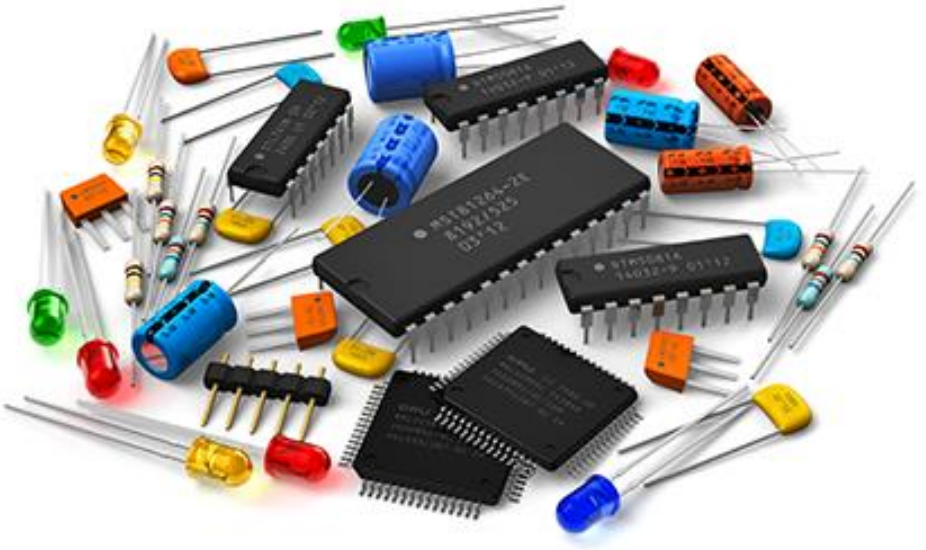
ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika
KET/FYE



Složité polovodičové struktury

Přednáška 7

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

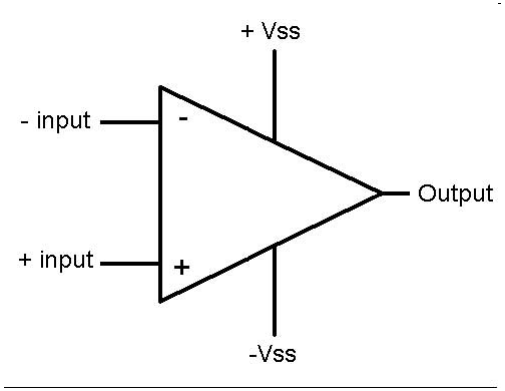
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

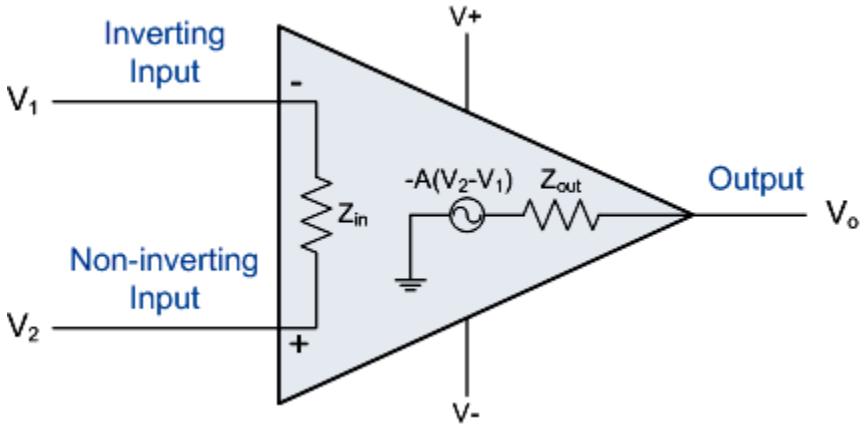
Co se v přednášce dozvíte?

- Dozvíte se, co je ideální a reálný operační zesilovač.
- Zjistíte, jaké jsou důležité parametry a vlastnosti operačních zesilovačů.
- Zjistíte, co vlastně operační zesilovač zesiluje.
- Dozvíte se o základních zapojeních s operačními zesilovači.
- Dozvíte se, co je integrovaný obvod.
- Zjistíte, jak funguje selektivní difuze.
- Dozvíte se, proč nelze elektronické součástky do nekonečna zmenšovat.

Operační zesilovač

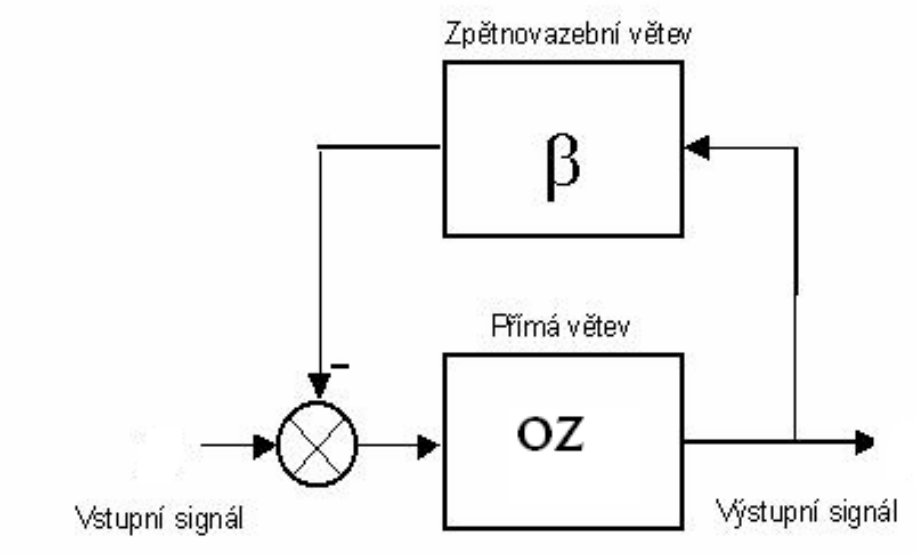
- **symetrický vstup**
- **nesymetrický i symetrický výstup**
- náhradní ekvivalentní obvod
  - vstupní impedance Z_{in}
  - výstupní impedance Z_{out}
  - napěťově řízený zdroj s napěťovým zesilovacím činitelem A
  - vnitřní zpětná vazba





Vnější zpětná vazba

- **část výstupního signálu se přivádí zpět na vstup**
  - **kladná zpětná vazba** – funkční generátory
  - **záporná zpětná vazba** – zesilovače, filtry



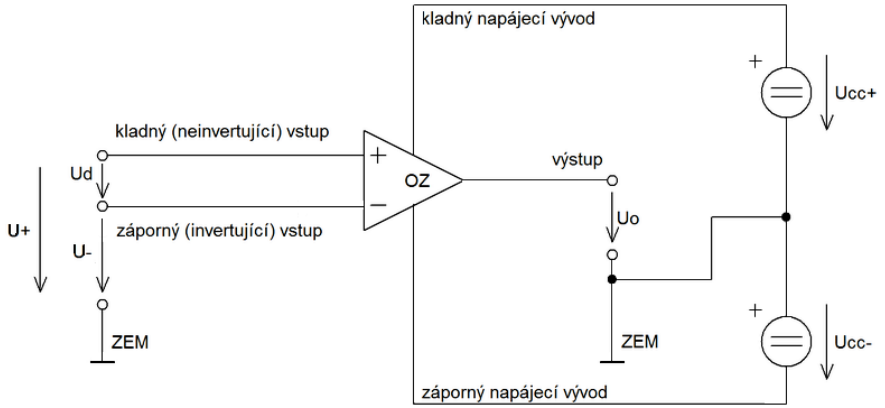
Ideální operační zesilovač

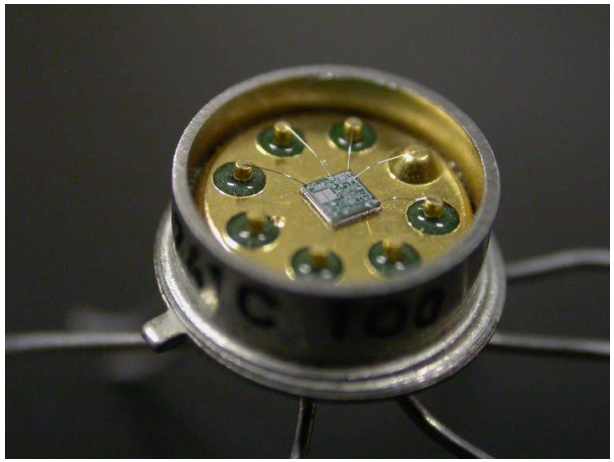
- **$A_i \rightarrow \infty$, $A_u \rightarrow \infty$, $A_P \rightarrow \infty$**
- **$Z_{in} \rightarrow \infty$, $Z_{out} \rightarrow 0$**
- **frekvenční pásmo $f \epsilon <0, \infty)$**
- fázový posun $\pi/2$
- zpětný přenos signálu $\beta=0$
- pro $U_{in}=0$ je $U_{out}=0$ bez ohledu na vnitřní odpor vstupního zdroje

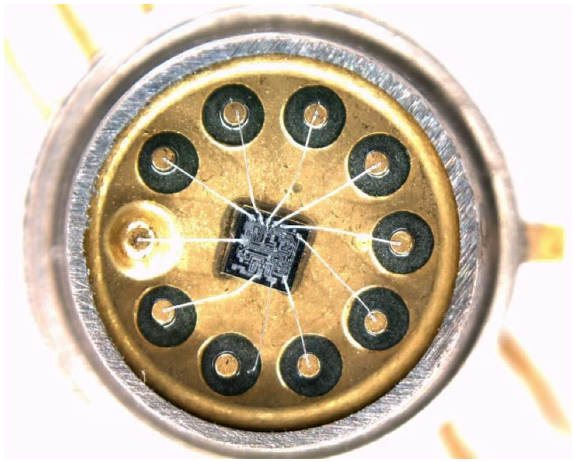
Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=kiiA6WTCQn0

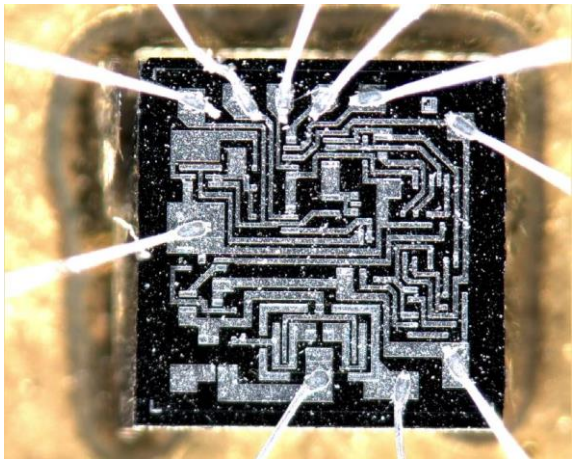
Reálný operační zesilovač

- vstupní obvod OZ – stejnosměrný rozdílový zesilovač
- **symetrické napájení** - zesílení obou polarit proti zemi
- **nesymetrické napájení** – zesílení jen jedné polarity proti zemi

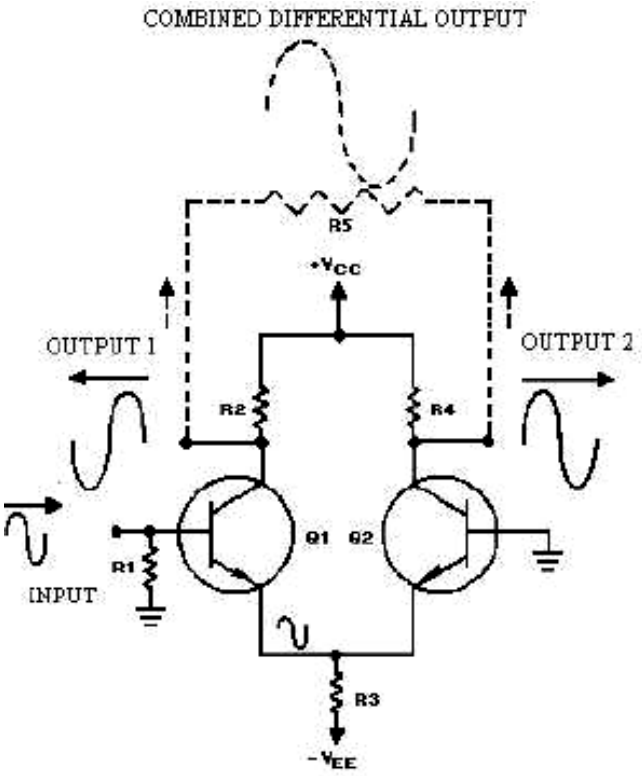


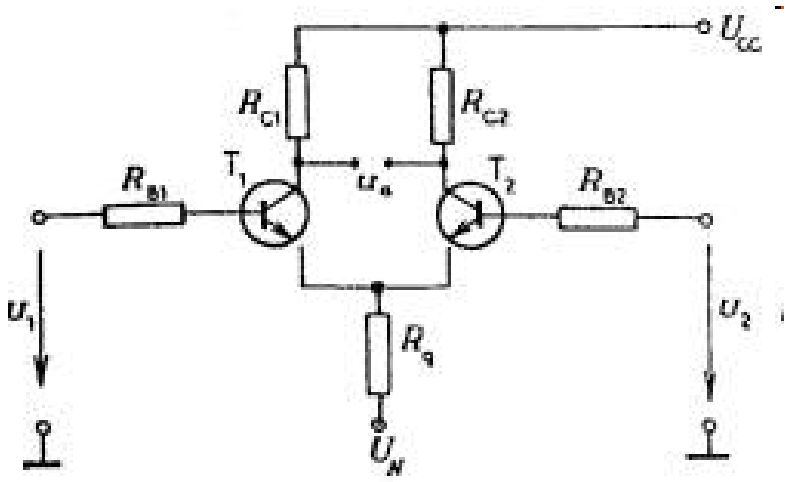






Rozdílový (diferenční) zesilovač





$$u_3 = A(u_1 - u_2)$$

Důležité parametry

- **vstupní klidový proud**
  - proud pro nastavení pracovních bodů tranzistorů na vstupním rozdílovém zesilovači
  - vytváří úbytky napětí na vstupních odporech
  - nelze na vstup připojit kondenzátor – proud přiveden pouze přes odpory
  - nabývá na významu pro strukturu s bipolárními tranzistory

- **proudová nesymetrie vstupů (proudový offset)**
  - rozdíl klidových proudů na vstupu, aby $U_{out}=0$

- **napěťová nesymetrie vstupů (napěťový offset)**
  - ss napětí na vstupu, aby $U_{out}=0$

Důležité parametry

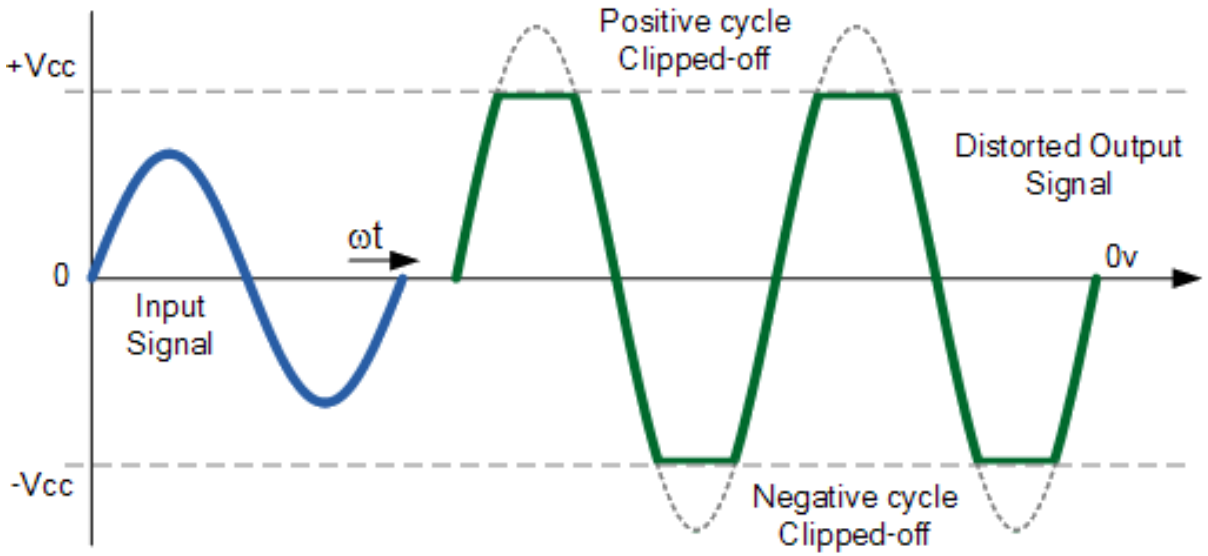
- **drift**
  - zesilovač složen z polovodičových prvků – teplotní závislost
  - změna napěťové nesymetrie s teplotou (µV/°C)
  - změna proudové nesymetrie s teplotou (nA/°C)
  - kompenzace – zapojení odporu mezi neinvertující vstup a zem (pro invertující zapojení)

- **vstupní odpor**
  - OZ na bázi bipolárních tranzistorů – velké proudové zesílení β - menší vstupní odpor (pouze MΩ)
  - lepší řešení pro unipolární tranzistory

- **výstupní odpor**
  - určen konstrukcí koncového stupně
  - ovlivněn zpětnou vazbou zesilovače – zmenšení odporu
  - souvisí z maximálním zatěžovacím proudem – uvedeno v katalogu

Důležité parametry

- **rozkmit výstupního napětí**
  - určeno konstrukcí výstupního obvodu, napájecím napětím a zátěží
  - od určitého vstupního napětí již nereaguje výstupní napětí



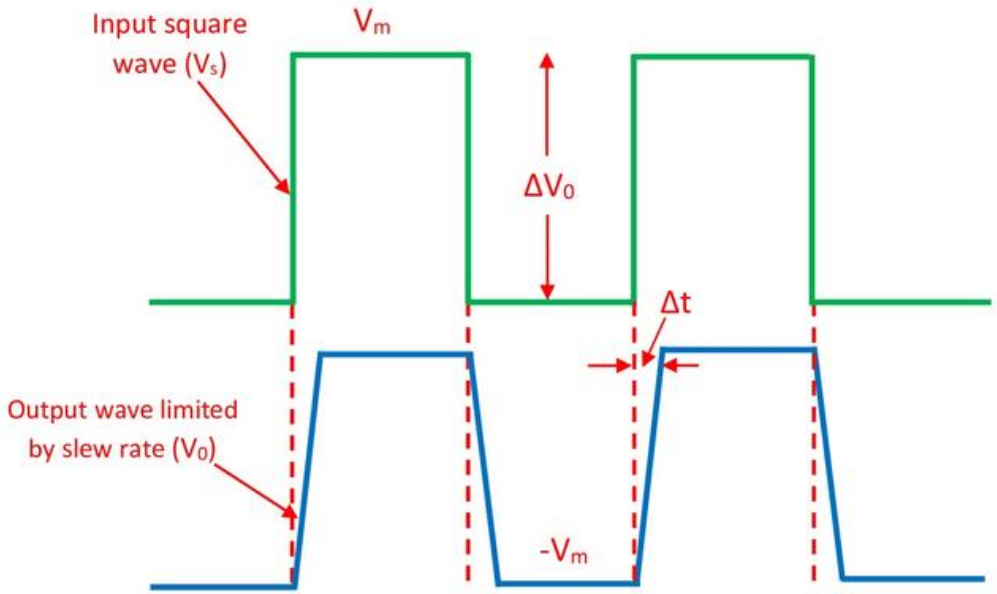
Důležité parametry

- **vstupní napěťový rozsah**
  - ideální OZ – zesiluje rozdílové vstupní napětí pro libovolnou absolutní hodnotu
  - reálný OZ – souhlasné napětí (malý rozdíl vstupního napětí) způsobí nasycení tranzistorů
  - pokles rozdílného napětí pod určitou mez – nasycení dalších tranzistorů
  - saturace vstupních tranzistorů – dále OZ nezesiluje
  - změna režimu (znaménka výstupního napětí) – zablokování činnosti

- **maximální rozdílové napětí**
  - nelze na vstup přivést libovolné rozdílové napětí
  - rozdílné napětí – jeden tranzistor otevřen, druhý uzavřen v rozdílovém zesilovači
  - malé závěrné napětí na tranzistorech – zničení tranzistorů – zničení OZ

Důležité parametry

- **rychlost přeběhu**
  - maximální rychlost změny výstupního napětí pro napěťový skok na vstupu

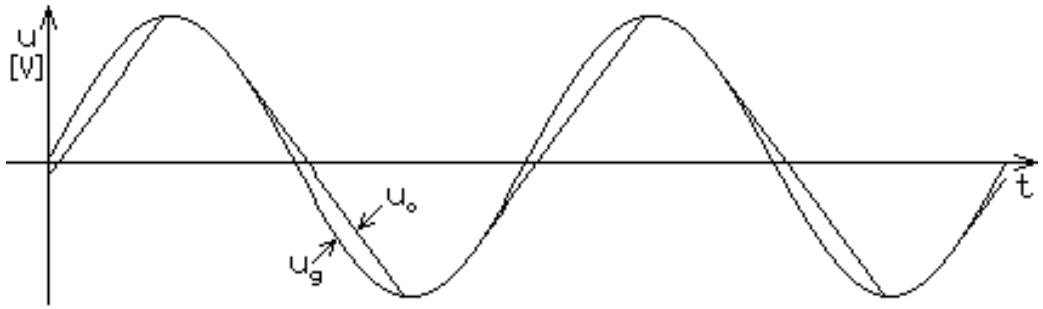


$$S_R = \frac{\Delta U_0}{\Delta t} \quad (V/\mu s)$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=2DFIr6t1hbc

Důležité parametry

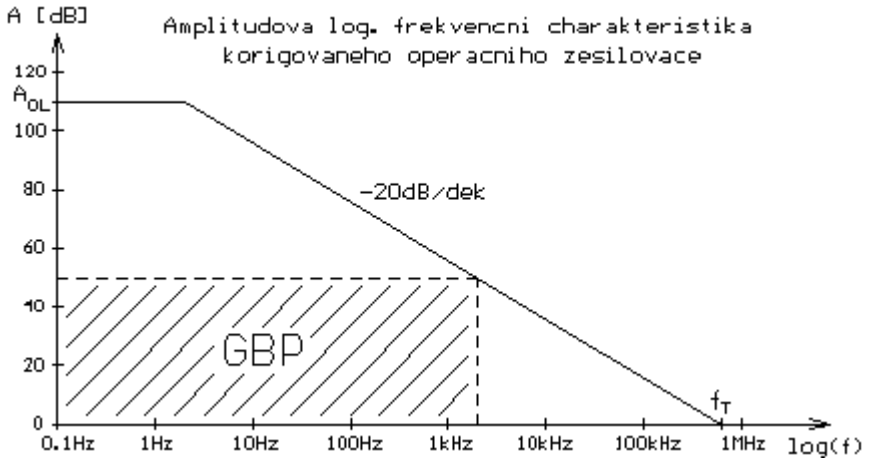
- **mezní výkonový kmitočet f_p**
  - maximální kmitočet, kdy OZ přenese na výstup nezkreslený sinusový signál s amplitudou U_0
  - pro větší kmitočet dochází k deformaci výstupního signálu – trojúhelníkový tvar



$$S_R = 2\pi \cdot U_0 \cdot f_p$$

Důležité parametry

- **frekvenční charakteristika**
  - omezené spektrum
  - tranzitní kmitočet
    - zesílení - 0 dB
    - UGB (Unity Gain Bandwidth) – šířka pásma při jednotkovém zesílení



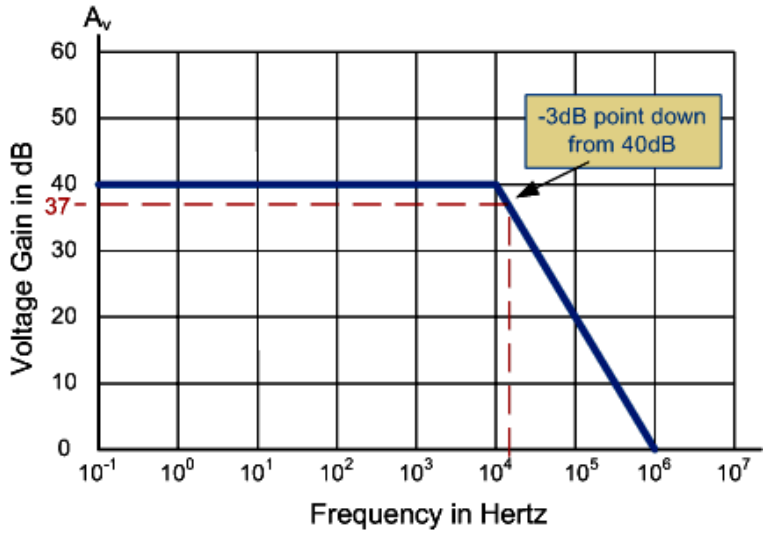
$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

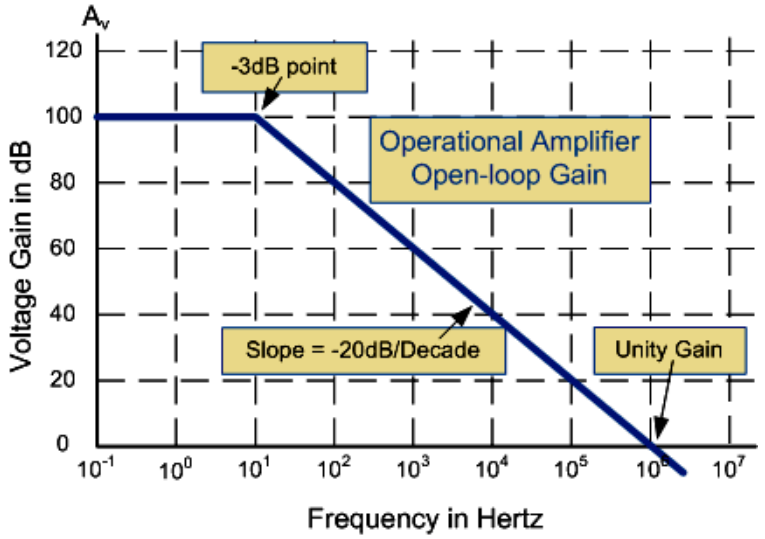
$$A(dB) = 20 \log \frac{u_{out}}{u_{in}} = 20 \log A_u$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=wfkzz1rg-xk

Důležité parametry

- **frekvenční charakteristika**
  - konstrukce OZ – vícestupňové stejnosměrně vázané obvody
  - vazba stupňů – širokopásmový zesilovač (kHz)
  - mezní kmitočet – pokles o více než 3 dB
  - pokles amplitudové charakteristiky velmi strmý (-40 dB/dek.), velká změna fáze → špatná stabilita
  - zlepšení stability – nutný kompenzační prvek (kapacita) – změna sklonu (-20 dB/dek)
  - kompenzační prvek – snížení frekvenčního pásma





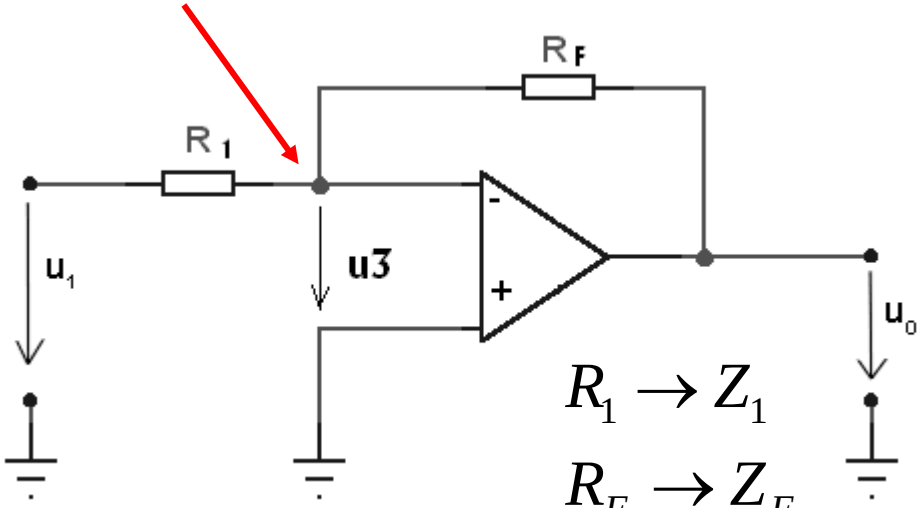
Invertující zapojení

- záporná zpětná vazba
- virtuální nula – $u_3=0$
- zapojení obrací fázi (invertuje vstupní signál)
- $A_u = 1$ - invertor

$$i_1 + i_F - i_z = 0$$

$$Z_{in} \to \infty \Rightarrow i_z = 0$$

$$\frac{u_1 - u_3}{R_1} + \frac{u_0 - u_3}{R_F} = 0$$



$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_0}{R_F} = 0$$

$$A_u = \frac{u_0}{u_1} = -\frac{R_F}{R_1}$$

$$R_1 \to Z_1$$

$$R_F \to Z_F$$

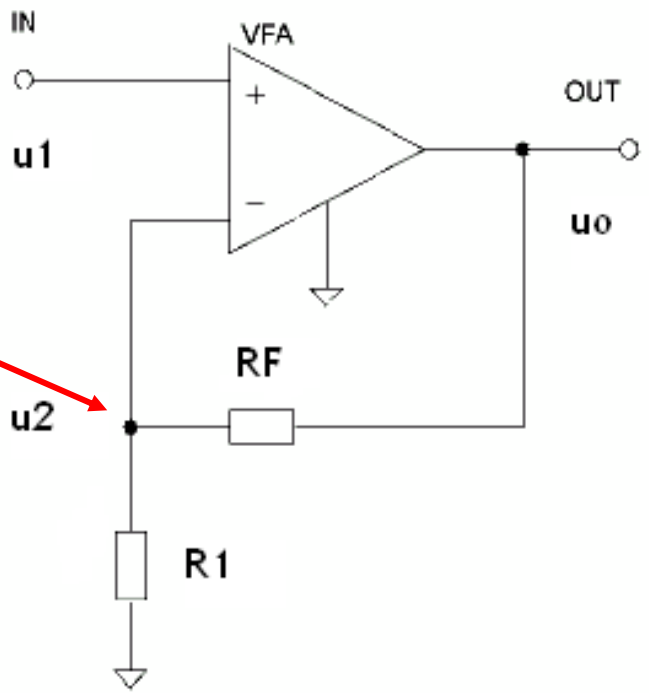
$$A_u = 1 \Rightarrow R_1 = R_F$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=AuZ00cQ0UrE

Neinvertující zapojení

- záporná zpětná vazba
- virtuální nula – $u_3=0$
- zapojení neobrací fázi (neinvertuje vstupní signál)

$$u_2 = \frac{R_1}{R_F + R_1} \cdot u_0$$



$$u_2 - u_3 = u_1 \rightarrow u_2 = u_1$$

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_F} \cdot u_0$$

$$A_u = \frac{u_0}{u_1} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=uyOfonR_rEw

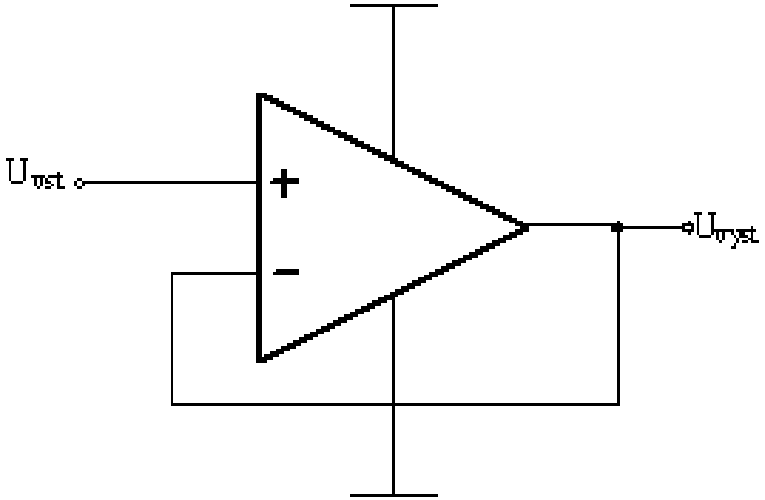
Neinvertující zapojení – napěťový sledovač

- zkrat ve zpětnovazební smyčce - plná zpětná vazba
- neinvertující zesilovač
- neotáčí fázi
- konstantní velikost napětí
- velký vstupní odpor
- malý výstupní odpor

$$A_u = \frac{u_0}{u_1} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

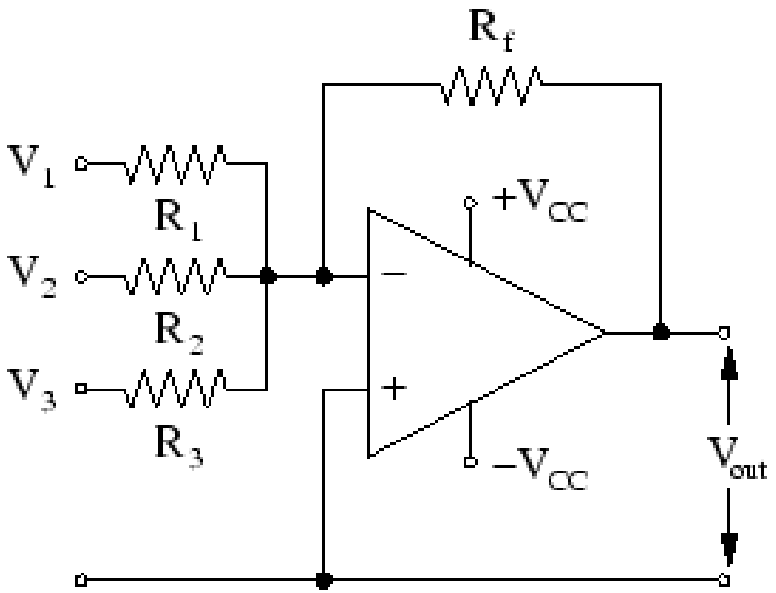
$$R_F = 0 \Rightarrow A_u = 1$$

$$u_{out} = u_{in}$$



Zesilovač součtu napětí

- základ tvoří invertující zapojení OZ
- stejné impedanční poměry jako u invertujícího zapojení



$$\sum_{k=1}^{N} i_{in(k)} + i_F + i_Z = 0$$

$$Z_{in} \to \infty \Rightarrow i_z = 0$$

$$i_F = \frac{u_{out}}{R_F} \qquad i_{in(k)} = \frac{u_{in(k)}}{R_k} \qquad (k = 1....N)$$

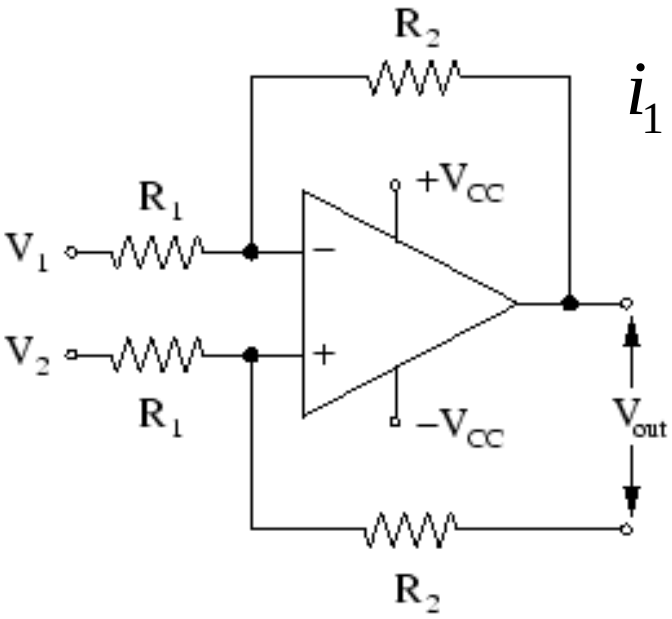
$$u_{out} = -\frac{R_F}{R_k} \sum_{k=1}^{N} u_{in(k)} \qquad pro \quad R_k = R_{k+1}$$

$$u_{out} = -R_F \sum_{k=1}^{N} \frac{u_{in(k)}}{R_k}$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=jsKSfaFQ4d4

Zesilovač rozdílu napětí

- jedno napětí na invertujícím vstupu
- druhé napětí na neinvertujícím vstupu



$$i_1 + i_F + i_z = 0 \qquad Z_{in} \to \infty \Rightarrow i_z = 0$$

$$i_1 = \frac{u_1 - u_+}{R_1} \qquad i_F = \frac{u_{out} - u_+}{R_2}$$

$$\frac{u_1 - u_+}{R_1} + \frac{u_{out} - u_+}{R_2} = 0$$

$$u_{out} = -\frac{R_2(u_1 - u_+)}{R_1} + u_+ = \frac{R_2}{R_1}(u_2 - u_1)$$

$$u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_2$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=ltVspUteuuI

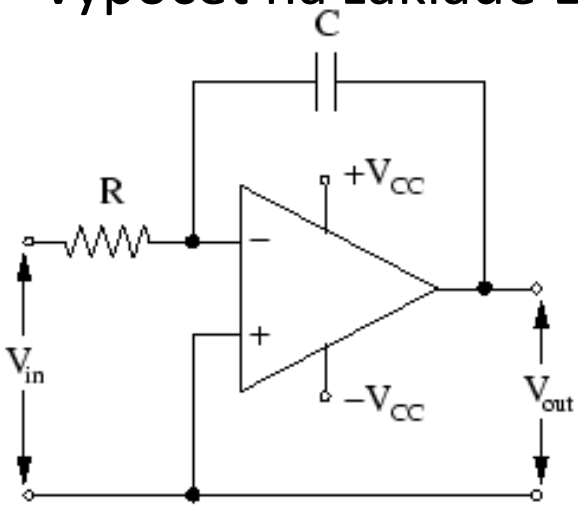
Integrační zesilovač

- zesilovač integrálu napětí
- invertující zapojení
- nahrazení odporů obecnými impedancemi
- výpočet na základě Laplaceova obrazu

$$R_1 \rightarrow Z_1 \qquad Z_1 = R$$

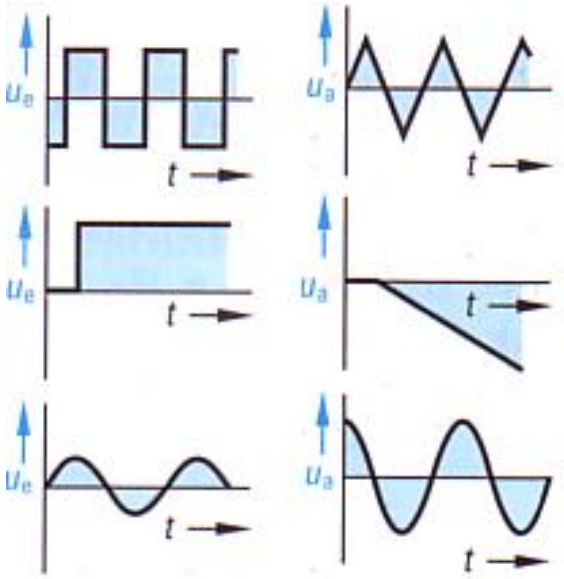
$$R_F \rightarrow Z_F \qquad Z_F = \frac{1}{pC}$$

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}} = -\frac{1}{pCR}$$



stejná funkce pro cívku na vstupu

$Z_F = R \quad Z_1 = pL$



$$u_{out} = -\frac{1}{CR}\cdot\frac{1}{p}\cdot u_{in} \Rightarrow u_{out}(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t u_{in}(t)dt + U_0$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=OPvs7A554Rw

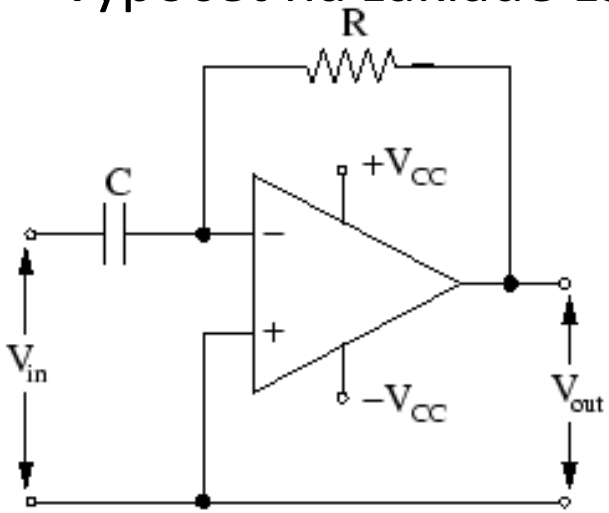
Derivační zesilovač

- zesilovač derivace napětí
- invertující zapojení
- nahrazení odporů obecnými impedancemi
- výpočet na základě Laplaceova obrazu

$$R_1 \rightarrow Z_1 \qquad Z_F = R$$

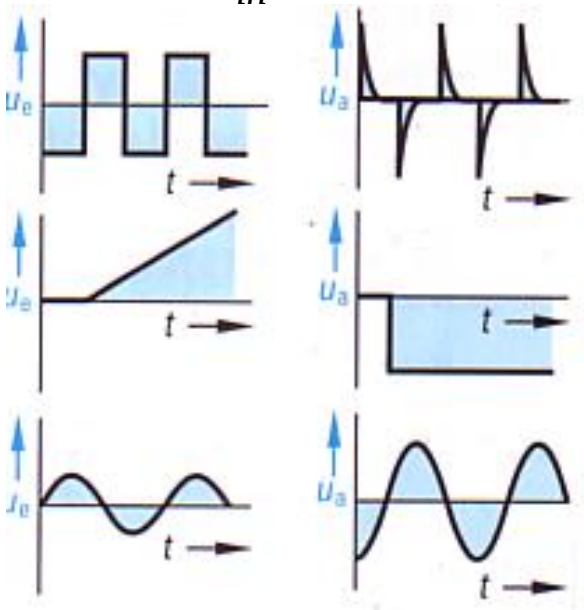
$$R_F \rightarrow Z_F \qquad Z_1 = \frac{1}{pC}$$

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}} = -pCR$$



stejná funkce pro cívku na vstupu

Z_F = pL Z_1 = R

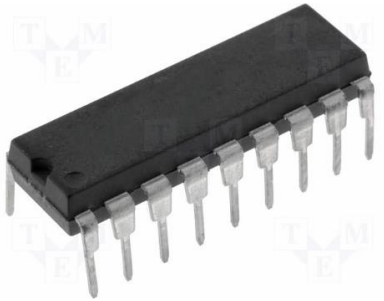


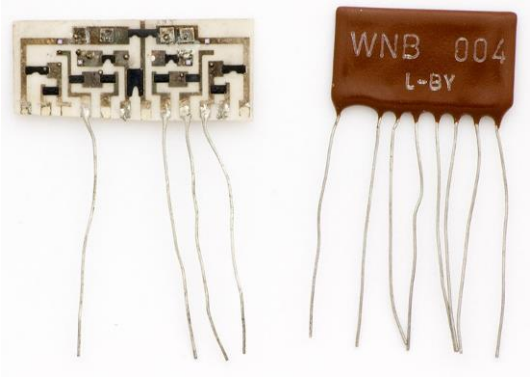
$$u_{out} = -pCRu_{in} = -RC\frac{du_{in}}{dt}$$

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=aU24RWlgJVs

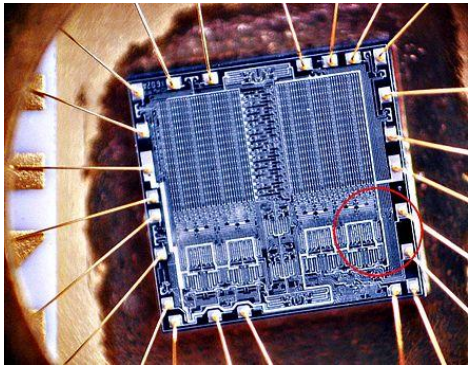
Integrované obvody

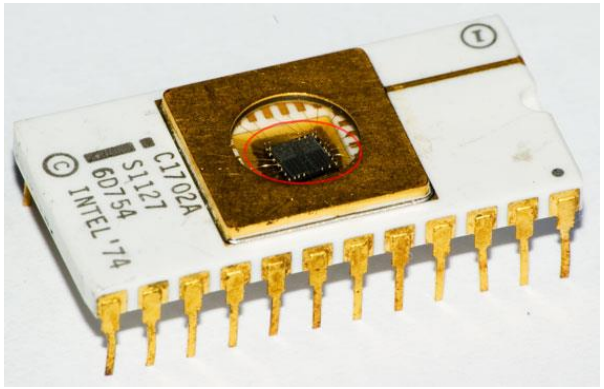
- **integrované funkční obvody**
  - pro návrháře obvod
  - pro uživatele součástka
- **pájení menšího počtu vývodů**
- **zabírá menší prostor na DPS** pro stejnou funkci než klasické součástky
- jedna součástka špatná → celý obvod špatný
- **vysoká sériovost**
  - vysoké náklady na návrh
    - nutná minimalizace – snížení nákladů
    - nutná univerzálnost – snížení nákladů



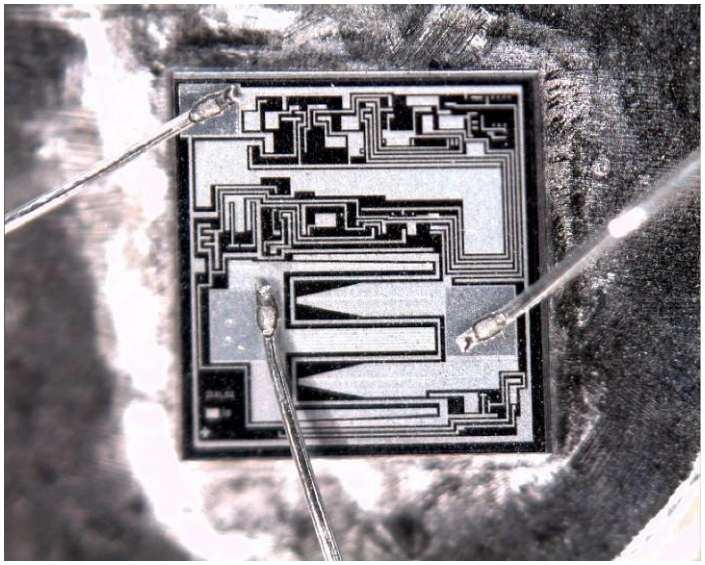


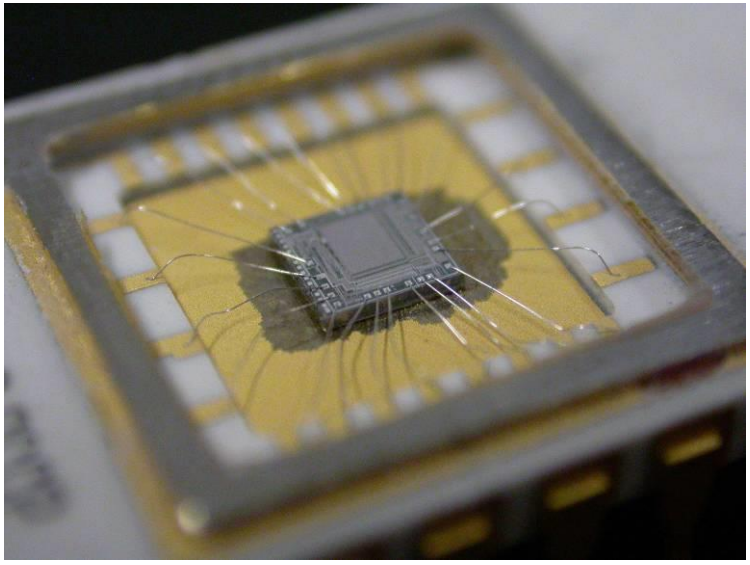
- **integrace - nejedná se o zmenšení čipu**
  - nelze dále zmenšovat kvůli vývodům
- nejdůležitější parametr - **hustota součástek na stejné ploše**
  - ??? 10 nebo 10^7 součástek ???
- **vysoká spolehlivost**
  - snižuje chybovost
- všechny součástky nelze realizovat v IO
  - rezistor – lze
  - kondenzátor – lze (většinou realizováno pomocí varikapů)
  - induktor – nelze (nelze realizovat součástku, kde napětí předbíhá proud
  - polovodičové součástky - lze

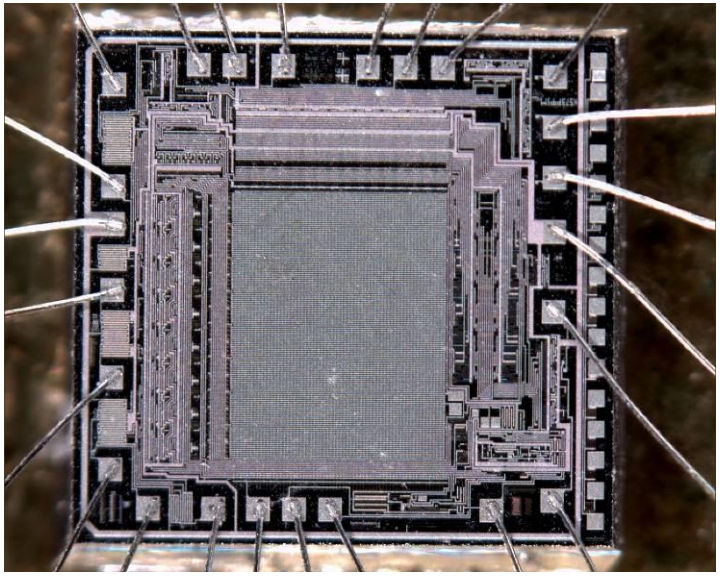










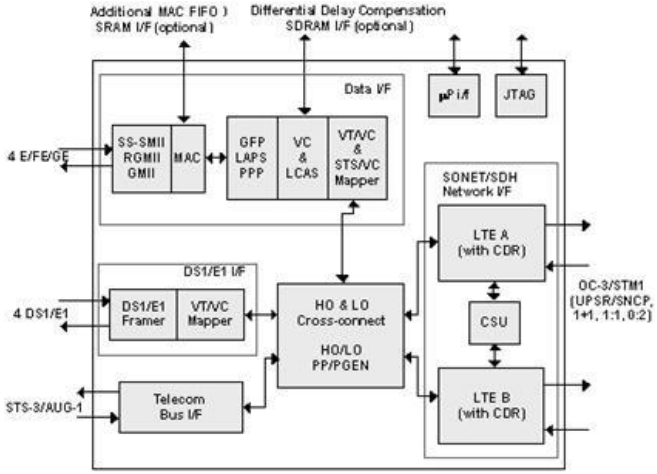


- **omezení součástek z hlediska hodnot**
  - lze realizovat velký rozsah hodnot

- **omezení součástek z hlediska přesnosti**
  - nejlepší přesnost v IO – 10%
  - vliv přesnosti – nesmí dojít ke změně charakteru součástky
  - teorie tolerancí a citlivosti

- **návrh přesahuje koordinační schopnosti člověka**
  - nutné využití CAD systémů

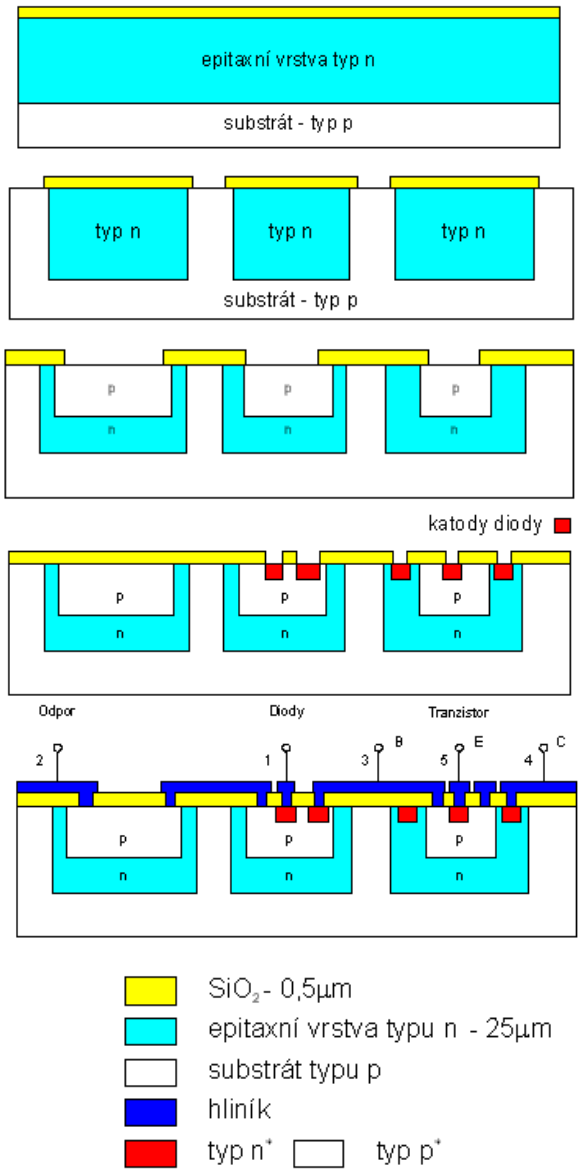




Selektivní difuze

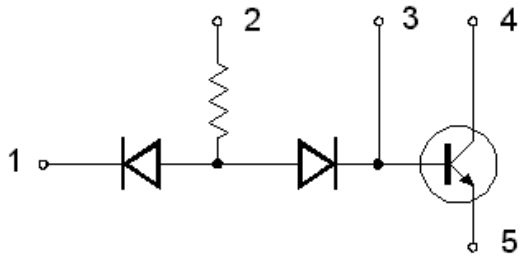
- **planární výrobní technologie**
- **střídají se ostrůvky N a P**
- **působení teploty a tlaku**
- velice náhodný proces
- max. 3 difúze – dochází vždy k narušení předcházející difúze

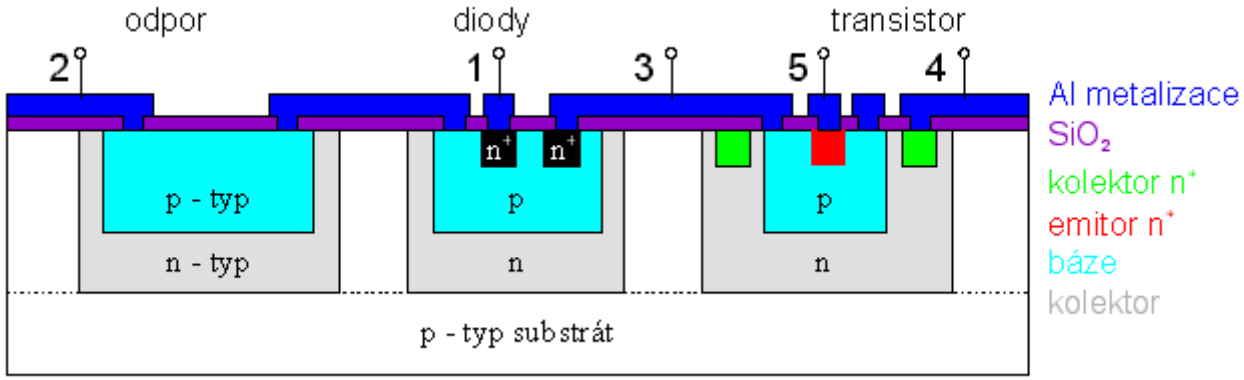
- **vytvoření struktury**
  - základní křemíková destička
  - vrstva izolantu – SiO2
  - fotorezist
  - maska s motivem
- proleptání až na základní Si – pomocí difúze se dotuje na N
- opakování procesu – dotování na P



Selektivní difuze

- vytvoření jednotlivých okének pomocí **fotolitografie**
  - osvícení fotorezistu přes šablonu
- **více součástek → menší okénka**
- **nelze vyleptat přesné hrany – závisí na rozptylu, ohybu a vlnové délce použitého světla**
  - nejmenší rozměr okénka $d >> \lambda$
  - otřepy na hranách – závisí na vlnové délce
  - nelze osvěcovat viditelným světlem – co nejmenší vlnová délka – UV (rentgenové záření)





Meze integrace

- **konečná tloušťka PN přechodu**
  - omezení na Debyeho délku
  - každá součástka musí být větší než Debyeho délka

$$L_D = \frac{1}{e}\sqrt{\frac{\varepsilon kT}{n+p}}$$

- **zákon velkých čísel**
  - v Si je n konstanta
  - menší objem → menší počet skutečného počtu elektronů
  - nutné velké množství elektronů – zákon velkých čísel
  - malá čísla – velký rozptyl – 2 součástky nebudou shodné
  - objem lze snižovat jen do určité meze
  - nutné velké N pro co nejmenší rozptyl – shodnost parametrů dvou stejných součástek

$$N = nV \qquad n = \frac{N}{V}$$

n – koncentrace elektronů
V – objem
N – skutečný počet elektronů

- **Heissenbergova relace neurčitosti**
  - některé veličiny nejde měřit současně
  - čím těžší částice, tím lepší
  - báze musí být dostatečně velká

$$m\Delta v\Delta x > h \qquad \Delta p = m\Delta v$$

$$\Delta x > \frac{h}{m\Delta v} \qquad \Delta x << d_B$$

m – hmotnost
v – rychlost
x – dráha
p – hybnost
h – Planckova konstanta
d_B – šířka báze

Kontrolní otázky

- Jaký je rozdíl mezi ideálním a reálným operačním zesilovačem?
- Co je rychlost přeběhu?
- Nakreslete frekvenční charakteristiku operačního zesilovače.
- Nakreslete a vysvětlete invertující zapojení operačního zesilovače.
- Nakreslete a vysvětlete neinvertující zapojení operačního zesilovače.
- Nakreslete a vysvětlete integrační a derivační zapojení operačního zesilovače.
- Vysvětlete princip selektivní difuze.
- Jaké jsou meze integrace?



Použitá literatura

- Musil, V.: **Elektronické součástky.** VUT Brno, 2005, ISBN 80-214-2627-6
- Vaníček, F.: **Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely.** ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-03112-8
- Jerhot, J.: **Elektronické součástky a zesilovače.** VŠSE Plzeň, 1979
- FOIT, J.; HUDEC, L.: **Základy elektroniky.** ČVUT v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04236-6
- Vobecký, J.; Záhlava, V.: **Elektronika : součástky a obvody, principy a příklady.** Grada Publishing, 2005, ISBN 80-247-1241-5
- Sze, S.M.; Kwok, K.Ng.: **Physics of semiconductor devices.** Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0-471-14323-9
- Kasap, S.O.: **Principles of electronic materials and devices.** McGraw-Hill, 2006, ISBN 0-07-124458-1
- Schroder, D.K.: **Semiconductor material and device characterization.** John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73906-5