



Elektronika a Mikroelektronika A4B34EM

11. přednáška

- Optoelektronické součástky
- Operační zesilovač
- Komparátor
- A/D a D/A převodníky



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Optoelektronické součástky

- Elektroluminiscenční dioda či LED
- Laserová polovodičová dioda
- Fotodioda
- Fotoodpor



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Absorpce a emise fotonu

- Interakce záření a hmoty probíhá těmito mechanismy:

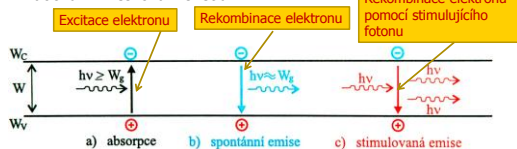
- *Absorpce* (záření musí mít vlnovou délku $\lambda < 1.24/W_g$)

- *Spontánní emise*

- zářivý přechod – emise fotonu
- nezářivý přechod – tepelná energie

- *Stimulovaná emise* – *koherentní záření*

- dochází k zesilování světla

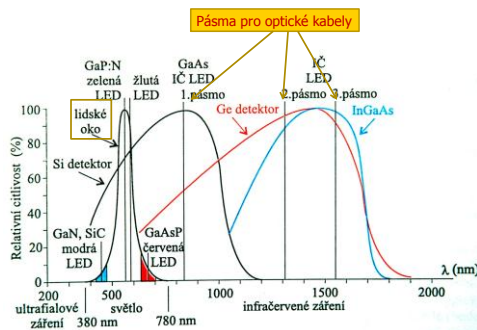


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Spektrální citlivost

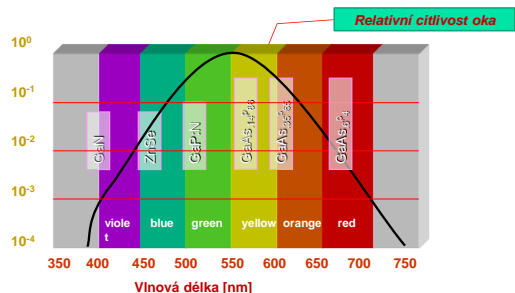
- s



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Materiály LED pro různé vlnové délky vyzařovaných fotonů



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Elektroluminiscenční dioda - LED

- Elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P-N.
- Světlo vzniká v oblasti p-n přechodu polovodičového materiálu
- Prochází-li přechodem elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje (emituje) nekoherentní světlo s úzkým spektrem.
- Může emitovat i jiné druhy záření.
- Tento jev je způsoben elektroluminiscencí.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



LED dioda - zapojení



Schematická značka ledky.

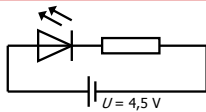
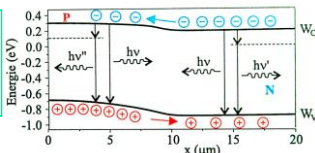


Schéma zapojení ledky do elektrického obvodu.

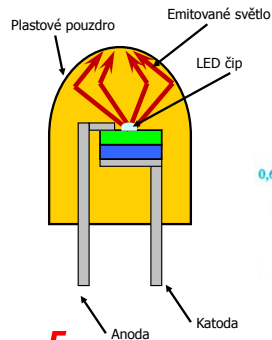
Energie elektronu se uvolní ve formě fotonu
K přechodu může dojít i prostřednictvím příměsových hladin
Emitované záření má o něco nižší energii



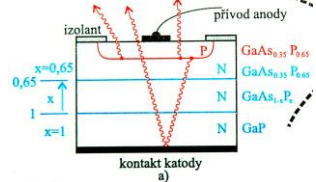
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



LED dioda - Konstrukce



LED čip



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Výhody LED diody

- Dlouhá životnost až 20 let
- Nízké náklady na údržbu
- Nízká spotřeba energie
- Variabilita v rozlišení a barevnosti
- Nastavitelnost jasu podle světelných podmínek
- Dobrá viditelnost i na přímém slunci
- Různé pozorovací úhly a vzdálenosti



