 **Технически университет – София**
Електротехнически Факултет
Катедра „Обща електротехника”

Презентация № 8

Електронни усилватели

дисциплина „Електротехника и електроника ” – FBME27
ОКС „Бакалавър” от Учебните планове на специалности
от МФ, МТФ, ЕМФ и ФТ



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

8. Електронни усилватели

1. Предназначение. Блокова схема. Видове.
2. Основни параметри и характеристики:
 - 2.1. Комплексен коефициент на усилване;
 - 2.2. Входно съпротивление (импеданс);
 - 2.3. Изходно съпротивление (импеданс);
 - 2.4. Честотни характеристики - АЧХ и ФЧХ. Видове усилватели според вида на АЧХ.
 - 2.5. Изкривявания при електронните усилватели - понятия, същност, видове.
3. Операционни усилватели (ОУ):
 - 3.1. Определение;
 - 3.2. Изводи, условни означения;
 - 3.3. Основни параметри и характеристики;
 - 3.4. Опростен анализ на електронни схеми с ОУ.
4. Приложения на основни схеми с ОУ.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз

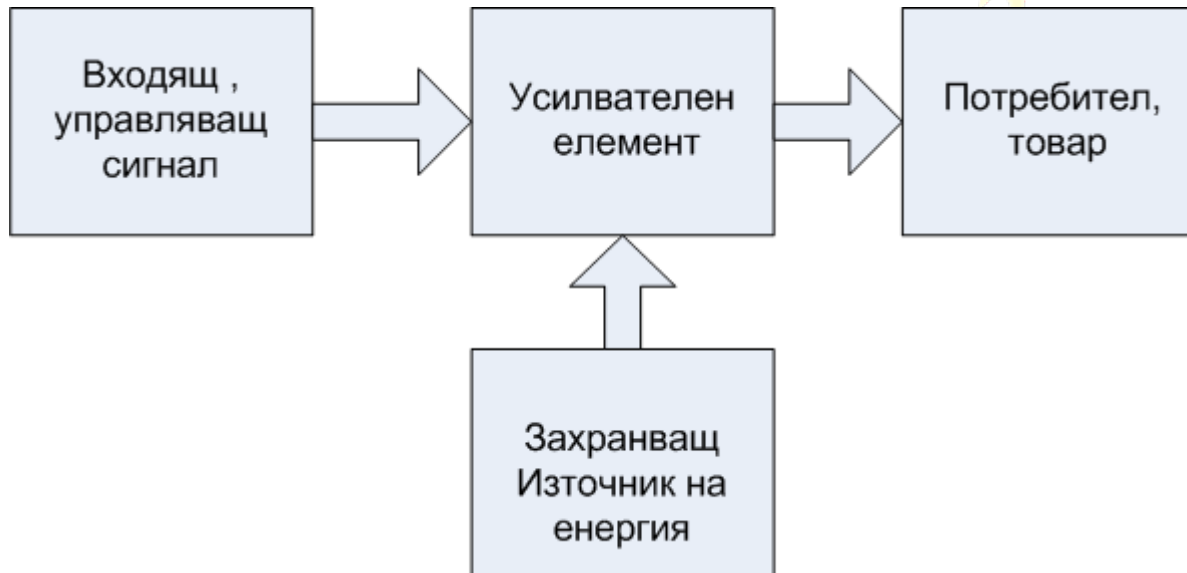
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Предназначение. Блокова схема. Видове.

Усилвателите представляват устройства, в които с помощта на входящ сигнал с малка мощност се управлява предаването на голямо количество енергия от източника към съответен потребител, наричан още товар.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Предназначение. Блокова схема. Видове.

Входящият управляващ сигнал може да бъде получен от първичен преобразувател – сензор ,например : термодвойка, фотоелемент, микрофон и други сензори за информация от изследван обект.

Усилвателният елемент по правило съдържа множество активни електронни елементи – **транзистори**, и множество пасивни елементи, като диоди, кондензатори, индуктивни и резистивни елементи.

Захранващият източник за електронните усилватели е с много по-голяма мощност и обикновено е източник на постоянни напрежения със стандартни стойности: например 5 V, 12 V, 15V или източници на ток.

Потребителите консумират мощност от захранващия източник , в съответствие с управляващия сигнал. Това са изпълнителни звена от измервателна, изчислителна, комуникационна, медицинска, радионавигационна техника, телемеханика и автоматика.

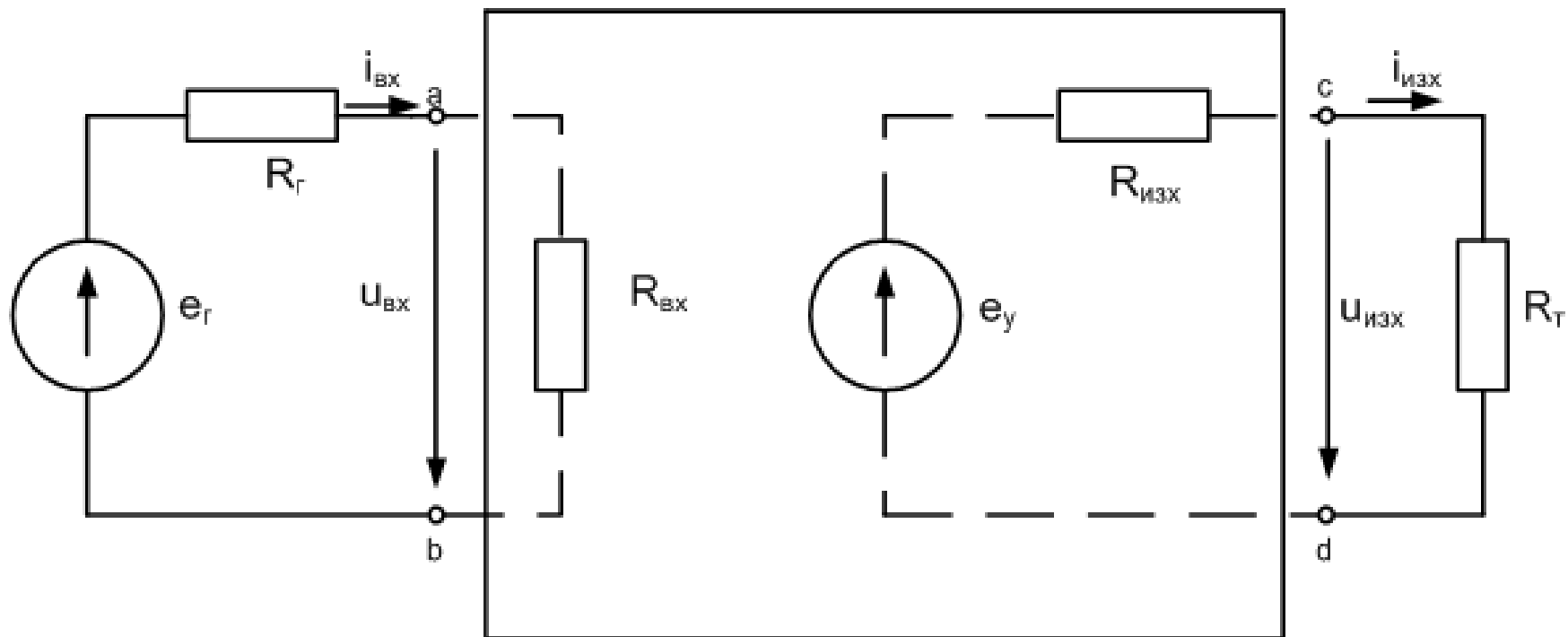


Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Обобщена заместваща схема на електронен усилвател



Източникът на входния сигнал е представен с е.д.н. e_r с вътрешно съпротивление R_r

Усилвателния елемент се разглежда като източник на напрежение с е.д.н. e_y или ток с вътрешно съпротивление $R_{изх}$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз

Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Входно и изходно съпротивление на усилвателите

По отношение на входните изводи **a-в** усилвателят може да се разглежда като товар с със съпротивление $R_{вх}$, наречено **входно съпротивление**. Ако се приложи правилото за делител на напрежение, за входното напрежение може да се запише:

$$u_{вх} = e_2 \frac{R_{вх}}{R_2 + R_{вх}}$$

Следователно полезният входен напрежителен сигнал е най-голям при $R_{вх} \gg R_2$

По отношение на изходните изводи **с-д** усилвателят може да се разглежда като товар със съпротивление $R_{изх}$, наречено **изходно съпротивление**. Изходната верига по отношение на консуматора е представена с източник на е.д.н. $e_y = k_y u_{вх}$, (където k_y се нарича коефициент на усилване по напрежение на усилвателя) и с вътрешно съпротивление $R_{изх}$.

