

Лекция 16

Електронни усилватели със специално предназначение

Съдържание на Лекция 16

16. Електронни усилватели със специално предназначение.
- 16.1 Резонансни усилватели – схема и принцип на работа. Лентови усилватели – схема и принцип на работа. Широколентови усилватели – нискочестотна и високочестотна корекция (принципи и реализация).
- 16.2 Усилватели на мощност: еднотактна схема клас А и двутактна схема клас В.
- 16.3 Параметрични усилватели – принцип на работа и схема.

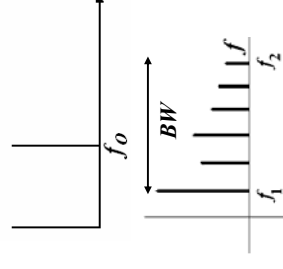
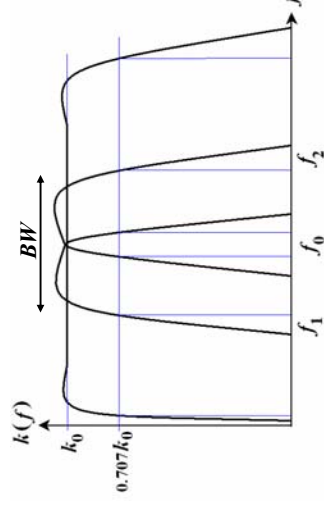
Лекция 16

16.1 Резонансни усилватели – схема и принцип на работа. Лентови усилватели – схема и принцип на работа.

Класификация на усилвателите според честотната лента

На усилване подлежат сигнали с различна честотна лента. Някои са просто-периодични или с много тясна честотна лента. Други, обратно, заемат широка честотна лента и трябва да бъдат усилены всичките им честотни съставки, за да не се променя след усилване техният спектър, и следователно, тяхната форма. Особено “широколентово”, трябва да бъде усилването на импулсни и модулирани сигнали. В зависимост от големината на нормираната честотна лента BW_n усилвателите могат да се класифицират по следния начин:

- ❖ Резонансни усилватели: $BW < 10\%$;
- ❖ Лентови усилватели: $BW \sim 10\%$;
- ❖ Широколентови усилватели: $BW > 10\%$ до няколко октави.
- ❖ Импулсни усилватели: BW до няколко октави.



Резонансни усилватели

Наименованието на резонансните усилватели идва от факта, че за товар се използва резонансен LC-третият кръг. На схемата вдясно е показана примерна схема на резонансен усилвател на ГЕТ транзистор с паралелен третият кръг, настроен на честота $f \sim f_0 = (1/2\pi)(LC)^{-1/2}$, която е явява централна честота на усилвателя. Тук е дадена цялата схема, но по нататък в лекцията ще представяме само онези части на схемите на усилватели, които имат пряко отношение към действието им. Напр., долу е дадена само частта с резонансния кръг, при това за усилвател с ВЛТ. До нея е дадена еквивалентната схема на изходната част. Коэффициентът на усилване е

$$k_u = -SZ_{LC}$$

където Z_{LC} е еквивалентният товарен импеданс (S е стръмността на транзистора):

$$Z_{LC} \approx \frac{R_{eq}}{\sqrt{1 + (2Q\Delta f / f_0)^2}}$$

Тук R_{eq} е съпротивлението $R_i \parallel R_L \parallel Q$ е качественият фактор на кръга, а $\Delta f = f - f_0$ е честотната разстройка спрямо централната честота f_0 .

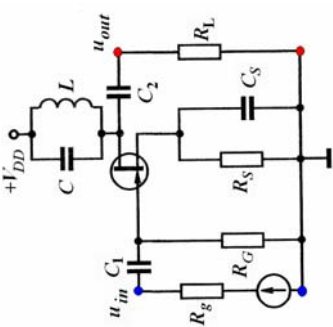
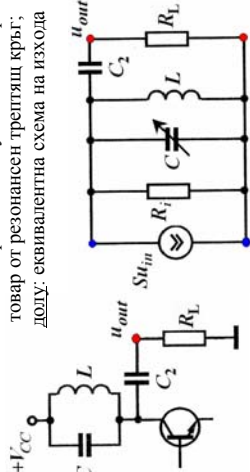
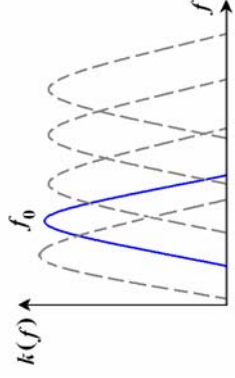
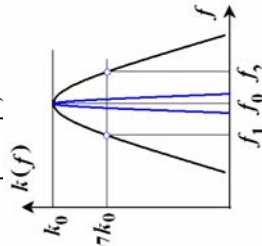


Схема на резонансен усилвател: **горе:** товар от резонансен третият кръг; **долу:** еквивалентна схема на изхода



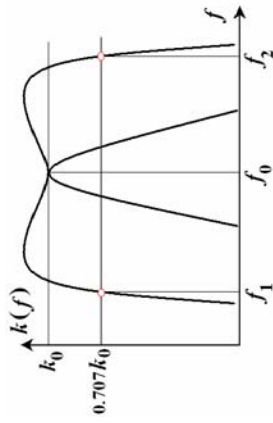
Честотна лента на резонансния усилвател

Резонансните усилватели имат тясна честотна лента до няколко процента. Тя е доста близка по форма до резонансната крива на товарния резонансен кръг. Максимален коэффициент на усилване k_0 се получава на честотата на резонанс на кръга f_0 , когато $Z_{LC} \rightarrow R_{eq} \parallel R_L$. Понеже резонансният усилвател се използва за усилване на теснолентови сигнали, неговата "избирателност" е подобна на тази на лентово-пропускателните филтри. Следователно, ширината на честотната лента, определяна на ниво $0.707k_0$, респективно "избирателността" на усилвателя, зависи от големината на Q фактора на товарния кръг (колкото по-висок е Q , толкова по-тясна е честотната лента и обратно, а Q факторът расте с намаляване на активното съпротивление в кръга). Друг важен момент е възможността за управление на централната честота на усилвателя, например чрез регулиране на товарния кондензатор C в кръга. Благодарение на тези свойства, резонансните усилватели намират приложение главно във входните вериги на приемници (радио-предаватели, телевизионни, радиолокационни и пр.) и различни чувствителни измерителни устройства (селективни волтметри, спектро-анализатори и пр.). Масовите резонансни усилватели са предимно в звуковия обхват.



Лентови усилватели

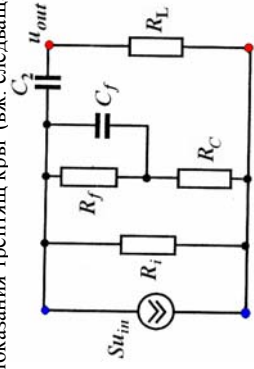
Честотната лента на резонансните усилватели може да се увеличи, като за товар се използва не единичен, а свързани резонансни кръгове (вж. Лекция 7). Начинът за разширение се състои в контрол на коэффициента на връзка между свързаните кръгове $L_1 \parallel C_1$ и $L_2 \parallel C_2$ чрез взаимната индуктивност M . На фигурата долу е показана типична честотна зависимост на коэффициента на усилване на лентов усилвател. Тези усилватели се използват за случаи, когато е необходима честотна лента $\sim 10-15\%$, но в диапазона на тази лента се предполага, че еквивалентният товарен импеданс на кръга остава постоянен $Z_L \sim \text{const}$.



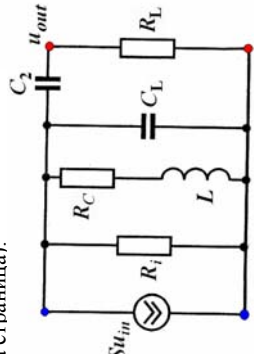
Широколентови усилватели

Широколентовите усилватели се използват за усилване на сигнали със сложна форма и притежаващи широк спектър. Широколентовият усилвател по същество е резистивен усилвател с честотни корекции. Използват се два типа корекции: ниско-честотни и високо-честотни. Така може да се влияе на честотната зависимост на коэффициента на усилване $k = -SZ_C$.

При ниски честоти $Z_C = R_C - R_f \parallel C_f$. Тук индуктивността L практически не влияе. Поради влиянието на кондензатора C_f и кондензатора Z_C расте с намаляване на честотата и това води до увеличаване на коэффициента на усилване. Обратно, при високи честоти товарен резонансния кръг $L - R_C \parallel C_L$, настроен на високи честоти $f > f_2$. Поведението на коэффициента на усилване зависи от Q -фактора на показания третият кръг (вж. следващата страница).



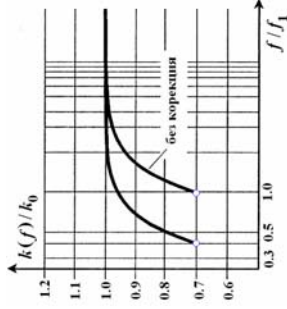
Еквивалентна схема при ниски честоти



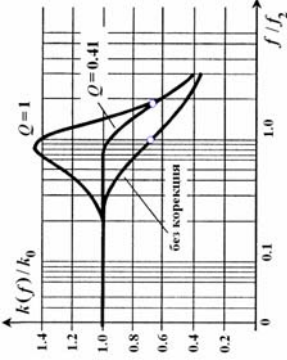
Еквивалентна схема при високи честоти

Горе: относително проста схема на широколентов усилвател с корекции

Октавна честотна лента на широколентов усилвател



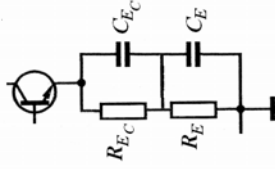
Ниско-честотна корекция (~0.4 пъти)



Високо-честотна корекция (~1.7 пъти)

Горе са дадени примерни зависимости на коефициента на усиление на широколентов усилвател с ниско- и високо-честотни корекции. Общата честотна лента може да надхвърли 1 октава (> 100 %).

Друг разпространен метод за честотна корекция е чрез отрицателна обратна връзка по ток, която се използва при обикновените резистивни усилватели (вж. схемата вдясно). При обикновената ООВ чрез елементите $R_E \parallel C_E$ ефектът намалява при увеличаване на честотата поради шунтиращото действие на кондензатора. Сега се използва допълнителна верига $R_{Ez} \parallel C_{Ez}$, която реализира своеобразен високочестотен филтър. Така ефектът на намаляване на ООВ на високи честоти се компенсира частично и честотната лента расте откъм високите честоти.



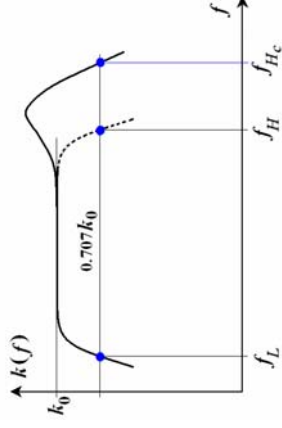
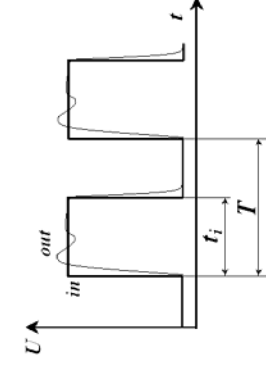
Лекция 16

16.2 Усилватели на мощност: еднотактна схема клас А и двутактна схема клас В.

Импулсни усилватели

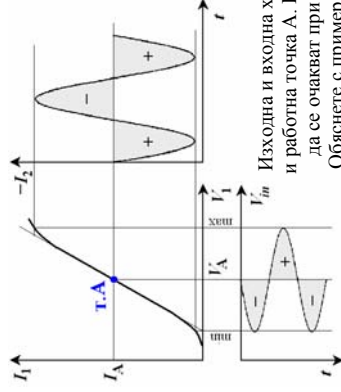
Импулсните усилватели (или наричани още видео-усилватели) се използват за усиление на импулсни сигнали със стръмни фронтове и поради това те трябва да са с широка честотна лента. В схемно отношение те са близки до разглежданите широколентови усилватели, като за разширяване на честотната лента се използват предимно високо-честотни корекции.

Долу е показан примерен вид на входен правоъгълен импулс и съответния изходен импулс след импулсен усилвател. Промината във формата (главно увеличаване на продължителността на фронта и осцилации в платото), се дължи на ограничената честотна лента. За да се подобри формата, честотната лента трябва да се разшири (минимално 20-50 MHz, с подобрения поне 100 MHz, при усилватели с разпределено усиление ~1000 MHz и нагоре). Съществува следното правило за честотната лента на импулсни усилватели: долната гранична честота да е $f_L \sim 1/T$, а горната $f_H \sim (3 \div 4)t_r$, където T е периода на импулса, а t_r е неговата продължителност.

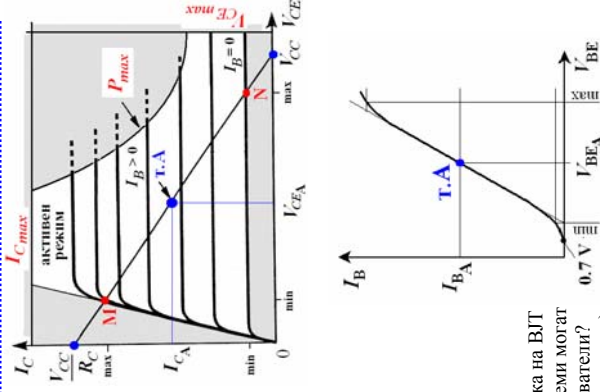


Мошни усилватели

Реализацията на мощен усилвател е по-различно от реализацията на обикновен усилвател на по-ниска изходна мощност. Те обикновено се използват за крайно стъпало в устройствата. Проблемът е, че трябва да се осигури максимален обхват по работната товарна права (вж. изходната и входната характеристика на ВГТ) и максимално съгласуване с товарното съпротивление. Ще разгледаме само два типа схеми: еднотактна схема клас А и двутактна клас В.

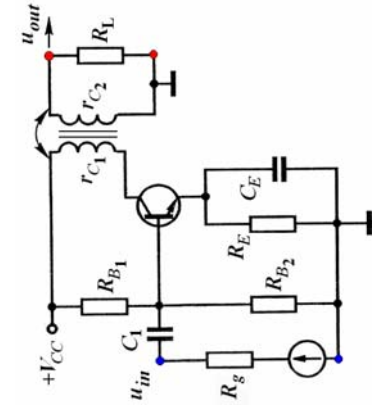


Изходна и входна характеристика на ВГТ и работна точка А. Какви проблеми могат да се очакват при мощни усилватели? Обяснете с пример (вж. следващата стр.)



Едно-тактов усилвател на мощност клас А

Крайните усилватели (power amplifier, PA) се използват в електронните вериги, за да осигурят на изхода им необходимата променливотокова мощност. Обикновено те имат висок коефициент на усилване, висок шум, силни нелинейни изкривявания и относително висок коефициент на полезно действие. Долу е дадена принципната схема на еднотактно стъпало в схема клас А. То се използва рядко, но показва добре проблемите на мощните усилватели. Различното в схемата е използването на трансформаторна връзка на изхода. Товарът на колектора R_C се определя от съпротивленията на трансформаторните бобини и товара.



Еднотактно крайно стъпало с трансформаторна връзка

$$R_C = r_1 + r_2 / n^2 + R_L / n^2; \quad n = W_2 / W_1$$

Мощността на изходния сигнал се определя от

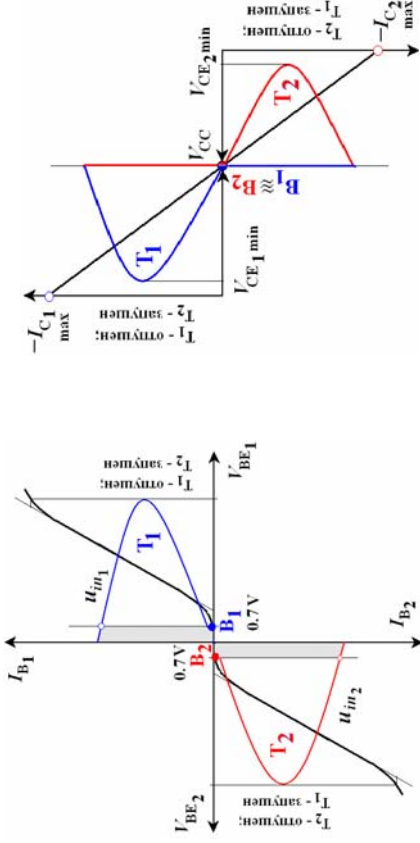
$$P_{out} = \frac{V_{CEm} I_{Cm}}{2} = \frac{(u_{CE \max} - u_{CE \min}) \cdot (i_{C \max} - i_{C \min})}{8}$$

Така можем да определим максималният коефициент на полезно действие ~ 50-9% (но практически е доста по-нисък):

$$\eta_{\max} = \frac{P_{out, \max}}{P_{dc}} \approx \frac{0.5 V_{CC} I_{C0}}{V_{CC} I_{C0}} = 0.5$$

Идея: използване на два транзистора в клас В

За да се повиши коефициента на полезно действие и изходната мощност може да се използват транзистори в режим клас В, но проблемът е, че така се усилва само единия полуциклус на входния сигнал. Ако, обаче, се използват два транзистора, работещи в противофаза, всеки ще усилва по един период на един и същи входен сигнал и така може да се постигне много висок коефициент на усилване (вж. следващата страница). Така даден период на входния сигнал се усилва от един транзистор, докато другият е запушен и обратно.



Входна и изходна характеристика на два ВТТ транзистора, работещи в противофаза

Дву-тактов усилвател на мощност клас В

Това е схемата на реализираното двутактно мощно стъпало. Схемата включва два ВТТ T_1 и T_2 с огледална симетрия, захранвани от един дс източник. Входните и изходните сигнали се подават през трансформатори със средна точка. Ако на входа няма сигнал, в изходите на двата транзистора текат токове $I_{C01,2}$, които се компенсират и в изходния трансформатор не се индуцира сигнал. При постъпване на сигнал на входа, той се разделя на два противоуположни сигнала, които се подават на базите на всеки от трансисторите. Така в изходните бобини противостоят два тока $i_{1,2}$ в една и съща посока, които индуцират в изходния трансформатор синфазни сигнали. В следващия период токовете пак са синфазни, в текат в противоположна посока. Всеки транзистор усилва в един полуциклус, а в другият е запушен.

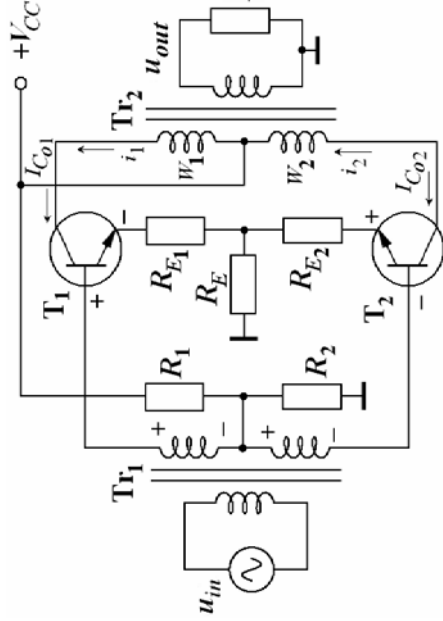


Схема на дву-тактно усилвателно стъпало клас В

Нелинейност при усилвателите на мощност

Пак можем да определим максималният коефициент на полезно действие. Изходната мощност е

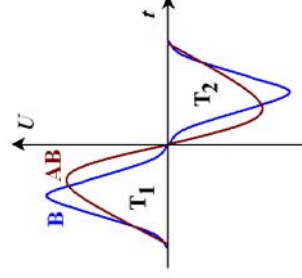
$$P_{out} = \frac{(V_{CC} - u_{CE \min}) \cdot i_{C \max}}{2}; \quad u_{CE \min} (Si) \sim 2 - 4 V$$

Консумираната дс мощност се получава след осредняване

$$P_{dc} = \frac{2 i_{C \max} V_{CC}}{\pi}$$

Може да се докаже, че максималният коефициент на полезно действие сега е по-висок ~ 78 %, но практически е не по-висок от 20 %. Така двутактното стъпало е по-ефективно от еднотактното, но има по-сложна схема и се нуждае от двойка еднакви транзистори. При усилватели клас В се появяват и силни нелинейни изкривявания във формата на изходния сигнал (вж. вляво). За да се намали този ефект, се използват усилватели клас АВ.

Основен недостатък на показаните две схеми на усилватели е използването на трансформаторна връзка, което прави усилвателите обемисти по размер. Могат да се реализират мощни усилвателни стъпала без трансформатори, но тези устройства са по-сложни и не се разглеждат тук.



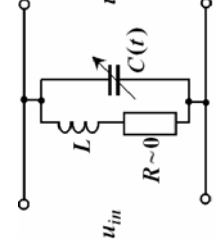
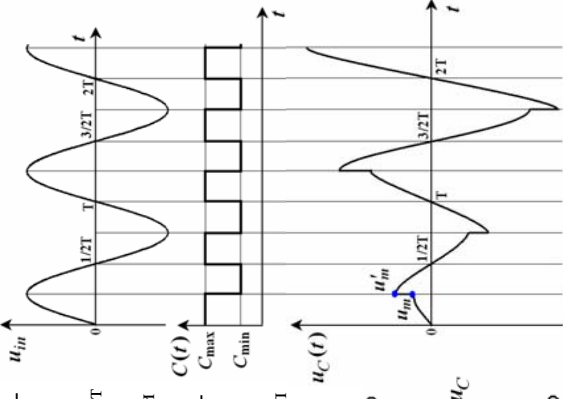
Форма на усиления изходен сигнал

Лекция 16

16.3 Параметричен усилватели – принципи на работа и схема.

Принцип на работа на параметричен усилвател

Досега подробно разгледахме само резистивни усилватели. При тях активният елемент е от резистивен тип, където входният сигнал управлява електрическият ток през нелинейното съпротивление. Изходният усилен сигнал се получава за сметка на Δc източниците, които поддържат необходимите Δc напрежения и токове в елемента. Параметричните усилватели използват реактивен нелинейен елемент – напр. нелинейния кондензатор на варакторен диод, управляван с отрицателно напрежение. Тук усиляването става в трептяща система, а енергията за усиляване на сигнала с честота f идва за сметка на по-високо честотен източник (обикновено на честота $2f$), наречен напомпващ генератор, който управлява реактивността (напр. капацитетът на варакторния диод). Тук е показана проста схема и графика на входния и усиления сигнал от параметричния усилвател, а обяснението е на следващата страница.



Проста схема на параметричен усилвател с варакторен диод и графика на входния и усиления сигнал

Принцип на работа на параметричен усилвател (2)

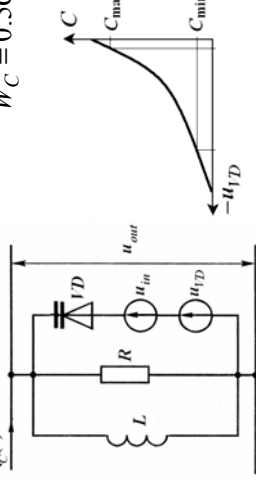
Действието на схемата на предишната страница е следното: Върху кондензатора се подава синусоиден входен сигнал с честота f . Нека в този момент той има капацитет C_{max} и при входно напрежение u_m се зарежда със заряд q_C . Ако в този момент капацитетът бързо се превключи на стойност C_{min} , зарядът q_C остава постоянен и напрежението върху кондензатора расте на u'_m . Това се илюстрира със следните изрази:

$$q_C = C_{max} u_m = \text{const} = C_{min} u'_m \uparrow$$

Ефектът на нарастване на напрежението би се анулирал при следващ период, но моментът на преминаване обратно към стойност C_{max} на капацитета е подбран точно, когато напрежението върху кондензатора е 0 (т.е. и зарядът $q_C = 0$). Може да се покаже, че енергията W_C , запасена в кондензатора расте, а следователно расте и изходната мощност в усилвателя:

$$W_C = 0.5 C_{aver} u'_m^2 = (C_{max} + C_{min}) u_m^2 \uparrow$$

Всъщност, нарастването на напрежението върху кондензатора се ограничаваша от активното съпротивление R в схемата. Основното предимство на параметричния диоден усилвател е ниското ниво на шум, който в нелинейния кондензатор е много слабо. Подобни схеми на усилватели – мазери, се срещат и на по-високи честоти – чак до оптичния диапазон.



Капацитет на варакторен диод при обратно свързване, управляван с напрежение и схема на наpomпване