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Materiály LED pro různé vlnové délky vyzařovaných fotonů

Barva	Vlnová délka (nm)	Struktura LED
Infračervená	880	GaAlAs/GaAs
Ultra červená	660	GaAlAs/GaAlAs
Super červená	633	AlGaInP
oranžová	605	GaAsP/GaP
žlutá	585	GaAsP/GaP
Přirozeně bílá	4500K (CT)	InGaN/SiC
Studená bílá	8000K (CT)	InGaN/SiC
Zelená	555	GaP/GaP
Modrá	470	GaN/SiC
Fialová	430	GaN/SiC
Ultrafialová	395	InGaN/SiC



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Materiály LED pro různé vlnové délky vyzařovaných fotonů

Materiál	Vlnová délka (μm)	Materiál	Vlnová délka (μm)
ZnS	0.33	GaAs	0.84-0.95
ZnO	0.37	InP	0.91
GaN	0.40	GaSb	1.55
ZnSe	0.46	InAs	3.1
CdS	0.49	Te	3.72
ZnTe	0.53	PbS	4.3
GaSe	0.59	InSb	5.2
CdSe	0.675	PbTe	6.5
CdTe	0.785	PbSe	8.5

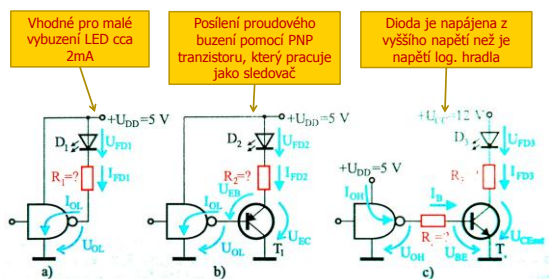


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Příklad praktických zapojení

■ S



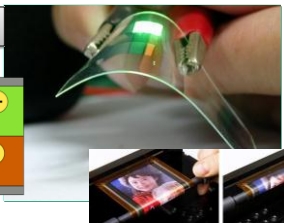
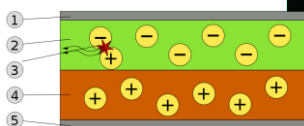
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Organické LED - OLED

- OLED - (zkratka anglického Organic light-emitting diode) je typ využívající technologii organických elektroluminiscenčních diod.
- Mezi průhlednou anodou a kovovou katodou je několik vrstev organické látky.
- Jsou to vrstvy vypuzující díry, přenášející díry, vyzařovací vrstva a vrstva přenášející elektrony.

Katoda (-), 2. Emisivní vrstva, 3. Emise fotonů, 4. Vodivá vrstva, 5. Anoda (+)

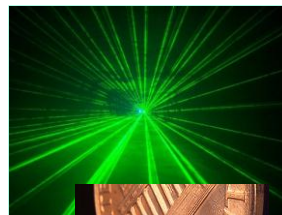


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Laserová dioda

- Laserová dioda (polovodičový laser) je polovodičová dioda, na jejímž PN přechodu dochází k přeměně elektrické energie na světlo.
- Prvním, kdo demonstroval emisi koherentního světla z polovodiče byl v roce 1962 Robert N. Hall

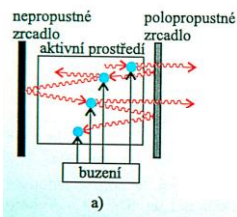


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Zdroje koherentního záření

- Pro vznik koherentního záření musí být splněno:
 - Velké zesílení fotonů pomocí stimulované emise v aktivním prostředí
 - Existence kladné zpětné vazby, která zajistí, aby část fotonů zůstala v aktivním prostředí – Fabry-Perotův rezonátor. U laserových diod plní roli zrcadel odštěpní krystalu v krystalografických rovinách
 - Stimulovaná emise musí dominovat nad absorpcí. Více nosičů musí být ve vodivostním pásu.