От втори закон на Кирхоф за изходната верига: $u_{изх} = e_y - R_{изх} i_{изх}$

Следователно, за да има по-голяма стойност, е необходимо изходното съпротивление да има малка стойност

В общия случай входното и изходното съпротивление са комплексни съпротивления (импеданси). Електронните усилватели на мощност трябва да работят в **съгласуван режим** $R_{вх} = R_G$; $R_T = R_{изх}$, за да се предава максимална мощност от захранващия източник към товара.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Коефициенти на усилване

В най-общия случай коефициентите се определят като отношение на изходните към входните величини.

а) коефициент на усилване по напрежение

$$k_u = \frac{u_{изх}}{u_{вх}}$$

б) коефициент на усилване по ток

$$k_i = \frac{i_{изх}}{i_{вх}}$$

в) коефициент на усилване по мощност

$$k_p = \frac{P_{изх}}{P_{вх}} = \frac{U_{изх}^2 / R_T}{U_{вх}^2 / R_{вх}} = \frac{I_{изх}^2 R_T}{I_{вх}^2 R_{вх}} = \frac{U_{изх} I_{изх}}{U_{вх} I_{вх}} = k_u k_i$$

Коефициентите в комплексна форма представляват предавателните характеристики на усилвателите и се дават графически като функция от честотата.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!

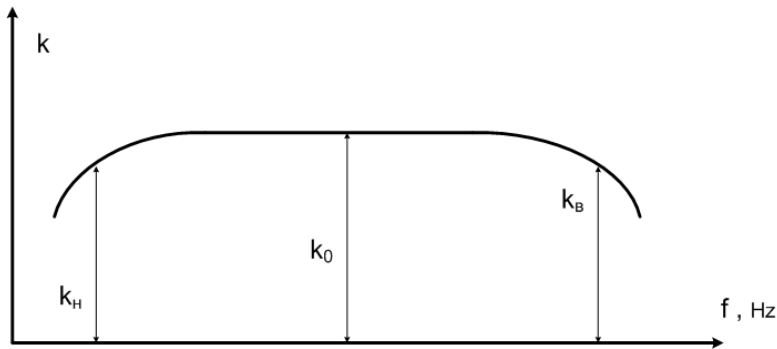


Европейски социален фонд

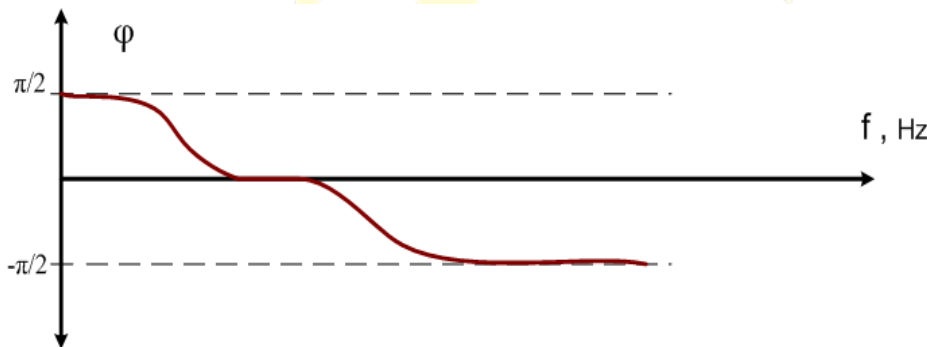
Амплитудночестотни и фазочестотни характеристики на усилвателите. Коефициенти на честотни изкривявания.

$$\tilde{k}_u = \frac{\dot{U}_{изх}}{\dot{U}_{вх}} = k_u e^{j\varphi_u}$$

$$\tilde{k}_i = \frac{\dot{I}_{изх}}{\dot{I}_{вх}} = k_i e^{j\varphi_i}$$



Амплитудночестотни характеристики на усилвателите



Фазочестотни характеристики на усилвателите



Европейски съюз

ПРОЕКТ ВООТН 0001-4.3.04-0042
 „Организационна и технологична инфраструктура за учене през
 целия живот и развитие на компетенции”
 Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
 Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
 съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
 Инвестира във вашето бъдеще!



Коефициенти на честотни изкривявания.

Амплитудно-честотните изкривявания се оценяват с т.н. коефициенти на честотни изкривявания за ниски и високи честоти

$$M_n = \frac{k_0}{k_n} \quad \text{и} \quad M_v = \frac{k_0}{k_v}$$

Където k_0 е коефициентът на усилване при определена средна честота $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$, а k_n и k_v са съответните коефициенти на усилване при ниски и високи честоти.

Допускат се честотни изкривявания, при които $M_n = M_v \leq \sqrt{2}$

Интервалът от честоти от f_H до f_B , в които модулът на комплексния коефициент на усилване се изменя в допустими граници, образува т.нар. честотна лента.

Нелинейните изкривявания се дължат на нелинейните характеристики на усилвателните елементи. Те се оценяват с т.н. клир-фактор или коефициент на нелинейните изкривявания

$$k_{\text{нел. изкр.}} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots \dots \dots} \cdot U_k}{U_1}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Обратни връзки в усилвателите (ОВ)

Посредством обратната връзка се осъществява въздействие, при което част от енергията на изхода на усилвателя се връща обратно на неговия вход.

Обратните връзки се делят на две основни групи:

Паразитни- нежелателни, внасят по капацитивен или индуктивен път смущения

Конструктивни- с цел подобряване на качествените показатели на усилвателите

Ако обратната връзка води до увеличаване на входния сигнал, ОВ е положителна (ПОВ)

Ако обратната връзка води до намаляване на входния сигнал, ОВ е отрицателна (ООВ)

Според начина , по който енергията на изхода на усилвателя се връща обратно на неговия вход, различават 4 основни вида ОВ:

- а) Последователна ОВ по напрежение
- б) Паралелна ОВ по напрежение
- в) Последователна ОВ по ток
- г) Паралелна ОВ по ток

Положителните ОВ намират приложение главно в генератори на периодични колебания, синусоидални, правоъгълни , тригонообразни и т .н.

Отрицателните ОВ стабилизират коефициента на усилване, намаляват нелинейните изкривявания и подобряват честотните характеристики на усилвателите.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



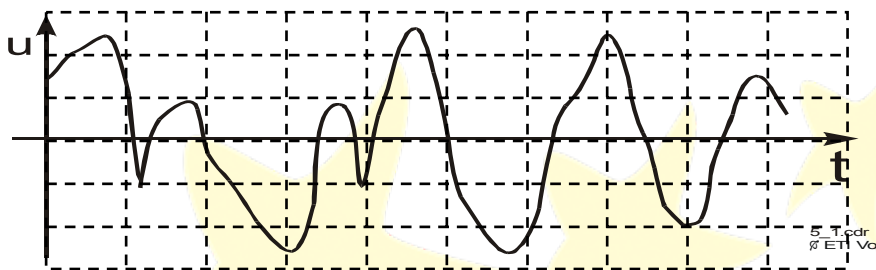
Европейски социален фонд

Видове електрически сигнали

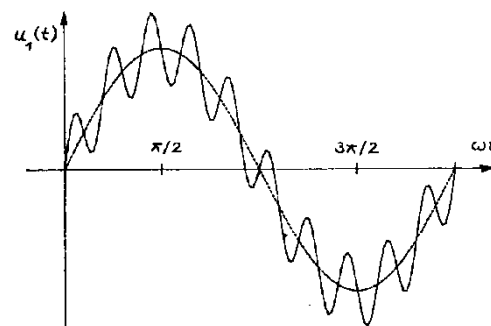
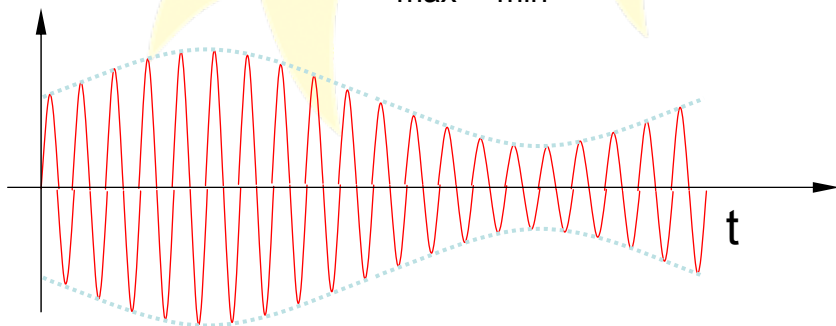
Източникът на входящ сигнал се изменя по сложен закон и може да се представи като спектър с честоти в диапазона от f_{\min} до f_{\max}

Сигналите се разделят на :

* **нискочестотни**- при които $f_{\max}/f_{\min} \gg 1$ например акустични сигнали
 $f_{\min} = 16 \text{ Hz}$, а $f_{\max} = 20 \text{ kHz}$



* **високочестотни** – $f_{\max}/f_{\min} = 1$, които се характеризират с носеща честота



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!

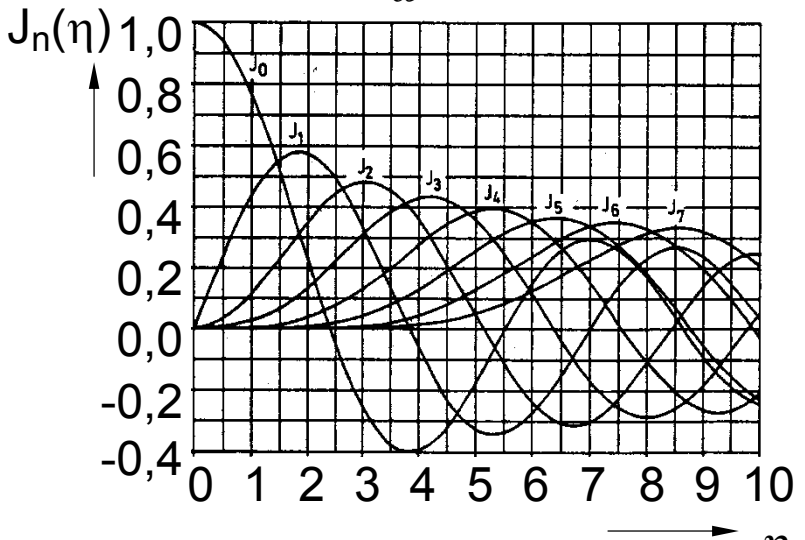


Европейски социален фонд

Примери: в най общия случай входния сигнал представлява несинусоидално колебание, но може да се замени с безкрайна сума от хармоници с честоти, кратни на ω

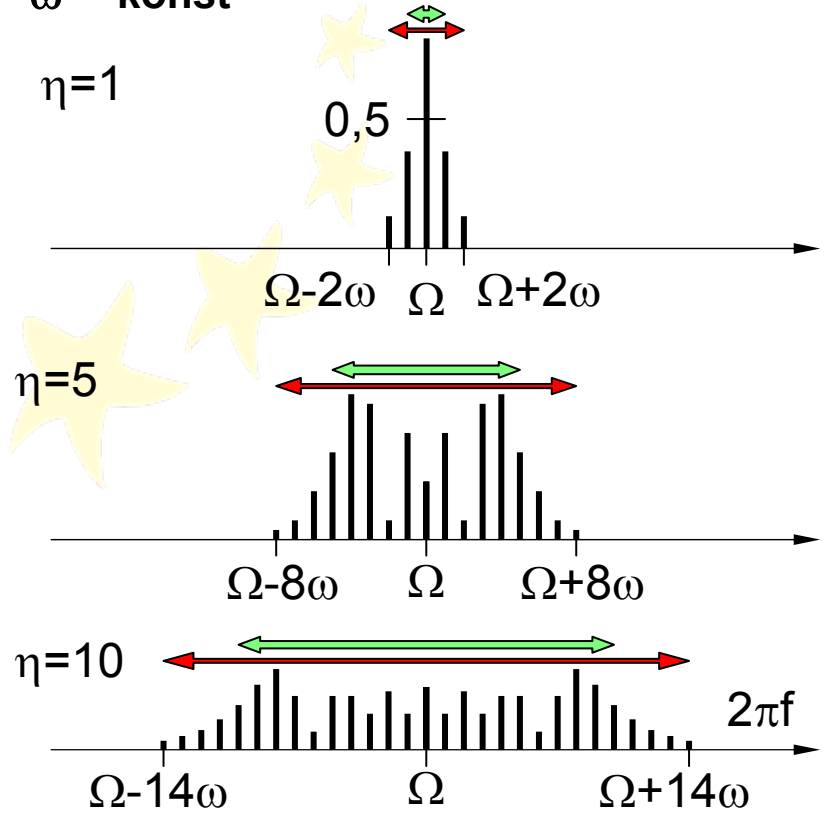
$$A(t) = \hat{A} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\eta) \cos(\Omega + n\omega)t \right\}$$

по дефиниция $\eta = \frac{\Delta\Omega}{\omega}$: модулационен индекс



За качеството на усилвателите се съди по допустимите изкривявания на формата на сигнала.

Амплитудно-честотен спектър
 $\omega = \text{konst}$



\longleftrightarrow $2\Delta\Omega$
 \longleftrightarrow Ширина на лентата



ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Класификация на усилвателните устройства

Всеки усилвател се характеризира с пропускателна честотна лента : от f_H до f_B .
Обикновено на практика $f_H > f_{\min}$, $f_B < f_{\max}$

Ако $f_H = 0$ -усилвателите са **постояннотокови**.

При $f_H > 0$ - усилвателите се наричат **променливотокови**

Принципно честотната лента на усилвателното устройство трябва да е по-широка от тази на сигнала, т.е. за усилване на постояннотокови и нискочестотни сигнали ($f_H = 30$ до 50 Hz и $f_B = 15$ до 20 kHz) се използват нискочестотни усилватели, докато за усилване на високочестотни сигнали се използват високочестотни избирателни усилватели с определена честотна лента ($f_B - f_H$) .

Към усилвателите за ниски честоти се отнасят освен постояннотоковите и усилвателите на звукови честоти; усилвателите на телевизионни честоти; видеоусилватели.

Високочестотните усилватели – в диапазон от 15 kHz до няколко MHz са предназначени да усилват само пропуснатите сигнали до необходимото напрежение или мощност . Те се разделят на:

- **теснолентови усилватели (избирателни усилватели)**– със ширина на пропускателната честотна лента $f_B - f_H < 2000 - 2500 \text{ Hz}$
- **широколентови усилватели** - $f_B - f_H > 40 - 100 \text{ kHz}$
- **усилватели на импулсни сигнали** – при анализ на преходни процеси, включване със скок, стръмен фронт на напрежението.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Видове усилватели на мощност в зависимост от режима на работа

В зависимост от положението на работната точка върху характеристиките на транзисторите се различават няколко режима на работа на усилвателите на мощност.

Усилватели режим А - работната точка се намира в линейната част на характеристиката, което означава, че нелинейните изкривявания са малки, но и коефициента на полезно действие също е малък. Затова се използва само в първите стъпала на усилвателя, там където нивото на сигналите е ниско, при по-големи входни сигнали има опасност от ограничаване на изходния сигнал и до поява на големи нелинейни изкривявания.

Усилватели режим В - работната точка се намира в началото на характеристиката, следователно изкривяванията са големи. Характерно за режима е наличието на четни хармоници, поради което се използва при двутактовите усилвателни стъпала, като те се компенсират. Коефициента на полезно действие за режим В е по-голям.

Усилватели режим С – режимът С се характеризира с това, че входния импулсен сигнал има много хармонични съставки, които предизвикват големи нелинейни изкривявания. За да се отделят тези хармоници, в изходната верига на усилвателния елемент се включва резонансен трептящ кръг, настроен на основната честота, поради което нейните хармоници затихват в достатъчна степен. Тези усилватели (режим С) наричат понякога в резонансни усилватели. КПД на този клас е значително по-голям в сравнение с този при останалите режими.

Усилватели режим D - В този аналогово-импулсен режим отделяната топлинна мощност от усилвателния елемент е минимална. Този клас е от групата на високоефективните усилватели на мощност с КПД $\eta \approx 1$. При усилване на аналогови сигнали е необходимо преобразуването им в импулси (модулация). Усилвателният елемент работи в ключов режим и усилва импулсите. След усилването е нужно сигналът да се демодулира, за да се възстанови непрекъснатата му, аналогова форма



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Някои технически параметри на усилвателите

Амплитудночестотна характеристика е зависимостта на коефициента на усилване от честотата и отразява усилването на усилвателя в целия му работен диапазон. Качествените нискочестотни усилватели трябва да имат равномерна амплитудночестотна характеристика в честотна лента от 20 Hz до 20 000 Hz.

Коефициент на усилване по напрежение. Това е отношението на изходното напрежение към това на входа на усилвателя за една честота или за целия честотен диапазон.

Коефициент на усилване по мощност. Това е отношението между изходната спрямо входната мощност на усилвателя K_p (dB) = $10 \log(P_{изх} / (P_{вх}))$. В случая трябва да се измерят входното и изходното напрежение и входния импеданс и товарното съпротивление на усилвателя.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Пропускана мощност в определена честотна лента. Този параметър е важен, защото амплитудночестотната характеристика може да е равномерна до 100 kHz, но изходната мощност върху нормален товар да е равномерна в диапазон например до 20 kHz.

Чувствителност на усилвателя към промени на товара. Важен параметър за усилвателите по мощност. Един усилвател има максимална изходна мощност, когато неговия изходен импеданс е равен на товарното му съпротивление.

Нелинейни изкривявания. След усилването на входния сигнал може да формата му да се видоизмени. Това се дължи на нелинейните характеристики на усилвателните елементи. Определят се с помощта на синусоидален сигнал, като се следи формата на изходния сигнал с формата на входния сигнал. След усилването се появяват хармонични съставки. Нелинейните изкривявания се оценяват с коефициент на нелинейни изкривявания – клир-фактор. $k = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots} / U_1$, където U_1 е амплитудата на първия хармоник, U_2 е амплитудата на втория хармоник...



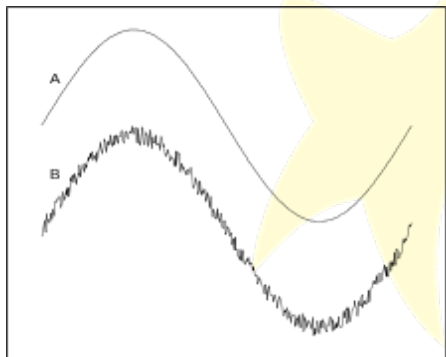
Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Честотни изкривявания на правоъгълни сигнали. За такива изкривявания се анализира влиянието на хармоничните върху фронтите и формата на амплитудата на изходния сигнал.

Фонов шум на усилвателя. За определяне фоновия шум на усилвателя се измерва изходното напрежение при липса на входен сигнал, а регулиращият потенциометър е поставен в положение максимум. Колкото е по-малко изходното напрежение, толкова усилвателят е по-качествен. Има разработени специални електронни схеми за потискане на фоновия шум при липса на сигнал.



Ефект на шумовете върху качеството на усилвания сигнал

Коефициент на полезно действие на усилвателя е отношение изходящата мощност към захранващата мощност



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

усилвател с биполярен транзистор в схема общ емитер

Режим на работа

Изборът на работната точка зависи от

- характеристиката $u_{CE} = f(u_{BE})$ и от източника на постоянно напрежение на входа база-емитер.
- Към постоянното напрежение u_{BE} се наслагва трансформираното променливо напрежение от сигнала.

Тогава величините i_B , i_C , u_{CE} се изменят:

$$u_{BE}(t) = u_{BE} + \Delta u_{BE}(t) = u_{BE} + \Delta U_{mBE} \cos \omega t$$

$$i_C(t) = i_C + \Delta i_C(t) = i_C + \Delta I_{mC} \cos \omega t = I_S e^{u_{BE}/U_T} e^{\frac{\Delta U_{mBE} \cos \omega t}{U_T}}$$

при $\frac{\Delta U_{mBE}}{U_T} \ll 1$ e-функцията: $e^x = 1 + x; |x| \ll 1$



Европейски съюз

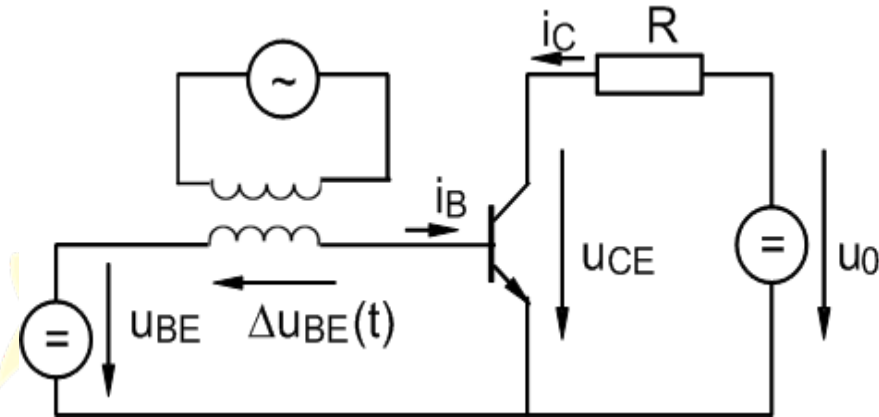
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Общ емитер



За колекторния ток:

$$i_C(t) = I_S e^{u_{BE}/U_T} \left(1 + \frac{\Delta U_{mBE}}{U_T} \cos \omega t\right) = i_C + \Delta I_{mC} \cos \omega t$$

След сравнение на коефициентите:

$$i_C = I_S e^{u_{BE}/U_T}; \quad \Delta I_{mC} = \frac{i_C}{U_T} \Delta U_{mBE}$$

$$i_B(t) = i_B + \Delta I_{mB} \cos \omega t = \frac{i_C(t)}{B_N} = \frac{i_C}{B_N} + \frac{i_C}{B_N U_T} \Delta U_{mBE} \cos \omega t$$

$$u_{CE}(t) = u_{CE} + \Delta U_{mCE} \cos \omega t = U_0 - i_C(t)R = U_0 - i_C R - \frac{i_C R}{U_T} \Delta U_{mBE} \cos \omega t$$

Усилването по
напрежение:

$$\frac{\Delta U_{mCE}}{\Delta U_{mBE}} = -\frac{i_C R}{U_T} \quad (= -192; \text{ при } i_C = 1 \text{ mA}, R = 5 \text{ k}\Omega, U_T = 26 \text{ mV})$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Усилване по мощност

1. Средната стойност, активната мощност, която е входяща за транзистора се изчислява като:

$$\bar{P}_{W,E} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{BE}(t) i_B(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{BE} + \Delta U_{mBE} \cos \omega t) \left(\frac{i_C}{B_N} + \frac{i_C}{B_N U_T} \Delta U_{mBE} \cos \omega t \right) dt$$

$$\bar{P}_{W,E} = \frac{1}{B_N} u_{BE} i_C + \frac{i_C}{B_N U_T} \frac{\Delta U_{mBE}^2}{2}$$

постояннотокова + променливотокова
мощност, В коефициент на усилване
по ток на транзистора

2. Средната стойност, активната мощност, която е изходяща за транзистора се изчислява като :

$$\bar{P}_{W,A} = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 i_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \left(i_C + \frac{i_C}{U_T} \Delta U_{mBE} \cos \omega t \right) dt = U_0 i_C$$

Константна постояннотокова
мощност, независи от ΔU_{BE} .

Мощността на захранващия източник U_0 се разделя на две : върху резистора и на транзистора:

$$P_{W,A}(t) = U_0 i_c(t) = [U_0 - R i_c(t)] i_c(t) + R i_c^2(t)$$

$$\bar{P}_{W,R} = \frac{1}{T} \int_0^T R i_c^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T R \left(i_C + \frac{i_C}{U_T} \Delta U_{mBE} \cos \omega t \right)^2 dt = R i_C^2 + R \frac{i_C^2}{U_T^2} \frac{\Delta U_{mBE}^2}{2}$$

$$\bar{P}_{W,A} = \bar{P}_{W,R} + \bar{P}_{W,Tr}; \quad \bar{P}_{W,Tr} = \bar{P}_{W,A} - \bar{P}_{W,R} = (U_0 - R i_C) i_C - R \frac{i_C^2}{U_T^2} \frac{\Delta U_{mBE}^2}{2}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през
целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Използване на сигнален трансформатор като елемент за връзка между източника на сигнала и входната верига.

ИЗВОДИ:

Трансформаторът внася значителни честотни и нелинейни изкривявания, обаче е необходим за съгласуване на съпротивленията на товара и отношението сигнал/шум на усилвателя.

В консуматора, който е активно съпротивление в колекторната верига на транзистора се отделя активна изходяща мощност, която нараства, когато мощността, отделена върху транзистора намалява. Мощността, ползвана от захранващия източник се разпределя на две.

Коефициентът на полезно действие е отношение изходящата мощност към захранващата мощност

Дефинираме :

$$\text{усилване по мощност} = \frac{\text{изходящата в } R_C \text{ мощност}}{\text{входящата мощност}}$$

$$\text{усилването по мощност} = \frac{R \frac{i_C^2}{U_T^2} \frac{\Delta U_{mBE}^2}{2}}{\frac{i_C}{B_N U_T} \frac{\Delta U_{mBE}^2}{2}} = B_N \frac{R i_C}{U_T} \quad \left(= 19 \cdot 10^3 \text{ при } B_N = 100 \right)$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Операционен усилвател

Общи сведения, условно означение:

Операционните усилватели се характеризират с голямо входно съпротивление ($10^6 \Omega$), много голям коефициент на усилване (10^4 - 10^5) и малко изходно съпротивление ($\sim 0 \Omega$).

Използва се не само при моделиране на математически операции, но и за усилване, преобразуване на аналогови сигнали в измервателни устройства.

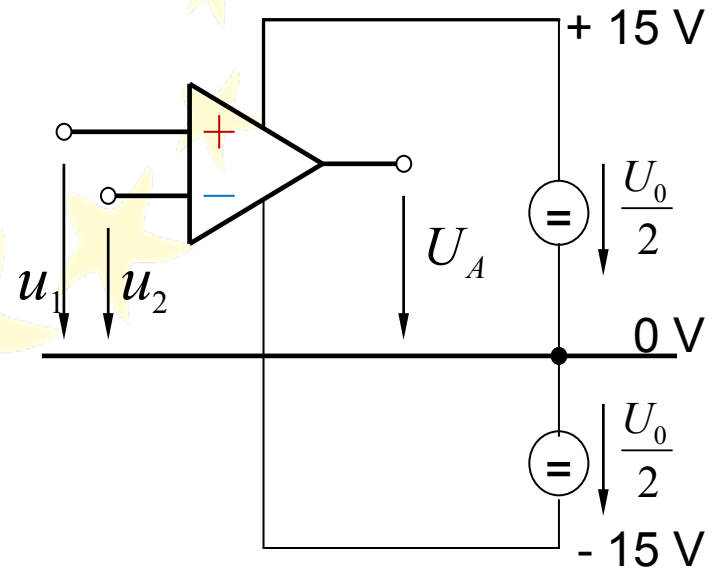
изходното напрежение U_A зависи от разликата между входните напрежения :

$$U_A = k_u (u_1 - u_2)$$

Напреженията U_A , u_1 , u_2 , се определят като потенциална разлика спрямо средната точка (0 V) на захранващото напрежение U_0 .

В някои сложни схеми в условното означение липсват захранващите източници!

условно означение



+ неинвертиращ вход
- инвертиращ вход



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Операционен усилвател

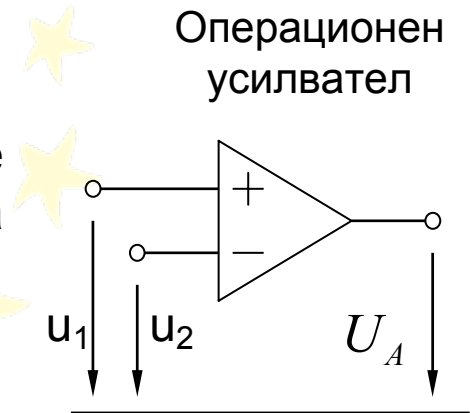
Изходното напрежение U_A не може да бъде по-голямо от захранващото:

$$|U_A| \leq U_0/2$$

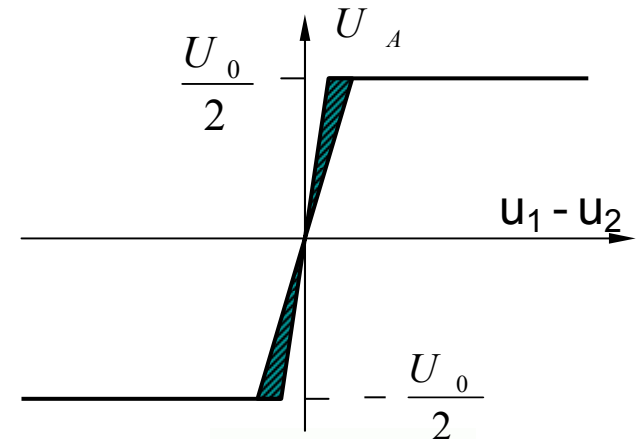
Следователно, при голяма разлика между входните напрежения изходното напрежение има ограничена стойност .

В следващите схеми приемаме:

- Коефициента на усилване по напрежение е много голям ($\rightarrow \infty$).
- Разликата $(u_1 - u_2)$ е пренебрежимо малка ($\rightarrow 0$) (разглеждаме само линейното изменение на изходното напрежение(щтриховано)) .
- Входните токове са пренебрежимо малки ($\rightarrow 0$).
- Вътрешното съпротивление на източниците на напрежение е пренебрежимо малко ($\rightarrow 0$).



характеристика



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Операционен усилвател, неинвертиращ усилвател. Обратна връзка.

Една част от изходния сигнал u_A се връща обратно на входа на усилвателя, паралелно, на инвертиращия вход с цел да се намали изходното напрежение → **Отрицателна обратна връзка по напрежение**.

$$u_A = k_u (u_1 - u_2); \quad u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_A = \beta u_A$$

$$u_A = k(u_1 - \beta u_A) = \frac{k}{(1 + \beta k)} u_1 \quad u_A \approx \frac{u_1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_1 \quad \text{при } \beta k \gg 1$$

Изходното напрежение u_A се определя единствено от параметрите на пасивните елементи, включени във веригата на отрицателната обратна връзка и входната верига

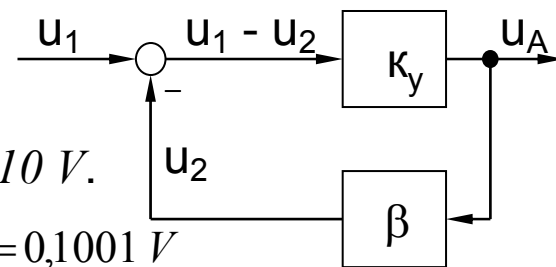
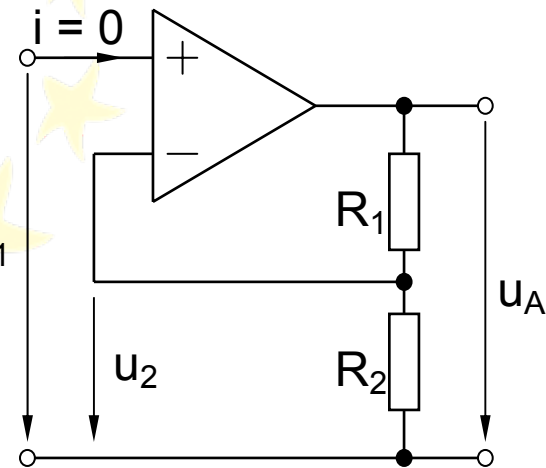
при $k \gg 1$, $u_1 \approx u_2$ примерно: $k = 10^5$, $\beta = 10^{-2}$, $u_{A,max} = 10 \text{ V}$.

$$(u_1 - u_2)_{\max} = \frac{u_{A,\max}}{k} = \frac{10 \text{ V}}{10^5} = 0,1 \text{ mV}$$

$$u_{1,\max} = u_{A,\max} (\beta + 1/k) = 0,1001 \text{ V}$$

$$u_{2,\max} = u_{A,\max} \cdot \beta = 0,1 \text{ V}$$

неинвертиращ усилвател



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

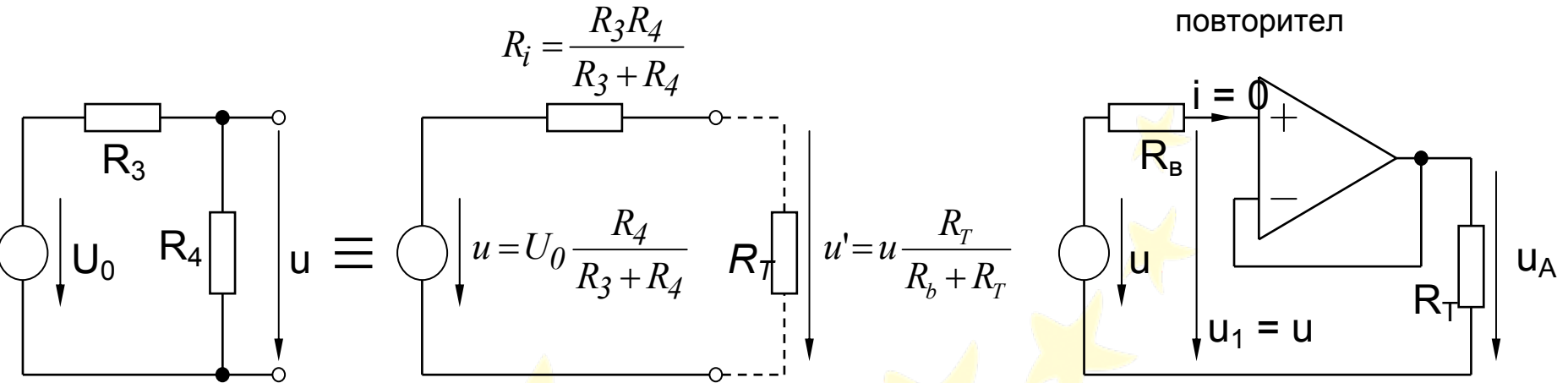
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Повторител с операционен усилвател



Пример : съпротивлението на товара R_T трябва да се включи към изходното напрежение, но без да се оказва влияние на входния сигнал U_0 , който е от маломощен сензор.

→ повторител на напрежение:

Неинвертиращ усилвател с коефициент $\beta = 1$.

Делителят R_1, R_2 в схемата преди се променя като $R_1 \rightarrow 0, R_2 \rightarrow \infty$.

- Източникът на входа практически не се натоварва, на изхода можем да включваме съпротивления с различни стойности, измервателни уреди, други електронни схеми.
- При директно свързване на R_T на делителя на сензора би се променило u на u' .
Посредством буферното звено - повторителя, на изхода след него $u_A = u = u_1$.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Операционен усилвател. Инвертиращ усилвател

Инвертиращ усилвател :

Всяко изменение на входното напрежение предизвиква противоположно по знак изменение на изходното напрежение

$$i_1 + i_2 = 0; \quad \frac{1}{R_1}(u_A - u_2) + \frac{1}{R_2}(u_E - u_2) = 0$$

$$u_A = k_u (u_1 - u_2) = -k_u u_2$$

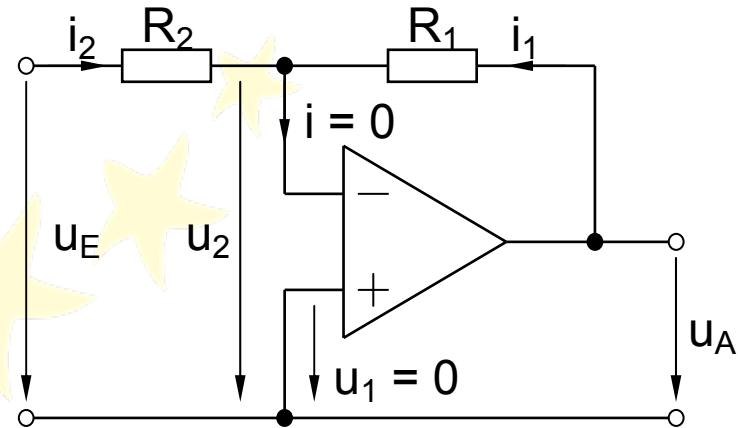
$$\frac{u_A}{R_1} \left[1 + \frac{1}{k_u} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right] + \frac{u_E}{R_2} = 0$$

при $\frac{1}{k_u} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \ll 1$ то $u_A = -\frac{R_1}{R_2} u_E$.Усилване на напрежението със смяна на знака

Тъй като $k_u \gg 1$ то $u_2 \approx u_1 = 0$, а $i_1 \approx u_A/R_1$, $i_2 \approx u_E/R_2$, т.е. Токовете i_1 и i_2 се изчисляват при условието ($u_2 = 0$) съответно $i = 0$.

Тук $u_2 = 0$, входната верига е натоварена с R_2 съответно $i_2 = u_E/R_2$. (за разлика от неинвертиращия усилвател, при който входящия ток е нула)

Инвертиращ усилвател



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Инвертиращ усилвател. Суматор

Суматор:

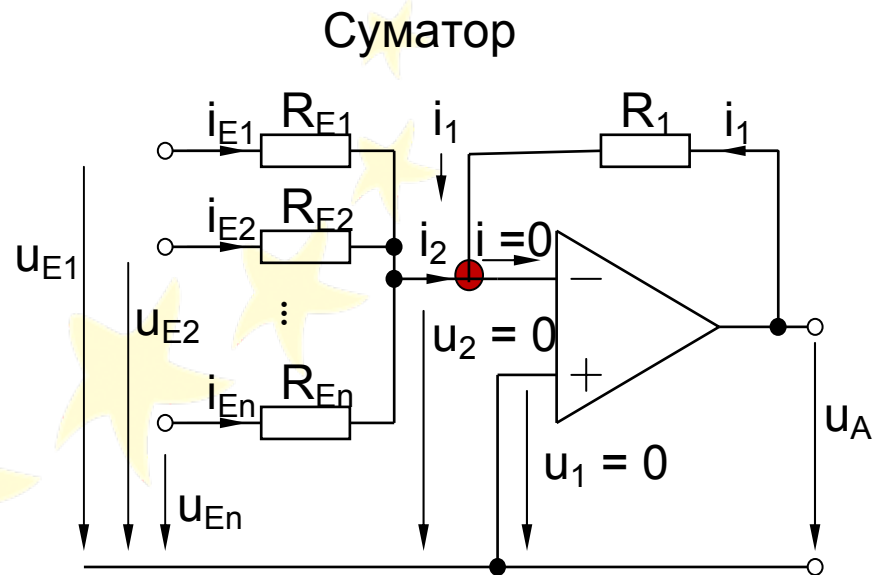
От условието входния ток i на ОУ да е равен на нула следва:

$$i_1 + i_2 = i_1 + \sum_{k=1}^n i_{Ek} = 0$$

Където $i_{Ek} = \frac{u_{Ek}}{R_{Ek}}$, а $i_1 = \frac{u_A}{R_1}$

$$\frac{u_A}{R_1} + \sum_{k=1}^n \frac{u_{Ek}}{R_{Ek}} = 0$$

$$u_A = -R_1 \sum_{k=1}^n \frac{u_{Ek}}{R_{Ek}}$$



Изходното напрежение u_A е с отрицателен знак и е равно на сумата от входните напрежения u_{Ek} . Всяко входно напрежение е умножено със съответен коефициент R_1/R_{ek} .



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Операционен усилвател. Нискочестотен филтър

Вместо резистори R_1 и R_2 могат да се включват комплексни съпротивления.
ООВ е честотно зависима

RC - нискочестотен филтър

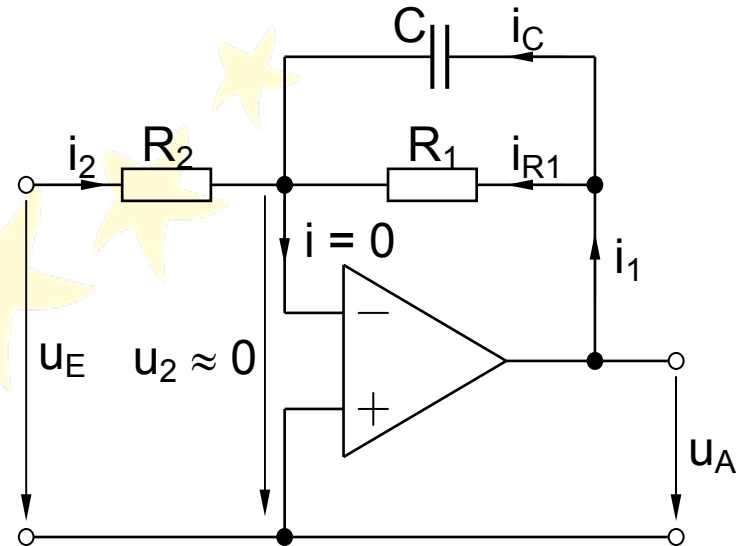
Пример: RC - нискочестотен филтър

$$\underline{u}_2 \approx 0 \quad \underline{i}_2 = \frac{\underline{u}_E}{R_2}$$

$$\underline{i}_1 = \underline{i}_{R1} + \underline{i}_C = \frac{\underline{u}_A}{R_1} + j\omega C \cdot \underline{u}_A$$

От условието $\underline{i}_1 + \underline{i}_2 = 0$ следва:

$$\frac{\underline{u}_A}{\underline{u}_E} = - \frac{\frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + j\omega C} = - \frac{R_1}{R_2} \frac{1}{1 + j\omega R_1 C}$$



Получаваме един RC -нискочестотен филтър, т.е. пропуска сигнали с честоти от нула ($\omega=0$) до граничната честота ($\omega_{гр} = R_1 C$)



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Операционен усилвател. Положителна обратна връзка

Положителна обратна връзка :

Една част от изходното напрежение u_A се връща на неинвертиращия вход на ОУ, така че тази част βu_A със положителен знак като u_1 действа в посока на увеличаване на изходното напрежение .

$$u_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_A = \beta u_A; \quad \beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$u_A = k_u (u_1 - u_2) = k_u (\beta u_A - u_2) = \frac{-k_u}{1 - k_u \beta} u_2$$

$$0 \leq \beta \leq \frac{1}{k_u}$$



$$-\frac{u_A}{u_2} \geq k_u$$

Изходното напрежение нараства

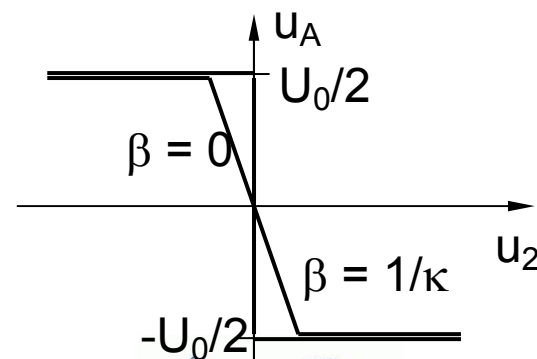
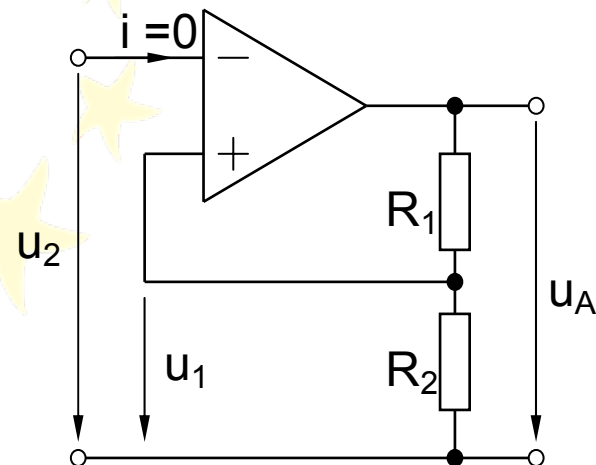
$$\beta = \frac{1}{k_u}$$



$$\frac{u_A}{u_2} = \pm \infty$$

Изходното напрежение нараства до стойностите на насищане

Положителна обратна връзка



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

ОУ. Положителна обратна връзка. Тригер на Шмидт

$\beta > 1/\kappa$: зависимостта $u_A = f(u_2)$ е неопределена :

$$u_A = U_0/2, \quad u_1 = \beta U_0/2; \quad \text{за } -\infty < u_2 < \beta U_0/2 \rightarrow u_1 - u_2 > 0$$

(1) Изходното напрежение е на горната граница $U_0/2$.

$$(2) \quad u_2 = \beta U_0/2 \rightarrow u_1 - u_2 = 0$$

превключване: изходното напрежение със скок преминава в долната гранична стойност $-U_0/2$. Сега $u_1 = -\beta U_0/2$.

$$(3) \quad u_A = -U_0/2, \quad u_1 = -\beta U_0/2; \quad \text{за } \infty < u_2 < -\beta U_0/2 \rightarrow u_1 - u_2 < 0$$

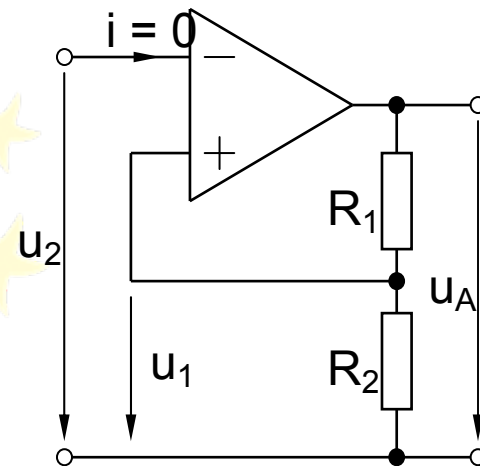
Изходното напрежение остава на долната граница -

$$U_0/2.$$

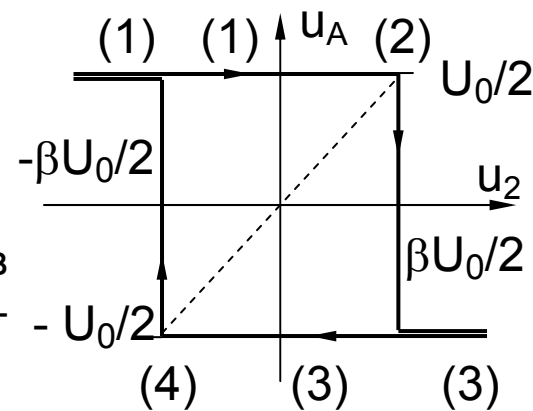
$$(4) \quad u_2 = -\beta U_0/2 \rightarrow u_1 - u_2 = 0$$

Повторно превключване : изходното напрежение със скок преминава в горната гранична стойност $U_0/2$. сега $u_1 = \beta U_0/2$.

Схемата има две устойчиви изходни състояния. Прилага се в генериране на правоъгълни импулси (нарича се Schmitt-Тригер, компаратор с хистерезис, елемент с памет) .



$$\beta > 1/\kappa$$



ПРОЕКТ BG051P0001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции“

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси“, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



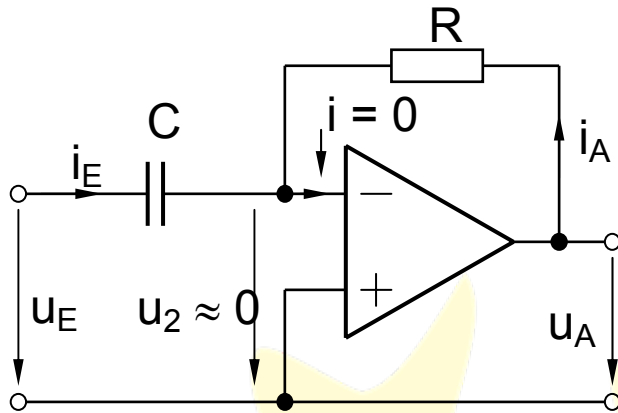
Европейски съюз



Европейски социален фонд

Операционен усилвател. Диференциране на аналогови сигнали

Диференциатор 1

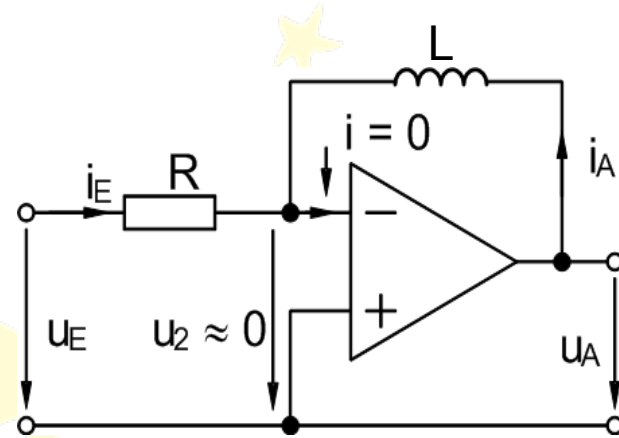


$$i_E = C \frac{du_E}{dt}; \quad i_A = \frac{u_A}{R}$$

$$u_A = -RC \frac{du_E}{dt}$$

и за двата случая важи: $i_E + i_A = 0$

Диференциатор 2



$$i_E = \frac{u_E}{R}; \quad i_A = \frac{1}{L} \int u_A dt$$

$$u_A = -\frac{L}{R} \frac{du_E}{dt}$$

Възможно е включването на резистори последователно към C съответно към L .



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

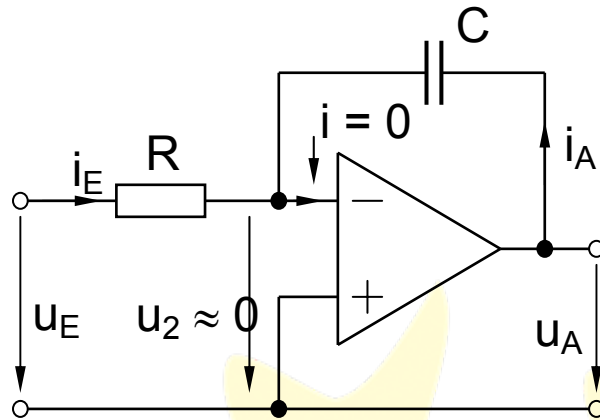
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

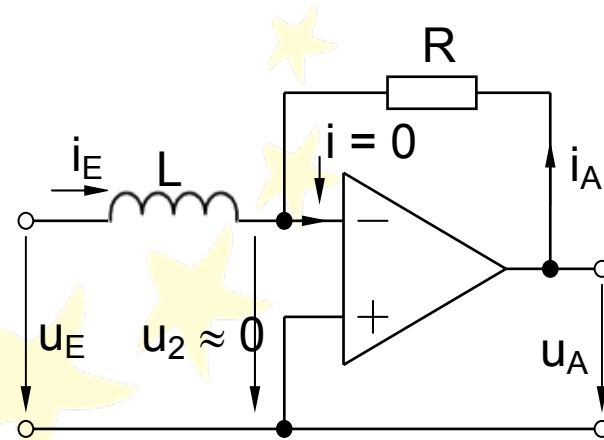
Операционен усилвател. Интегриране на аналогови сигнали

интегратор 1



$$i_E = \frac{u_E}{R}; \quad i_A = C \frac{du_A}{dt}$$

интегратор 2



$$i_E = \frac{1}{L} \int u_E dt; \quad i_A = \frac{u_A}{R}$$

и за двата случая важи : $i_E + i_A = 0$

$$u_A = -\frac{1}{RC} \int u_E dt$$

$$u_A = -\frac{R}{L} \int u_E dt$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



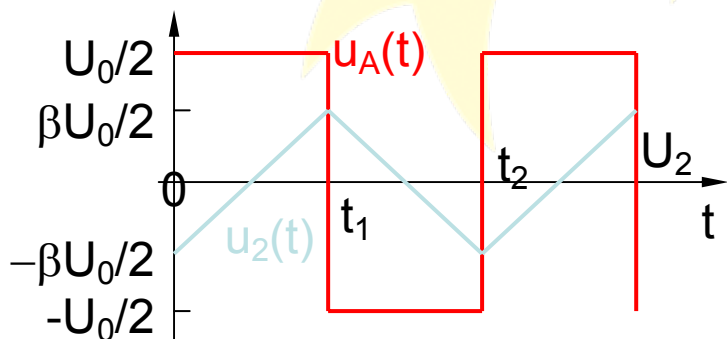
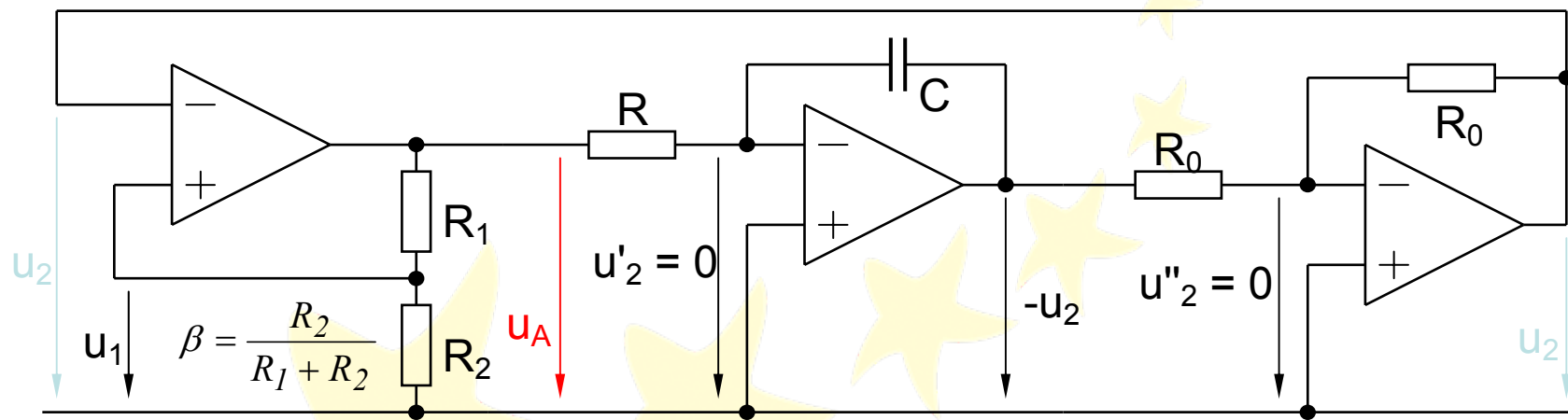
Европейски социален фонд

Приложение на ОУ. Генериране на импулси с триъгълна и правоъгълна форма

Компаратор с хистерезис

интегратор

инвертор



$$u_2 = \frac{1}{RC} \int u_A dt$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051P0001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Приложение на ОУ. Генериране на импулси с триъгълна и правоъгълна форма

(1) $0 \leq t \leq t_1$: $u_A = +U_0/2$, $u_2(t) = u_2(0) + \frac{U_0}{2RC}t$

(2) $t = t_1$: u_2 има положителна стойност
 $u_2(t_1) = \beta U_0/2$.

След това със скок u_A преминава на $u_A = -U_0/2$.

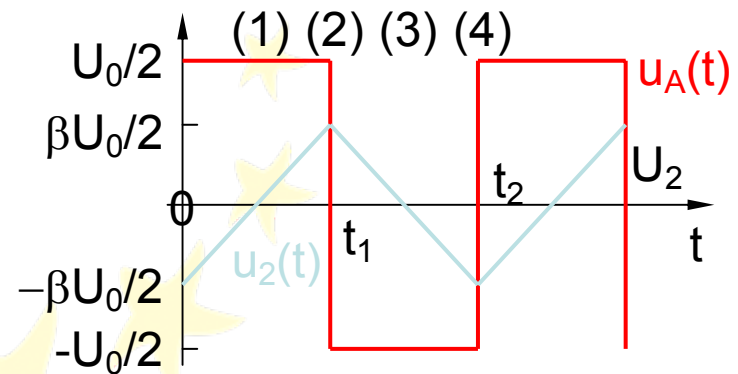
(3) $t_1 \leq t \leq t_2$: $u_A = -U_0/2$, $u_2(t) = u_2(t_1) - \frac{U_0}{2RC}t = \beta \frac{U_0}{2} - \frac{U_0}{2RC}t$

(4) $t = t_2$: u_2 има отрицателна стойност $u_2(t_2) = -\beta U_0/2 = u_2(0)$.
 u_A скача до $u_A = +U_0/2$.

Период T :

$$u_2(t_1) = u_2(0) + \frac{U_0}{2RC}t = -\beta \frac{U_0}{2} + \frac{U_0}{2RC}t_1 = \beta \frac{U_0}{2} \quad \longrightarrow \quad t_1 = 2\beta RC$$

$$u_2(t_2) = \beta \frac{U_0}{2} - \frac{U_0}{2RC}(t_2 - t_1) = -\beta \frac{U_0}{2} \quad \longrightarrow \quad t_2 - t_1 = 2\beta RC \quad \longrightarrow \quad T = t_1 + (t_2 - t_1) = 4\beta RC$$



Европейски съюз

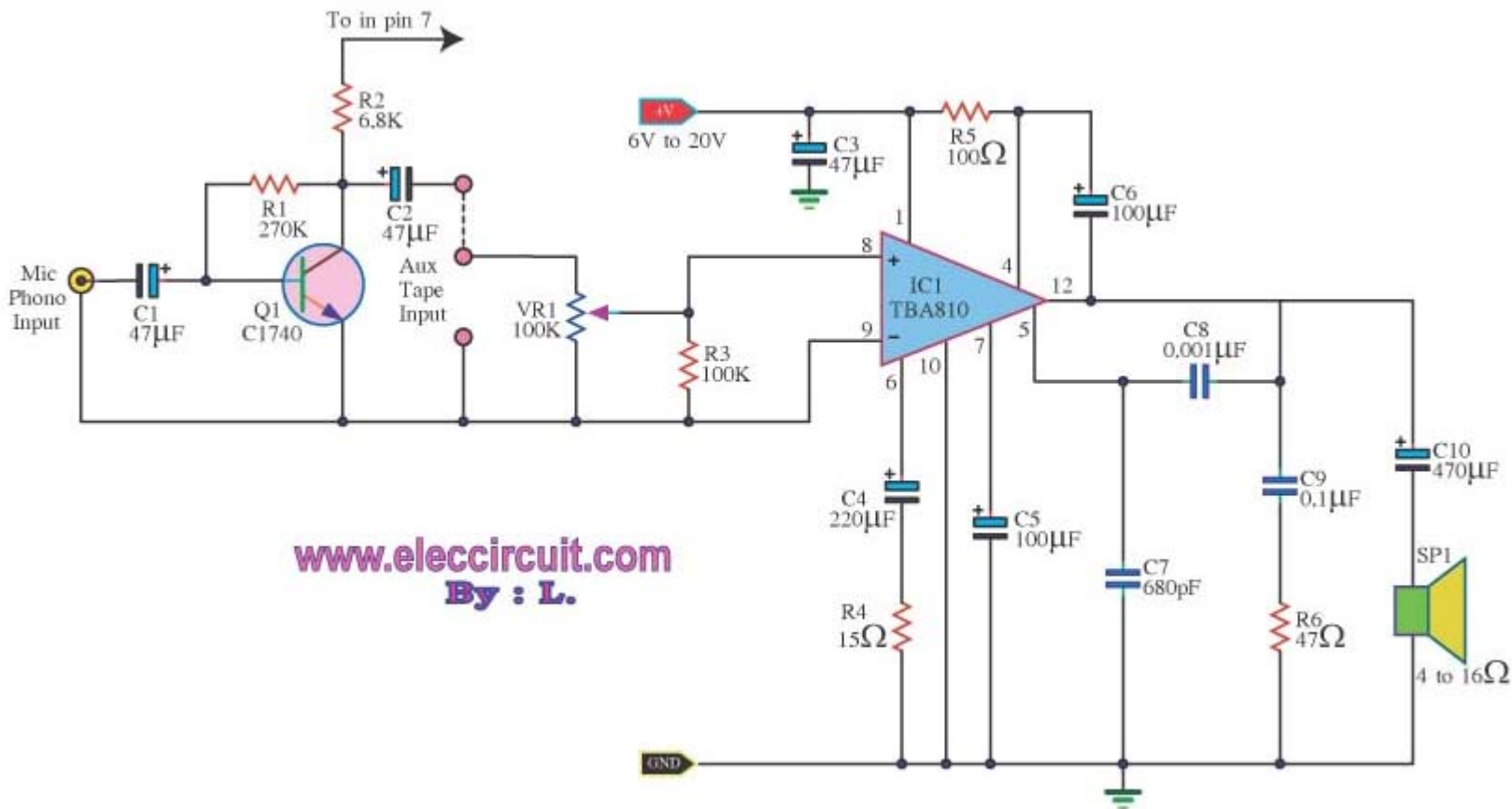
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Литература:

1. http://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_1.html
2. <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0303311.htm>
3. <http://www.eleccircuit.com/wp-content/uploads/2007/07/circuit-power-amp-6w-with-ic-tba810.jpg>
4. <http://www.learnabout-electronics.org/Amplifiers/amplifiers10.php>
5. Основи на електротехниката и електрониката, под ред. на Д.Цветков, Учебник за неелектротехническите специалности на ТУ, част трета, изд. Техника, София, 1989.
6. <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/1501211.htm>

Допълнителна литература:

7. Промислени електронни схеми. Сборник от практически схеми за аналогови и цифрови устройства. Съставители: Гюнтер Клаше, Рудолф Хофер. Стр.225-227 изд. Техника ,София , 1984.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд