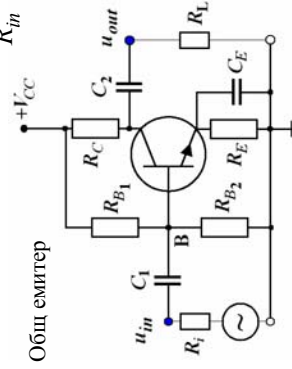
Сравнение и основни характеристики на усилватели с ВJT

На две последователни страници са изброени основните особености на усилватели с ВJT в различни схеми. Дадени са основните изрази за коефициентите на усилване по ток и напрежение, k_i , k_u , за входния и изходния импеданси, $R_{in, out}$. Със стрелки нагоре и надолу условно е показано кои величини имат големи или малки стойности. Използвани са означенията от схемата на усилвателя OE и на основните физични параметри на ВJT от еквивалентната му схема (вж. и Лекция 11):

$$k_i \uparrow \uparrow = \frac{I_C}{I_B} = \beta = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}$$

$$k_u \uparrow = -S_{eq} R_L \cong -\frac{\alpha_0}{r_E} R_L$$

$$R_{in} \uparrow = r_B + \frac{r_E}{1 - \alpha_0} \cong \frac{r_E}{1 - \alpha_0} \quad R_{out} \cong r_C \parallel R_C$$



Сравнение и основни характеристики на усилватели с ВJT (2)

Схема "обща база": усилва по напрежение, но не усилва по ток.

$$k_i = \frac{I_C}{I_E} = \alpha_0 \cong 1$$

$$k_u \uparrow = S_{eq} R_L \cong \frac{\alpha_0}{r_E} R_L$$

$$R_{in} = r_E + r_B (1 - \alpha_0) \cong r_E$$

$$R_{out} \cong r_C \parallel R_C$$

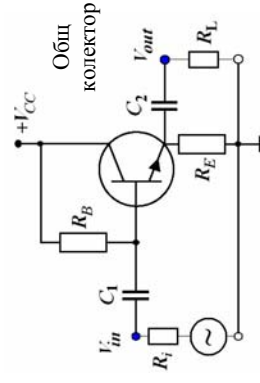
Схема "общ колектор": (емитерен повторител) усилва по ток, но не усилва по напрежение, усилвател с високо входно и ниско изходно съпротивление; използва се за съгласуване на високо-омни източници с ниско-омни товари.

$$k_i \uparrow = \frac{I_C}{I_E} = \frac{1}{1 - \alpha_0}$$

$$k_u = S_{eq} R_L \cong \frac{1}{r_E + R_E} R_L \cong 1$$

$$R_{in} \uparrow \uparrow = r_B + \frac{r_E + R_E}{1 - \alpha_0} \cong \frac{r_E + R_E}{1 - \alpha_0}$$

$$R_{out} \downarrow \cong r_E$$

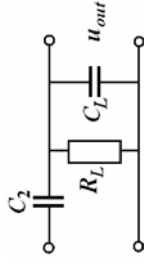


Лекция 15

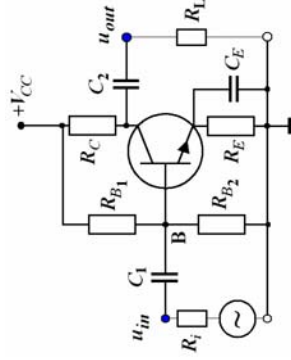
15.3 Влияние на товара на усилителя в различните части на честотната му лента.

Товарно съпротивление на електронния усилвател

Влиянието на товарният импеданс върху работата на усилвателя е много важна за неговата широко-лентовост. Вляво на фигурата е показан типичен комплексен товар на усилвател $R_L \parallel C_L - C_2$. В много-стъпалните усилватели това може да е краен товар на дадено стъпало и едновременно входен импеданс на следващото стъпало.



Друг важен момент е, че товарът на усилвателя може да е различен в постоянно-токов и в променливо-токов режим. За дадена схема на електронен усилвател с ВЛТ в схема "общ емитер" ще определим товара (без реактивни съставки):



❖ по постоянен ток:

$$dc: R_C$$

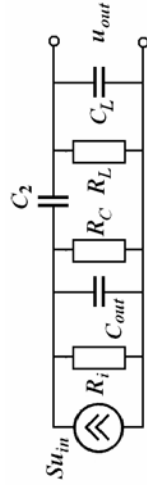
❖ по променлив ток:

$$RF: R_C \parallel R_L$$

Обща еквивалентна схема на изходния товар

Долу е дадена еквивалентната схема на изходно стъпало на усилвател с всички възможни товарни елементи. Схемата включва: еквивалентен източник на ток Su_{in} и неговото вътрешно съпротивление R_i ; изходният капацитет на транзистора C_{out} ; колекторното съпротивление R_C ; прехвърлящият кондензатор C_2 и накрая, външният товар $R_L \parallel C_L$. На основата на тази схема ще направим анализ на поведението на общия коефициент на усилване k_u по напрежение за различни честоти от честотната лента на усилвателя: средни $f \sim f_0$, ниски $f \leq f_1$ и високи $f \geq f_2$.

$$k_u = SR_0$$



На средни честоти $f \sim f_0$ товарът R_0 е чисто резистивен и представлява усреднените съпротивления $R_C \parallel R_L$, оставящи постоянни в широк честотен обхват

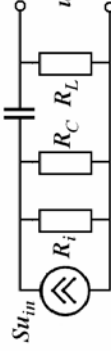
$$R_0 \equiv \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

$$k_0 = SR_0 \sim \text{const}$$

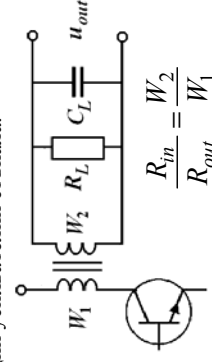
Товар при ниски и високи честоти

При ниски честоти основен проблем е високото съпротивление на прехвърлящия кондензатор $1/2\pi f C_2$. При високи честоти освен общият товар $R_0 = R_C \parallel R_L$, влияние оказва и резултатният капацитет C_0 , който включва изходният капацитет C_{out} , товарният капацитет C_L и вече оказващия влияние паразитен монтажен капацитет C_p :

$$R_0 \equiv \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \quad C_0 \equiv C_{out} + C_L + C_p$$



Най-ефективен е методът за натоварване на усилвателя е чрез трансформаторна връзка. При него лесно се постига високо отношение на входен към изходен импеданс, а чрез резонансна връзка $R_L C_L$ може да се разширява честотната лента. Методът се използва при крайните мощни усилвателни стъпала.



$$\frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{W_2}{W_1}$$