Fabry-Perotův rezonátor

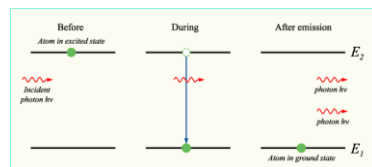


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Laserová dioda

- Laserová dioda je polovodičová dioda, na jejímž PN přechodu dochází k přeměně elektrické energie na světlo
- Na rozdíl od LED diod má světlo výrazně užší spektrum a je koherentní
- Funkce laserové diody je založena na procesu stimulované emise
- Stimulovaná emise je kvantový jev, při kterém dopadající částice (nejčastěji foton) stimuluje přechod excitovaného elektronu do základního stavu za současného vyzáření částice o stejných vlastnostech jako má částice stimulující.

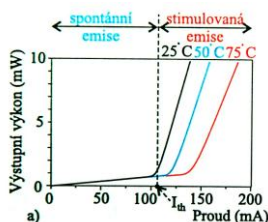


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Watt-ampérová charakteristika laseru

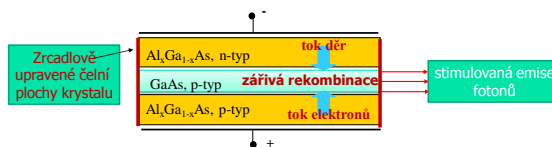
- Pod hodnotou prahového proudu dochází pouze ke spontánní emisi a tedy ke generaci nekoherentního záření, naopak s proudem, který dosáhne kýžené hodnoty, prudce vzrůstá výkon diody a dochází ke stimulované emisi a produkuje se koherentní záření.
- U laserových diod plní roli zrcadel odštěpní krystalu v krystalografických rovinách



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Polovodičový laser



- Vnější napětí způsobí, že se v opticky aktivní vrstvě krystalu GaAs nahromadí velké množství elektronů a děr (s dostatečně dlouhou dobou života), které spolu mohou rekombinovat převážně jen zářivými přechody.
- Zrcadlově upravené čelní plochy krystalu vytvářejí planparalelní optický rezonátor délky asi 1 mm a vznikne stimulovaná emise fotonů.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Vlastnosti a použití

- vysoká účinnost
- možnost modulace o frekvencích řádu GHz
- možnosti použití v integrovaných obvodech
- Použití v telekomunikacích v optických vlnovodech
- laserovým měřičích vzdáleností
- rychlý tisk s vysokým rozlišením v laserových tiskárnách
- Infračervené a červené laserové diody v CD a DVD přehrávačích, fialové u HD DVD a Blu-ray technologiích
- Vysokovýkonové laserové diody se uplatňují v průmyslových oblastech k řezání, obrábění, svařování



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Optické detektory

- Fotodetektory rozdělení:
 - **Fotovodivostní** (záření mění měrnou vodivost polovodiče)
 - **Fotovoltaické** (záření generuje napětí na elektrodách součástky)
 - **Fotoemistní** (záření způsobuje emisi elektronů z tzv. emitéru do vakua)
- Fotorezistor
- Fotodioda
- Fototranzistor

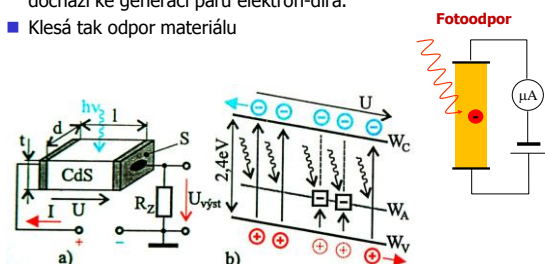


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Fotorezistor

- Fotovodivostní princip
- Dopadá-li na homogenně dotovaný polovodič (např. N) světlo, dochází ke generaci páru elektron-díra.
- Klesá tak odpor materiálu

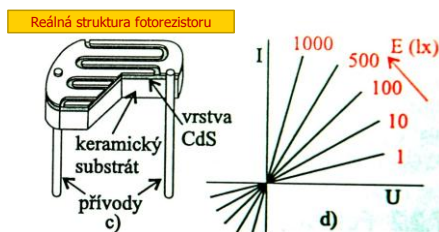


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Fotorezistor

- V-A charakteristika – přibližně logaritmická závislost odporu na osvětlení
- Spektrální citlivost CdS fotorezistoru je $\lambda_{\text{max}}=515\text{nm}$ a odpovídá citlivosti lidského oka

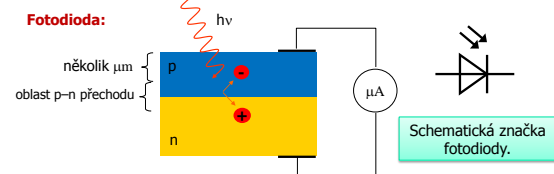


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Polovodičová fotodioda

- Fotovoltaický princip
- Nejvíce rozšířený fotodetektor (linearita, nízký šum)



Foton pronikne k oblasti p-n přechodu kde absorbuje a vygeneruje pár elektron – díra. Tímto procesem, kterému se říká **vnitřní fotoefekt**, vznikne elektrický proud. Důležitou roli zde hraje i závislost absorpce na λ .

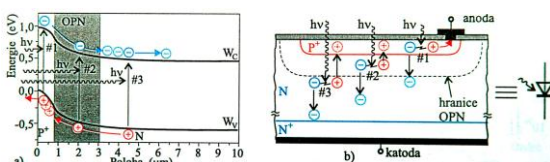


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Polovodičová fotodioda

- Co nejvíce záření je absorbováno v OPN – pár elektron-díra
- Fotovoltaický jev – vzniká při zapojení FD naprázdno
 - viz další snímek



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Režimy polovodičové fotodiody

Fotovoltaický

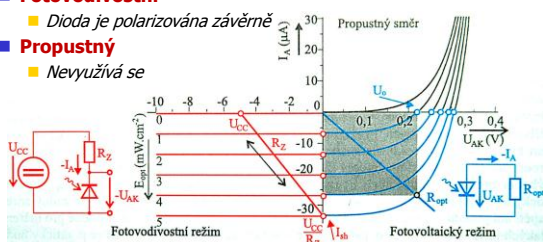
- Parametrem je intenzita dopadajícího světla, proud je přímo úměrný světelné intenzitě v hodnotě několika řádů
- Maximální výkon dostaneme pro odpor daný max. plochou čtverce

Fotodiodovostní

- Dioda je polarizována závěrně

Propustný

- Nevyužívá se



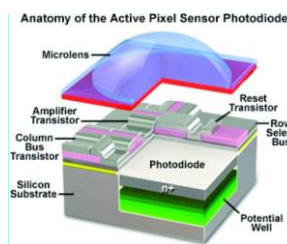
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Aplikace fotodiod

Fotovoltaický článek

Optický senzor (fotoaparáty, kamery, ...)

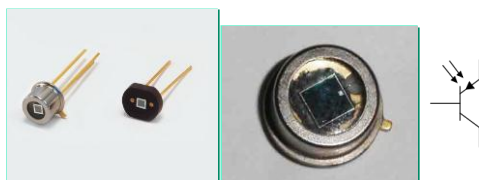


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Fototranzistor

- Světlo dopadá na přechod báze-kolektor
- Světlo tak vlastně ovládá velikost proudu báze, který určuje zesílení tranzistoru
- Výstupní charakteristiky jsou tak funkcí intenzity osvětlení

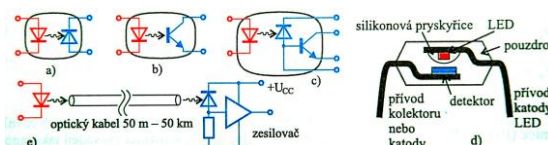


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Optron

- Používá se pro galvanické oddělení
- Tvořen zdrojem záření (např. GaAs LED) a detektorem (Si fotodiody nebo fototranzistor)
- Rychlost je limitována detektorem na výstupu
- Účinnost 0,2% (pro LED-fotodiody) až 100% pro LED-fototranzistor



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Operační zesilovač



Operační zesilovač

- Operační zesilovače byly původně vyvinuty pro realizaci matematických operací v éře analogových počítačů - odtud pak jejich název
- Zásadní snahou bylo vytvořit univerzální zesilovač, jehož přenosové vlastnosti budou zásadně určeny pouze pomocí vnějších pasivních prvků
- Pro základní analýzu přenosových vlastností je zaveden pojem *ideální operační zesilovač*
- První operační zesilovače byly konstruovány z elektronek
- Dnešní operační zesilovače jsou téměř výhradně konstruovány jako integrované obvody



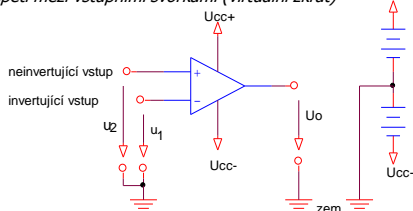
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Princip a vlastnosti operačního zesilovače

- Vlastnosti ideálního operačního zesilovače
 - Nekonečné napěťové a proudové zesílení – Reálně $10^5 - 10^7$
 - Nekonečný vstupní odpor – U CMOS až 10^{10}
 - Nulový výstupní odpor – řádově desítky ohmů
 - Kmitočtová nezávislost – *nedá se jednoznačně určit*
 - Nulové napětí mezi vstupními svorkami (virtuální zkrat)



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

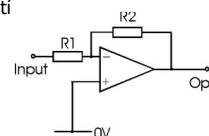


Základní zapojení operačního zesilovače

Invertující zesilovač

- Na výstupu se objeví vstupní napětí vynásobené zápornou konstantou
- Velikost zesílení je daná poměrem odporů R_1 a R_2

$$U_2 = -(R_2/R_1) \cdot U_1$$



- Vztah platí jen tehdy, je-li zdrojem signálu obvod s nulovým vnitřním odporem (ideální zdroj napětí)
- Vstupní impedance je dána velikostí odporu R_1



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



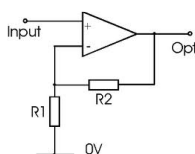
Základní zapojení operačního zesilovače

Neinvertující zesilovač

- Vstupní impedance blíží nekonečnu a nezávisí na hodnotách odporů R_1 a R_2
- Zisk je vždy větší než 1

$$U_2 = (1 + R_2/R_1) \cdot U_1$$

- Vstupní a výstupní signál má stejnou fázi – není invertovaný



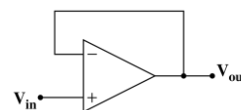
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Základní zapojení operačního zesilovače

Sledovač napětí

- Sledovač se používá pro oddělení vysokoimpedančního vstupu a nízkoimpedančního výstupu
- Vstupní impedance se blíží nekonečnu
- Výstupní impedance je velmi malá



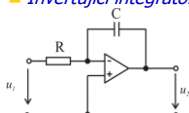
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Základní zapojení operačního zesilovače

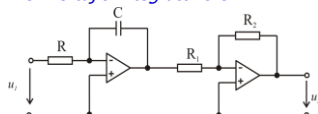
- Integrační zesilovač** provádí integraci (invertovaného) vstupního signálu podle času

Invertující integrátor s OZ



$$U_2 = \int_0^t -\frac{U_1}{RC} dt + U_{poc}$$

Neinvertující integrátor s OZ



$$U_2 = \int_0^t \frac{U_1}{RC} dt + U_{poc}$$

Derivační zesilovač se dá použít jako filtr (dolní propust)

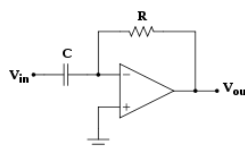


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Základní zapojení operačního zesilovače

- Derivační zesilovač** provádí derivaci (invertovaného) vstupního signálu podle času.
- Derivační zesilovač se dá použít jako filtr (horní propust)



$$U_2 = -RC \frac{dU_1}{dt}$$

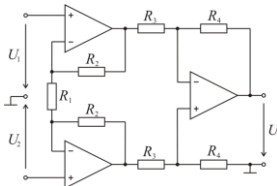


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Základní zapojení operačního zesilovače

- **Přístrojový zesilovač** je rozdílový zesilovač s uzavřenou smyčkou zpětné vazby, který zesiluje rozdíl vstupních napětí
- Má velmi malou vstupní nesymetrii, vysoký činitel potlačení souhlasných signálů, velký vstupní odpor.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Reálný OZ - Statické nelinearity

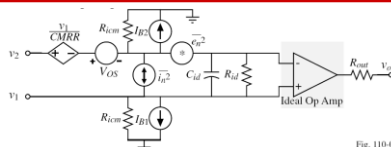


Fig. 110-05

- R_{id} – vstupní odpor mezi diferenčními svorkami
- C_{id} – vstupní kapacita (diferenční)
- R_{icm} – stejnosměrný odpor
- V_{os} – vstupní napěťová nesymetrie
- I_{B1} a I_{B2} – diferenční vstupní proudy
- I_{os} – vstupní proudová nesymetrie ($I_{os} = I_{B1} - I_{B2}$)
- $CMRR$ – potlačení souhlasného signálu
- E_n – napěťový šum
- I_n – proudový šum

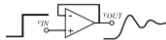
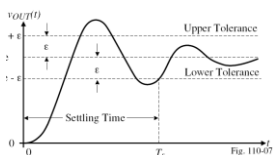


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Doba přeběhu a doba ustálení

- Doba přeběhu (Slew Rate SR)
 - Diferenciální změna na výstupu. Je to prakticky maximální proud schopný nabíjet a vybíjet připojenou kapacitu
 - Není limitován výstupním blokem, ale zdrojem proudu prvního stupně
- Doba ustálení (Settling time T_s)
 - Doba potřebná, aby se výstup dostal na finální hodnotu
 - Malosignálová změna

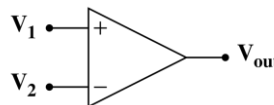


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Komparátor

- Porovnává napětí přivedená na vstupy + a -.
- Pokud je vyšší napětí na vstupu +, je na výstupu kladné saturační napětí operačního zesilovače, je-li vyšší napětí na vstupu -, je na výstupu záporné saturační napětí operačního zesilovače.

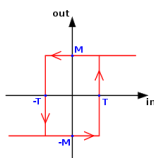
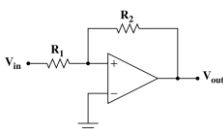


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Schmittův klopný obvod

- Speciální komparátor, který má hysterezi.
- Výstup je závislý nejen na hodnotě vstupu, ale i na jeho původním stavu.
- Velikost hystereze se u schmittova klopného obvodu dá nastavit poměrem odporů R_1 a R_2



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



AD převodníky



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



- [illegible]



-

Il'ij Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT EEI



-



- [illegible]



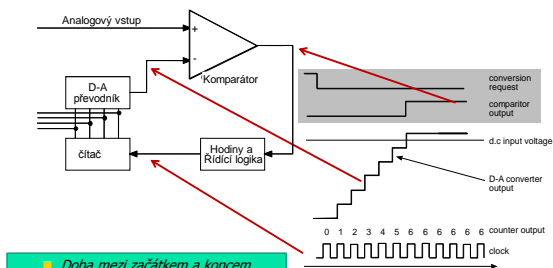
- ### Nejrychlejší převod
-
- Vstupní signál je přiveden paralelně na řadu komparátorů, které srovnávají se sadou napětíových referenčních hladin



- 

Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FFI

A/D převodník s postupnou komparací

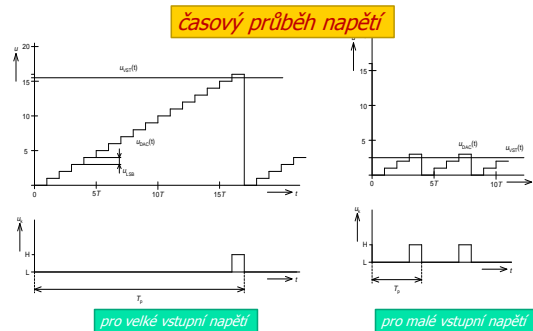


- Doba mezi začátkem a koncem konverze je známá až po převodu
- Nevýhodou je délka doby potřebná pro převod velkého napětí



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

A/D převodník s postupnou komparací



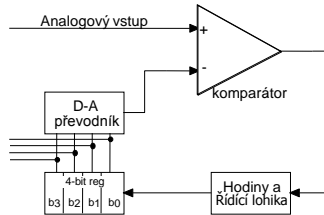
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

S postupnou aproximací - SAR

- dosahují vyššího rozlišení (<18 bitů)
- střední rychlost (až 200 MS/s)
- nízká odolnost proti šumu
- střední cena
- zobrazování v medicíně, zpracování videa a zvuku, digitální komunikace

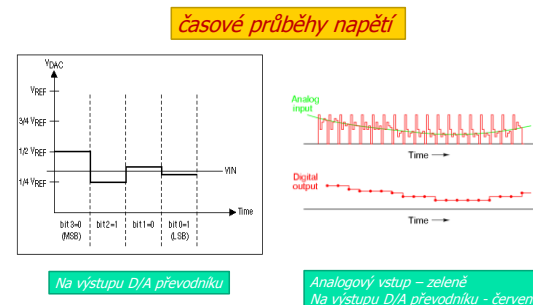
■ Při požadavku na převod:

Obsah registru je vynulován
MSB nastaven na log. 1
Jestliže $V_c = 0$ pak $V_d < V_{in}$
=> nechá MSB nastaven
Jestliže $V_c = 1$ pak $V_d > V_{in}$
=> vynuluje MSB
Opakuje předchozí krok pro další bity
Od MSB do LSB



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

S postupnou aproximací - SAR



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

Integrační AD převodník

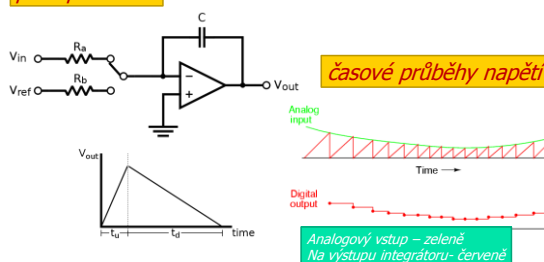
- střední rozlišení (<16 bitů)
- nízká rychlost (< 100 S/s)
- vysoká odolnost proti šumu
- nízká cena
- jednoduché indikátory, aplikace nenáročné na rychlost, multimetry



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

Integrační AD převodník

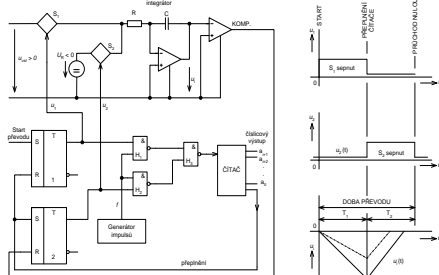
princip funkce:



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Integrační AD převodník s dvojitou integrací



Integrátor integruje referenční napětí po dobu T_{2r} danou dosažením nulové hodnoty výstupního napětí u

jakmile výstupní napětí integrátoru projde nulou, signalizuje tuto situaci komparátor a vynuluje klopný obvod KO₂. Signálem z jeho výstupu se rozpojí spínač S₂ a uzavře H₂. Na výstupu čítače zůstane číslo odpovídající době



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



AD převodníky - Σ - Δ

■ Σ - Δ (Sigma-Delta)

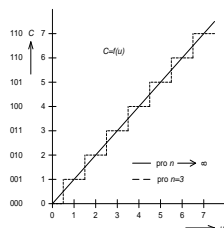
- vysoké rozlišení (<24 bitů)
- střední rychlost (<1 MS/s)
- vysoká odolnost proti šumu
- střední cena
- precizní měřicí přístroje, zpracování zvuku, lékařské přístroje, řízení procesů



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Parametry a chyby A/D převodníků



Ideální převodní charakteristika 3-bitového A/D převodníku

statické parametry ADC

rozlišení převodníku ADC - dynamický rozsah převodníku

přesnost převodníku - odchylka skutečné převodní charakteristiky od ideální chyby převodníku a přesnost se uvádějí v počtu U_{LSB}

chyby převodníku ADC

chyba napětíového posunu (offset),
chyba zisku,
chyba linearit (nonlinearita),
chyba monotónnosti (nemonotónnost)

dynamické vlastnosti ADC

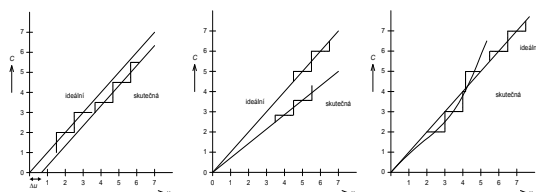
doba převodu nebo přesněji rychlost nebo četnost převodů ADC,
doba převodu je reciproká hodnota rychlosti převodu,
u mnohých převodníků ADC je doba převodu totožná s dobou vzorkování



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Parametry a chyby A/D převodníků



offset (chyba posunu)

chyba zisku

nelinearita



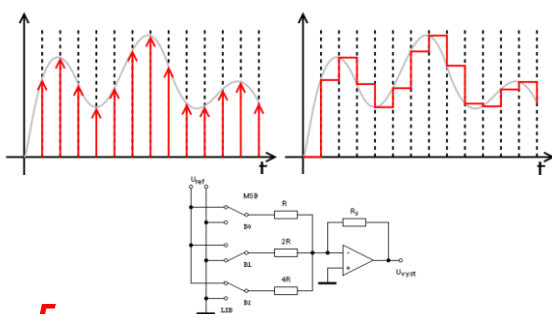
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Digitálně analogový převodník

Navzorkovaný signál

Signál na výstupu D/A převodníku



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Měření teploty



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Kovové odporové teploměry

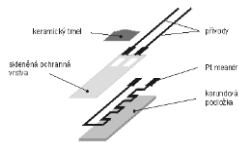
- Využívají závislosti odporu kovů na teplotě

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$
$$R = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3 + \dots]$$



- Používají se čisté kovy (platina, nikl, měď)
- Vliv odporu přívodů se eliminuje čtyřvodičovou metodou zapojení
- Pt100, Pt500, Pt1000

materiál	$\alpha \cdot 10^{-3}$ [K ⁻¹]	mezí použití [°C]
Pt	3,85 - 3,93	-200 až 850
Ni	6,17 - 6,70	-60 až 200
Cu	4,26 - 4,33	-50 až 150



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Odporové polovodičové teploměry

- Termistory NTC** (negastory $\alpha < 0$)

Výroba práškovou technologií ze směsi oxidů

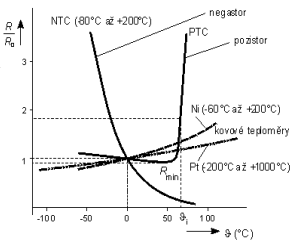


- Termistory PTC** (pozistory $\alpha > 0$)

Vyrábějí se z polykrytalické feroelektrické keramiky (např. BaTiO₃)

Odpor se stoupající T mírně klesá – pak nad Curiovou teplotou prudce narůstá

Použití jako dvoustavové senzory – překročení přípustné T



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL