

## Kapitola 4

### Polovodičové součástky

Vyzbrojení nástroji pro zkoumání vlastností elektronických obvodů můžeme rozšířit znalosti o popis polovodičových součástí a vyložit jejich uplatnění v elektronických systémech.

#### Elektrický proud v polovodičích

Polovodiče jsou látky, jejichž elektrický měrný odpor je menší než u izolantů a větší než u kovů. V současné době nejčastěji používaný polovodivý prvek je křemík (Si) ze IV. čtvrté skupiny periodické soustavy prvků – se čtyřmi valenčními elektrony.

#### Proud v čistých polovodičích

Valenční elektrony vytvářejí v krystalu elektronové páry. Elektrony se z vazby mohou uvolňovat, získají-li dostatečnou energii, např. zahřátím. Při nízkých teplotách má takovou energii málo elektronů a polovodivý materiál má velký měrný odpor. Při vyšších teplotách se elektrony snáze uvolňují a pohybují se uvnitř materiálu. Volné místo po elektronu se chová jako kladně nabitá částice – díra. Čím více párů elektron-díra vznikne (čím vyšší je teplota), tím menší je měrný odpor. To je opak proti kovům, u nich se s teplotou odpor zvětšuje.

Současně se vznikem párů elektron-díra probíhá v polovodiči rekombinace, jejich zánik. Při stálé teplotě jsou generace a rekombinace v rovnováze. Zapojíme-li vlastní polovodič do obvodu, vzniká v něm elektrické pole, které způsobuje uspořádaný pohyb děr k zápornému pólu zdroje a elektronů ke kladnému.

Příkladem využití součástky z vlastního polovodiče je teplotně závislý rezistor – termistor.

## Proud v dotovaných polovodičích

Dodáním cizích atomů s nižším nebo vyšším počtem valenčních elektronů do krystalické struktury vlastního polovodiče můžeme vytvořit polovodičový materiál se dvěma typy vodivosti:

**Vodivost N:** Dodáním atomů prvků s pěti valenčními elektrony se vytvoří situace, kdy jen čtyři se uplatní v kovalentní vazbě. Páté elektrony jsou vázány jen slabě a i při nízkých teplotách se volně pohybují krystalem. V takto upraveném krystalu je více volných elektronů než děr. Elektrony proto označujeme jako majoritní nosiče náboje a díry jako nosiče minoritní.

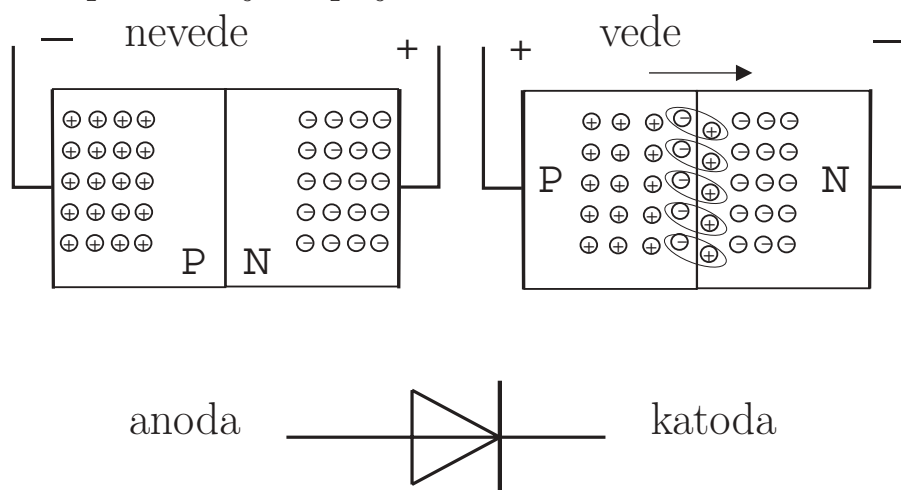
**Vodivost P:** Pokud jsou v krystalu příměsi se třemi valenčními elektrony, obsadí jen tři vazby se sousedními atomy prvku IV. skupiny. Vznikne díra, která může být snadno zaplněna přeskokem elektronu od sousedního atomu. Vytvořené díry se v polovodiči volně pohybují a tvoří zde majoritní nosiče náboje, minoritními nosiči jsou elektrony.

**Přechod PN:** Existují technologie, které vyrobí součástku, v níž oblasti P a N vytvoří rozhraní – PN přechod. V místě styku obou polovodičů vznikne dynamická rovnováha (některé elektrony přestoupí do prostoru P a naopak díry do N). V oblasti přechodu nejsou vlivem rekombinace žádné volné elektricky nabitě částice a na vnějších svorkách není žádné napětí.

Pokud připojíme polovodič typu P ke kladnému pólu zdroje a polovodič typu N k zápornému, z polovodiče typu P jsou vtahovány díry do prostoru polovodiče N a naopak z polovodiče N jsou do obvodu dodávány elektrony. Vnější pole jsou nosiče náboje uvedeny do pohybu – PN přechod je zapojen v propustném směru.

Pokud zapojíme PN přechod obráceně, k pohybu děr a dodávání elektronů nedochází, tzn. proud neprochází. Díry „při-

tahuje“ ke svému přívodu záporné napětí, proto zůstávají v P, stejně elektrony jdou ke kladnému kontaktu, a proto zůstávají v N – PN přechod je zapojen v závěrném směru.



Obrázek 4.1: PN přechod

## PN přechod propouští proud pouze jedním směrem

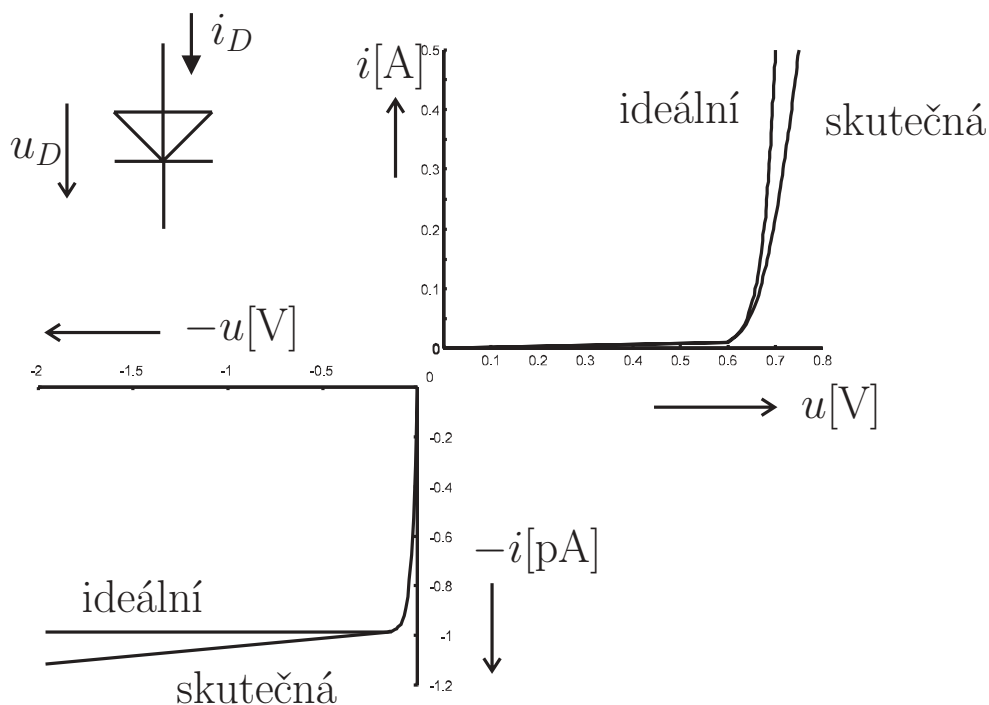
PN přechod je využit v polovodičové součástce – diodě.

## Dioda

Z fyzikální podstaty činnosti přechodu PN při vedení elektrického proudu vyplývá, že vztah mezi proudem a napětím na jeho svorkách je nelineární – neplatí Ohmův zákon. Avšak v obvodech platí Kirchhofovy zákony. Neplatí předpoklady pro použití fázorů ve frekvenční oblasti. Obvody většinou popisujeme jen v časové oblasti.

Jestliže nelze nesetrvačné vlastnosti popsat jediným parametrem – odporem rezistoru, jaké možnosti tedy máme?

K popisu vlastností nelineárních nesetrvačných elementů používáme voltampérovou charakteristiku zobrazenou graficky, nebo vyjádřenou aproximativním funkčním předpisem.



Obrázek 4.2: Voltampérová charakteristika ideální a skutečné křemíkové planární diody

Voltampérovou charakteristiku přechodu PN lze přibližně popsat rovnicí

$$i = I_S \left( e^{\frac{u_D}{nU_\theta}} - 1 \right),$$

kde  $i$  je proud procházející přechodem při napětí  $u_D$ .

Napětí  $u_D$  je kladné, je-li přechod PN pólován v propustném směru. Proud  $I_S$  je tzv. nasycený (saturační) proud přechodu a závisí na technologii a materiálu diody. Závisí značně na teplotě, protože je tvořen tepelně generovanými dvojicemi elektron-díra.

Napětí  $U_\theta$  je tzv. teplotní napětí

$$U_\theta = \frac{k\theta}{q} \approx 26 \text{ mV},$$

kde  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $q$  je elementární náboj a  $\theta$  je absolutní teplota (v Kelvinech).

Emisní součinitel  $n$  se mění v rozmezí  $1 < n < 2$ .

Napětí  $nU_\theta$  je tedy pro teplotu 300 K ( $= +27^\circ\text{C}$ ) v rozmezí 26 až 52 mV. Pro napětí  $u_D \gg U_\theta$  lze zanedbat jedničku proti exponenciále a dostaneme pro průběh voltampérové charakteristiky propustně pólované diody přibližný vztah

$$i = I_S e^{\frac{u_D}{nU_\theta}}.$$

Skutečný průběh voltampérové charakteristiky diody je ovlivněn v propustném směru hlavně sériovým odporem přívodů a v závěrném směru paralelními svody.

### Parametry diod

- $I_{max}$  – maximální propustný proud; konstrukcí diody, okolní teplotou, způsobem chlazení je určen maximální proud, který smí diodou procházet v propustném směru; při jeho překročení je nebezpečí tepelného zničení diody.
- $U_{max}$  – maximální závěrné napětí; závěrný proud diody prudce narůstá, jestliže se napětí blíží k napětí označovanému jako průrazné napětí. Při něm vzroste intenzita elektrického pole uvnitř přechodu nad mez, za níž dochází k vytrhávání nosičů náboje z krystalové mřížky polovodiče a jejich lavinovitému množení. Jde o průraz, který může vést k destrukci, je-li provázen současným přehřátím přechodu.
- $U_T$  – prahové napětí; napětí, které musíme vložit na diodu v propustném směru, aby začal protékat „znatelný“ proud. Pro křemíkové diody lze pracovat s  $U_T \approx 0,6 \div 0,8 \text{ V}$ .

Při řešení statických poměrů v obvodech s diodou používáme nejčastěji numerických metod výpočtů nebo grafických konstrukcí názorně řešících nelineární obvodové rovnice. Při přibližných výpočtech obvykle použijeme linearizace voltampérové charakteristiky pomocí několika úseků, kde je vždy pro určitý interval napětí dioda popsána hodnotou odporu, který vystihuje závislost změn proudu na změnách napětí.

## Dynamické vlastnosti diod

Kromě statických parametrů – úbytku napětí v propustném směru a proudu v závěrném směru – jsou velmi důležité i parametry dynamické, neboť ovlivňují vztah mezi časovými průběhy napětí a proudu na diodě při přechodných dějích. Zpoždění reakce, např. napětí, při náhlé změně proudu se projevuje jako nelineární kapacita přechodu PN, která je z hlediska fyzikálního složena ze dvou složek.

- Statická (bariérová) kapacita je kapacita kondenzátoru, jehož polepy tvoří oblasti P a N a dielektrikem je vyprázdňená vrstva v okolí přechodu při závěrné polarizaci. Její tloušťka závisí na vnějším napětí, takže pro bariérovou kapacitu platí přibližný vztah

$$C_T \approx \frac{C_{T0}}{\left(1 - \frac{u_D}{U_j}\right)^m},$$

kde  $U_j$  je tzv. difúzní potenciál ( $U_j \approx 0,5 - 0,9 \text{ V}$ ),  $u_D$  je napětí při závěrné polarizaci záporné,  $C_{T0}$  je konstanta závislá na ploše přechodu (kapacita při nulovém napětí),  $m$  je exponent závislý na typu přechodu ( $m \approx 0,3$  až  $0,5$ ).

- Difuzní kapacita se uplatňuje, je-li dioda pólována v propustném směru. Není ve skutečnosti tvořena izolační vrstvou a dvěma elektrodami. Využíváme podobnosti chování kapacitoru a propustně pólované diody. Pomocí difuzní kapacity popisujeme dynamické jevy, které provázejí průchod proudu přechodem. Pro difuzní kapacitu  $C_D$  platí přibližně

$$C_D \approx \tau i_D \frac{1}{nU_\theta},$$

kde  $i_D$  je proud procházející diodou a  $\tau$  je efektivní doba života menšinových nosičů.

## Speciální diody

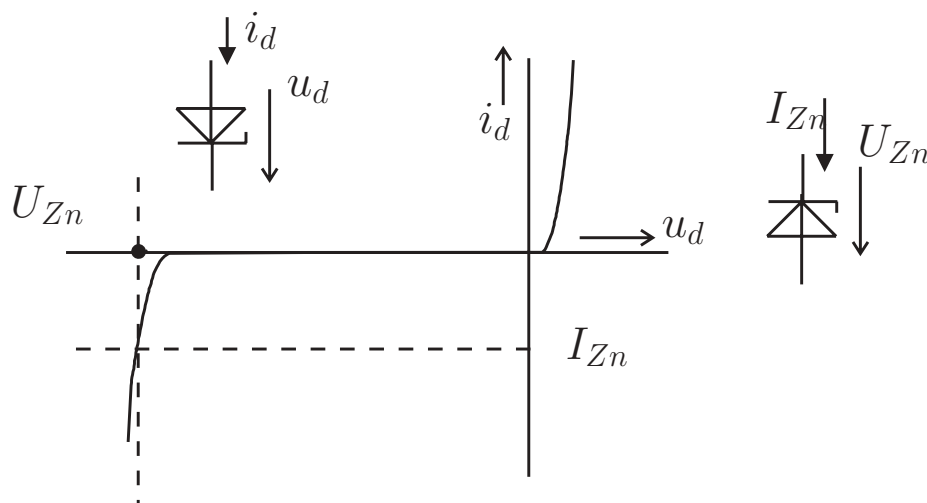
- Dioda s přechodem kov-polovodič (Schottkyho dioda)

Dioda může být zhotovena jako přechod kov-polovodič. Technologie výroby je obtížnější než u diod s přechodem PN. Statická voltampérová charakteristika je podobná voltampérové charakteristice diody s přechodem PN, má však menší prahové napětí  $U_T = 100 \div 150 \text{ mV}$ .

Protože u diod tohoto typu je přenos uskutečňován většinou nosiči, nedochází zde k hromadění menšinových nosičů a dosažitelná doba zotavení dosahuje jednotek pikosekund (u rychlých křemíkových diod  $500 \div 700 \text{ ps}$ ).

- Zenerova dioda

Zenerovy diody jsou diody, které jsou navrženy tak, že je výrobní technologií zajištěna žádaná hodnota průrazného napětí v rozmezí od jednotek do stovek voltů. V obvodech se pak předpokládá, že chlazením je zajištěno, že proud procházející za mezí průrazu nezpůsobí tepelnou destrukci. Voltampérová charakteristika Zenerovy diody je uvedena na obrázku.

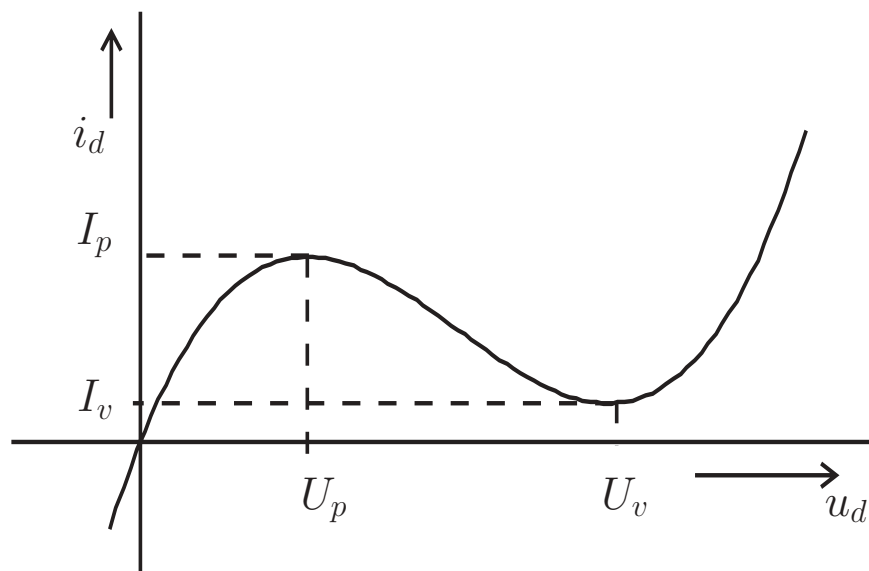


Obrázek 4.3: Voltampérová charakteristika Zenerovy diody

Zenerových diod se využívá hlavně ve stabilizátorech napětí, ve zdrojích referenčních úrovní, v omezovačích úrovní apod.

- Tunelová dioda

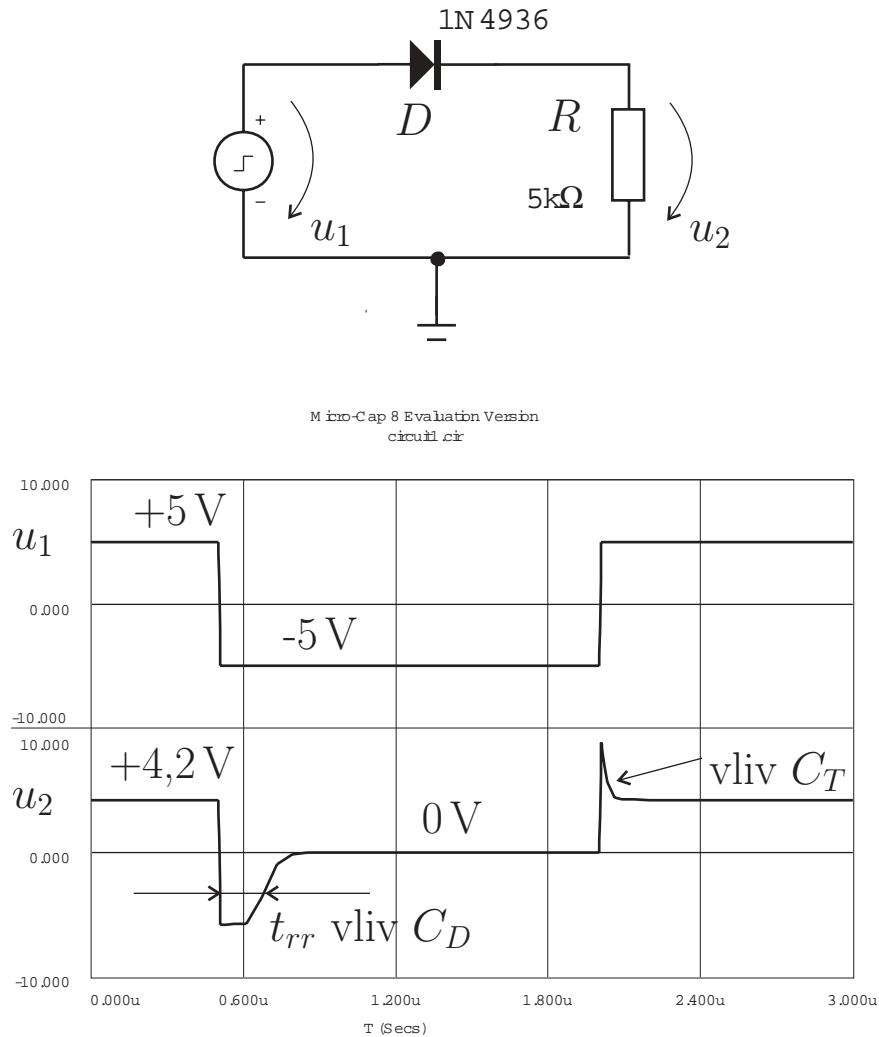
Tunelová dioda je rovněž součástka tvořená přechodem PN. U tunelové diody však existují nosiče náboje, které přechodem mohou procházet („tunelují“) při napětí nižším než je napětí prahové. Voltampérová charakteristika strmě stoupá již od nulového napětí. Strmost se s rostoucím napětím postupně zmenšuje, až při napětí  $U_p$  a proudu  $I_p$  charakteristika dosáhne lokálního maxima. Při dále rostoucím napětí na přechodu již přestávají působit podmínky pro vznik tunelového jevu a proud klesá, až při napětí  $U_v$  dosáhne lokálního minima  $I_v$ . Potom se dioda začne chovat podobně jako normální křemíková dioda v propustném směru.



Obrázek 4.4: Voltampérová charakteristika tunelové diody



## Diodový obvod – usměrňovač, tvarovač, omezovač – zotavení diody.



Obrázek 4.5: Diodový obvod s impulsním buzením

$$u_1(t) = \begin{cases} +5 \text{ V} & t < 0,5 \mu\text{s} \text{ a } t > 2 \mu\text{s} \\ -5 \text{ V} & t = 0,5 \div 2 \mu\text{s} \end{cases}$$

### • Ustálené veličiny

$$u_2(t) = \begin{cases} \approx +4,2 \text{ V} & t < 0,5 \mu\text{s} \text{ a } t \gg 2 \mu\text{s} \\ 0 \text{ V} & t \approx 1 \div 2 \mu\text{s} \end{cases}$$

Při kladném napětí na vstupu je na výstupu napětí zmenšené o úbytek napětí na diodě (cca 0,8 V).

Při záporném napětí na vstupu je na výstupu nulové napětí proto, že dioda nepropouští do obvodu žádný proud.

## ● Přechodný děj – zotavení

Zotavení je jev, spojený s uzavíráním vodivé diody (na obrázku v čase  $t = 0,5 \mu\text{s}$ ). Zotavení bývá v mnoha případech nejdůležitější pro praktickou použitelnost diody. Při propustné polarizaci diody jsou v oblastech přilehlých k přechodu PN v každém okamžiku volné nezrekombinované nosiče. Změní-li se náhle polarita vnějšího napětí, objeví se na přechodu bariéra proti přechodu majoritních nosičů, avšak volné minoritní nosiče mohou ještě po určitou dobu uzavírat proud procházející v závěrném směru – můžeme říci, že se vybíjí difuzní kapacita. Teprve po vyčerpání těchto volných nosičů klesne závěrný proud na velikost danou statickou voltampérovou charakteristikou (na našem obrázku trvá zotavení cca 200 ns).

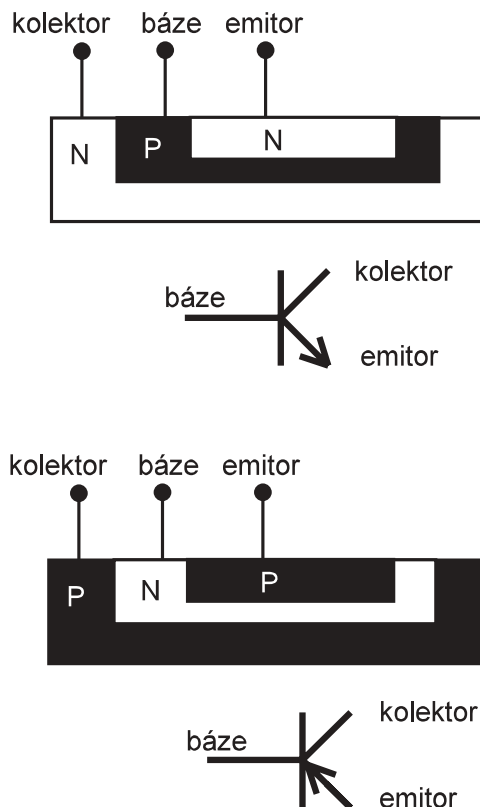
Náboj, který projde přechodem v závěrném směru po přepólování, je závislý na proudu, který původně procházel v propustném směru. Zotavovací dobu lze zkrátit přiložením velkého závěrného napětí. Proud, který se uzavírá v obvodu po dobu zotavování diody, je totiž omezen pouze odpory zařazenými v obvodu, je tedy při vyšším závěrném napětí větší, a náboj je rychleji odveden.

## ● Přechodný děj – otevření (sepnutí)

Přechodný děj při „otvírání“ diody je analogický jako přechodný děj v derivačním obvodu. Barrierový kapacitor je v uzavřeném stavu nabit na napětí  $-5 \text{ V}$  a v prvním okamžiku se chová jako zdroj napětí, takže špička napětí po přepólování je téměř shodná s velikostí skoku vstupního napětí ( $+10 \text{ V}$ ). Časovou konstantu nelze definovat, protože se kapacita PN přechodu v průběhu přechodného děje mění.

## Bipolární tranzistor

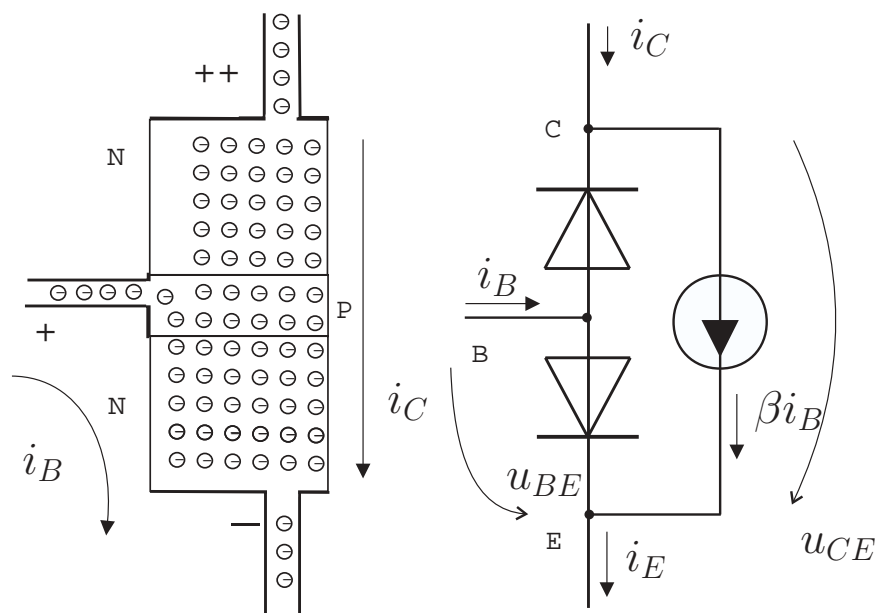
Tranzistor je polovodičová součástka se dvěma PN přechody. V současné době je tranzistor nejčastěji vyráběn pomocí tzv. planární technologie. Strukturu takto vyrobeného tranzistoru ukazuje schematicky následující obrázek.



Obrázek 4.6: Struktura tranzistoru

Tranzistor představuje dvojici PN přechodů, které by bylo jistě možno používat jako diody. Na rozdíl od dvou různých diod je však v tranzistoru místo dvou anod jedna společná velmi tenká polovodičová vrstva – báze, která tvoří společnou anodu pro obě diody (katodu v tranzistoru PNP).

Podstatou činnosti tranzistoru je využití schopnosti závěrně polarizovaného přechodu kolektor-báze, odvádět nosiče náboje z oblasti báze, pokud jsou tam dodány propustně pólovaným přechodem báze-emitor. (Tento přechod se tedy nechová jako uzavřená dioda.) Uvedené chování struktury s tenkou bází se nazývá **tranzistorový jev**.



Obrázek 4.7: Struktura tranzistoru

Na obrázku je názorně ukázáno, jak se rozvětví celkový proud emitoru na proud tekoucí do báze a proud uzavřený přes kolektorový přívod. Vpravo je pak nejjednodušší model bipolárního tranzistoru. Platí v něm při propustné polarizaci přechodu báze-emitor a nepropustné polarizaci přechodu kolektor-báze

$$i_E = i_B + \beta i_B, \quad i_C = \beta i_B, \quad \beta = \frac{i_C}{i_B}, \quad \frac{i_C}{i_E} = \frac{\beta}{\beta + 1} = \alpha,$$

kde  $\beta$  je proudový zesilovací činitel tranzistoru v zapojení se společným emitorem

a  $\alpha$  je proudový zesilovací činitel v zapojení se společnou bází.

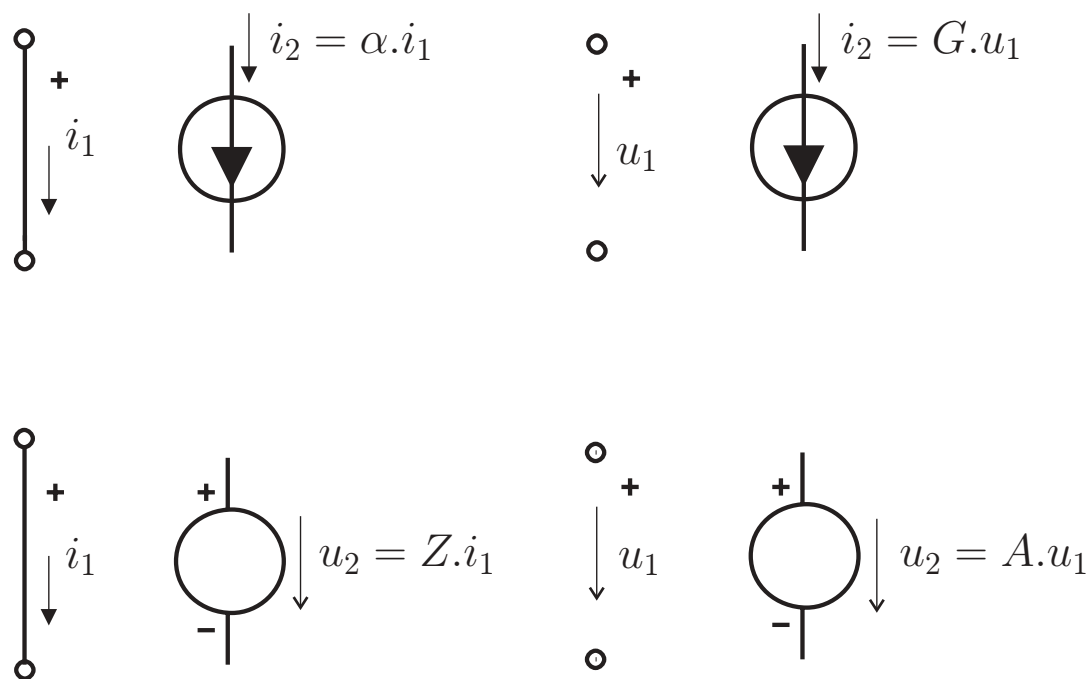
Pro vytvoření modelu tranzistoru jsme si museli zavést nový obvodový prvek, v tomto případě proudový zdroj řízený proudem. Jde o zdroj s vlastnostmi shodnými s vlastnostmi dříve popsaného zdroje proudu. Rozdíl je jen v tom, že proud zdroje je předepsán vztahem, který jeho okamžitou hodnotu určuje v závislosti na velikosti proudu v jiné části obvodu. Takový řízený zdroj umožňuje namodelovat schopnost tranzistoru zesilovat proud – malým proudem do báze řídíme velký proud v obvodu kolektoru.

## Doplňěk inventáře obvodových modelů – řízené zdroje

V teorii obvodů jsou používány ještě další řízené zdroje. Shrňme je a označíme jako lineární řízené (aktivní) elementy

- zdroj proudu řízený proudem – parametrem je bezrozměrná konstanta, proudový zesilovací činitel (označme např.  $\alpha$ )
- zdroj napětí řízený napětím – parametrem je bezrozměrná konstanta, napěťové zesílení (označme např.  $A$ )
- napětím řízený zdroj proudu – parametrem je transkonduktance s rozměrem vodivosti v siemensích (označme např.  $G$ )
- proudem řízený zdroj napětí – parametrem je transrezistance, která má rozměr odporu v ohmech (označme např.  $Z$ )

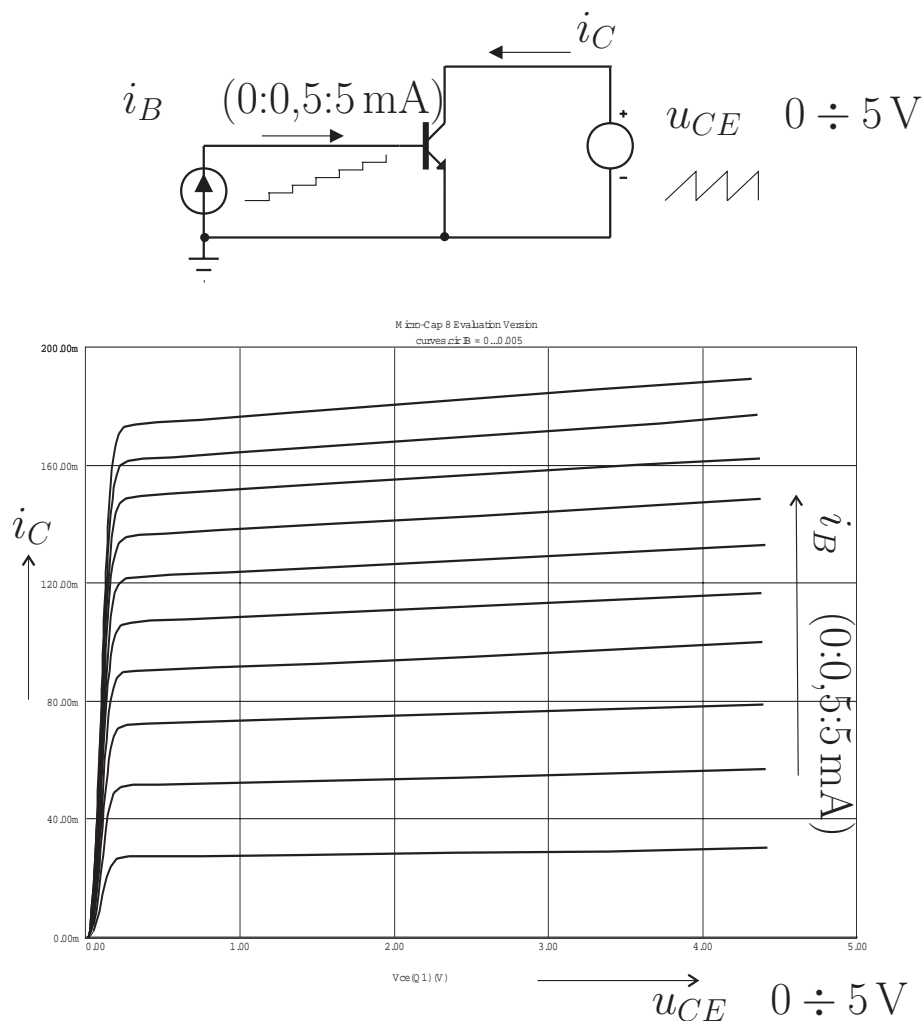
Řízený zdroj v lineárních obvodech definuje závislost řízené veličiny na řídicí konstantním parametrem. Pro výpočty ve frekvenční oblasti mohou být uvedené konstanty reprezentovány komplexními funkcemi kmitočtu. Pak se transkonduktance nazve transadmitancí a transrezistance transimpedancí.



Obrázek 4.8: Řízené zdroje

## Tranzistorový obvod – kolektorové charakteristiky

V nejjednodušším obvodu budíme bázi ze zdroje zvoleného proudu a v kolektorovém obvodu pozorujeme procházející proud v závislosti na kolektorovém napětí. Zachytíme-li pozorování graficky, půjde o zobrazení parametrické soustavy voltampérových kolektorových charakteristik tranzistoru v zapojení se společným emitorem (emitor je společnou svorkou jak vstupního, tak výstupního obvodu). Obrázek zachycuje soustavu kolektorových charakteristik pro změny kolektorového napětí v mezích 0 až 5 V, při buzení báze proudy 0, 0,5, 1, 1,5, ..., 5 mA.

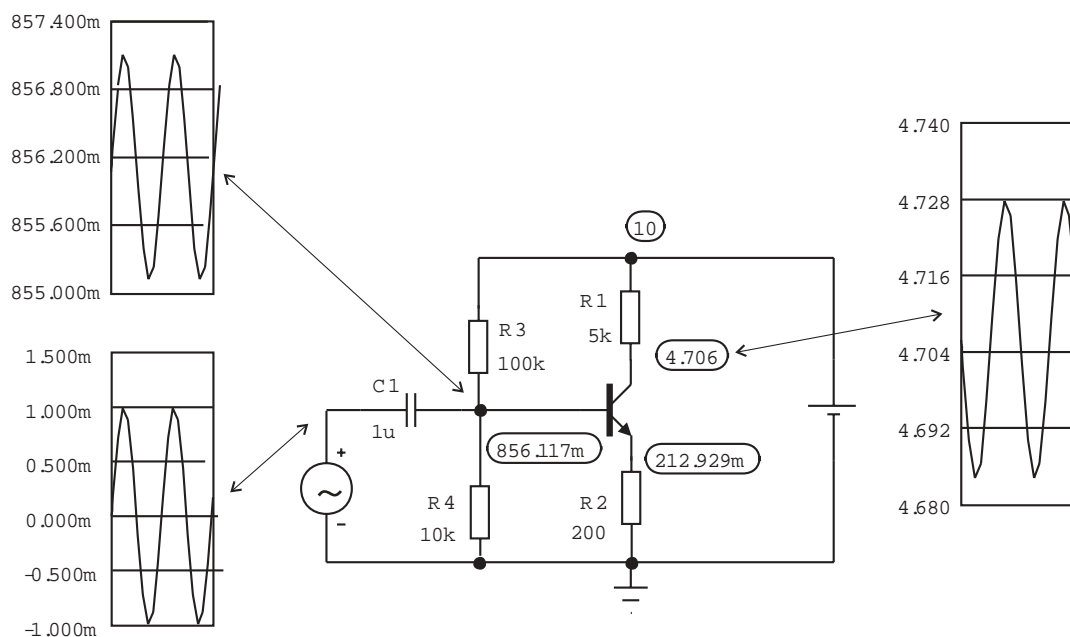


Obrázek 4.9: Charakteristiky tranzistoru

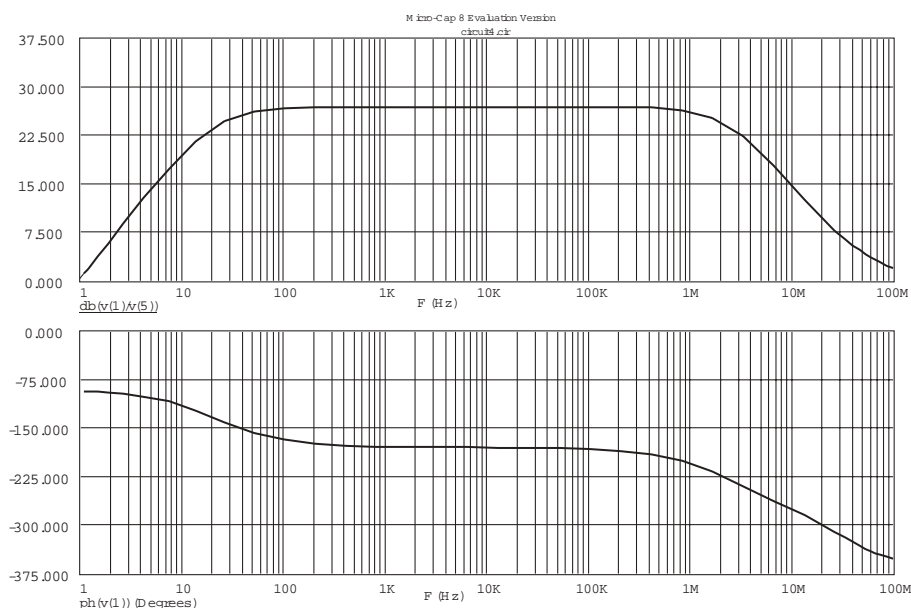
Pozorný student správně v obrázku odhalí skutečnost, že reálný tranzistor nemá konstantní činitel  $\beta$ .

## Tranzistorový zesilovač

Na uvedené charakteristice můžeme snadno ukázat schopnost zesilovat proud. Např. při proudu báze 2 mA prochází kolektorem proud 100 mA ( $\beta \approx 50$ ). Povšimněme si, že tranzistor není ve skutečnosti zdrojem energie, zesilovací efekt se projevuje jen ve vhodném ovládání proudu z vnějšího zdroje napětí. Toho se velmi efektivně využívá pro zesilování signálů.



Obrázek 4.10: Zesilovač



Obrázek 4.11: Frekvenční charakteristika zesilovače

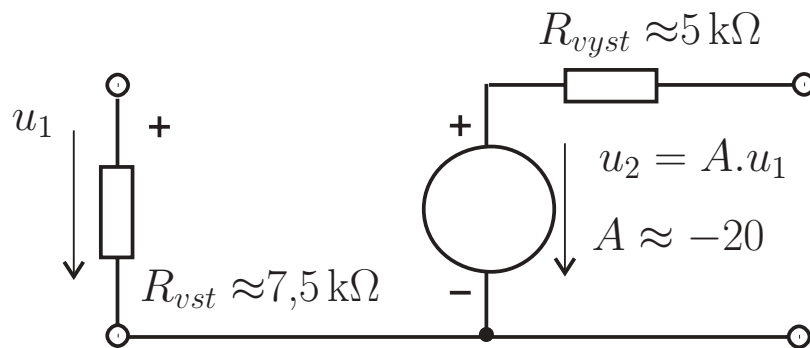
Na obrázku je zapojení, které pracuje jako zesilovač vstupního napětí. Povšimněme si:

- Aby obvod s tranzistorem zesiloval malý signál, musí být nastaveny **stejnoseměrné „klidové“ podmínky – pracovní bod**. Tranzistor vede stejnosměrný proud přibližně 1 mA. To je podmíněno klidovým napětím na bázi cca 860 mV, které zabezpečuje dělič z rezistorů  $R_3$  a  $R_4$ . Proud kolektorem určuje do značné míry rezistor  $R_2$  v přívodu emitoru. Procházející proud vytváří na rezistoru v kolektorovém přívodu stejnosměrný úbytek cca 5,3 V, takže vůči společné svorce je na kolektoru 4,7 V (mezi kolektorem a emitorem 4,5 V).
- Za těchto stejnosměrných podmínek může zdroj vstupního střídavého napětí s amplitudou 1 mV působit na bázi tranzistoru. Kapacitor  $C_1$  zabezpečí, že zdroj signálu neovlivní stejnosměrné nastavení klidových podmínek (pracovního bodu). Vstupní střídavé napětí je tedy superponováno ke stejnosměrnému předpětí báze. Kolektorový proud je vlivem vstupního střídavého napětí řízen tak, že klesající napětí na vstupu ho zmenšuje a kolektorové napětí roste (zmenšuje se úbytek na kolektorovém rezistoru) a rostoucí napětí na vstupu proud zvětšuje a napětí klesá. Napětí na kolektoru má sinusový průběh s amplitudou cca 20 mV a s opačnou fází než má napětí na vstupu. Rozkmit sinusové složky kolektorového napětí je cca 20krát větší než rozkmit napětí na vstupu – **napětí bylo zesíleno**.
- Frekvenční charakteristiku nebudeme hlouběji zkoumat. Pouze konstatujeme, že zesilovač má klesající zesílení směrem k nízkým kmitočtům – rozhodující vliv na to má kapacita kapacitoru  $C_1$ , resp. časová konstanta  $R_{vst}C_1$ , kde  $R_{vst}$  je vstupní odpor zesilovače. Směrem k vysokým kmitočtům



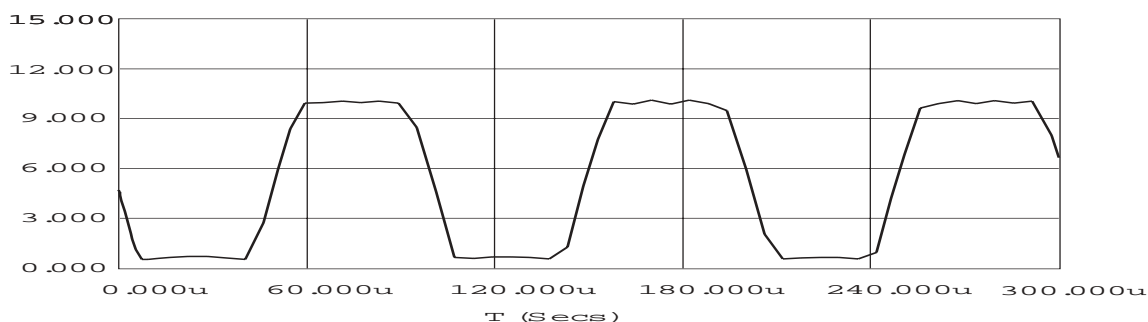
zesílení rovněž klesá a v daném zapojení o tom rozhodují technologické vlastnosti použitého tranzistoru, které jsou dosazeny simulačním programem.

- Uvedené chování zesilovače lze popsat ve středním pásmu kmitočtů (cca od 100 Hz do 1 MHz) zjednodušeným modelem, který použije např. napětím řízený napěťový zdroj podle obrázku



Obrázek 4.12: Model zesilovače

- Zesilovač lze prakticky použít a uvedeným způsobem modelovat pouze tehdy, kdy se neprojeví podstatným způsobem nelineární vlastnosti tranzistoru. Jakmile by rozkmit vstupního signálu vzrostl natolik, že výstupní napětí by již nebylo možno považovat za sinusové, pak nelze lineárního modelu použít a obvod by bylo nutno modelovat v časové oblasti s tím, že frekvenční charakteristika neexistuje – nebyly by splněny podmínky pro reprezentaci impedancí a signálů fázory. Následující obrázek ukazuje, jak se výstupní napětí zkreslí při vstupním signálu s rozkmitem 500 mV.



Obrázek 4.13: Model zesilovače

## Unipolární tranzistor a struktura CMOS

Další významnou polovodičovou součástkou je unipolární tranzistor – tranzistor řízený elektrickým polem (FET – Field Effect Transistor).

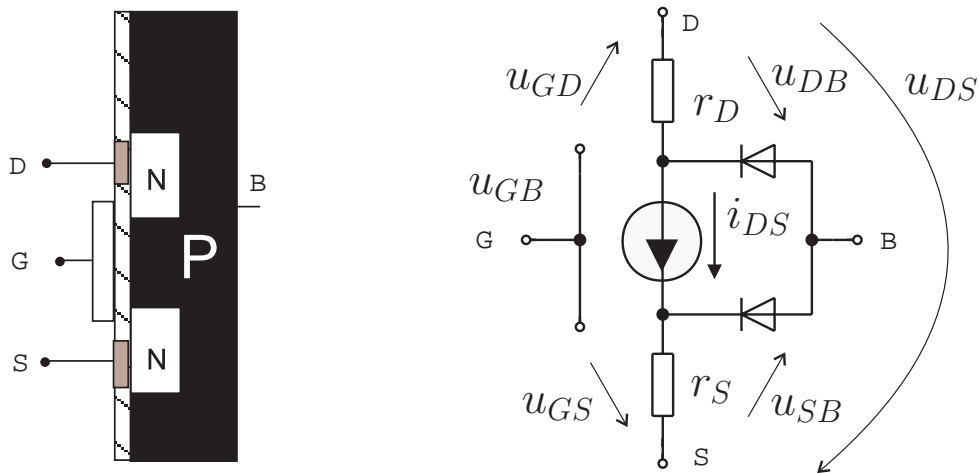
Jaký je princip činnosti FETů?

Proč se jim říká unipolární tranzistory?

Proč ovládly FETy současnou produkci polovodičových součástek?

Jak je vytvořena struktura CMOS? Proč je úspěšná v konstrukci počítačových čipů?

Strukturu a model tranzistoru FET ukazuje obrázek.



Obrázek 5.1: Vnitřní struktury FETů

V polovodičovém materiálu typu P je vytvořena dvojice oblastí s dotací typu N. Předpokládáme, že obě tyto oblasti, označené S (source) a D (drain), jsou vůči substrátu B (bulk) pólovány tak, že jimi neteče proud v propustném směru. To také musíme zabezpečit ve všech praktických obvodových aplikacích. Na povrchu substrátu je izolační vrstva (oxid, nitrid,..) a na ní je vytvořena vodivá elektroda G (gate).

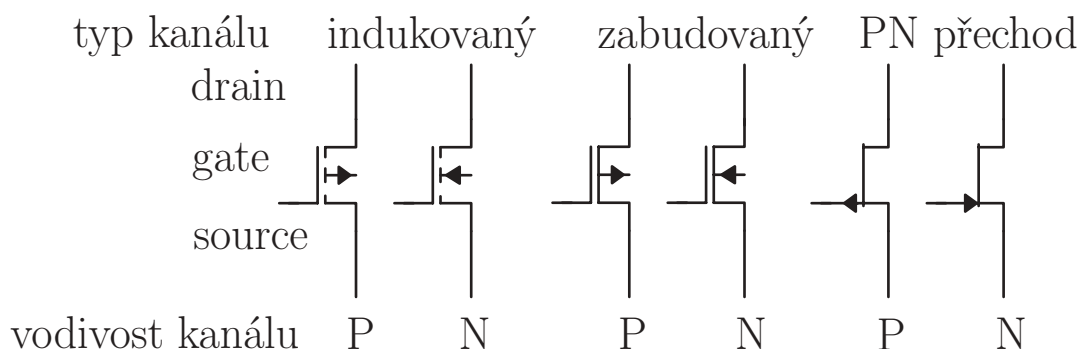
Podstatou činnosti tranzistorů řízených elektrickým polem je ovládání vodivosti vrstvy substrátového materiálu, která leží bezprostředně pod řídicí elektrodou – gatem. Elektrostaticky ovládaná tzv. inverzní vrstva tvoří vodivý kanál spojující dvě oblasti stejného typu vodivosti.

V případě FETu se substrátem typu P spočívá řídicí účinek gatu v tom, že kladným napětím jsou z povrchové vrstvy „odtlačeny“ díry a převládne v ní elektronová vodivost – **indukuje se kanál** typu N. Do takového kanálu mohou volně vstupovat majoritní nosiče (elektrony) z obou oblastí D i S. Celá cesta, kterou prochází proud, je tedy vytvořena polovodičem jednoho typu vodivosti (v našem případě typu N). Proto se také tyto tranzistory označují jako **unipolární**.

Vnitřní struktury FETů se mohou lišit typem vodivého kanálu, tedy mohou být s N kanálem, nebo s P kanálem.

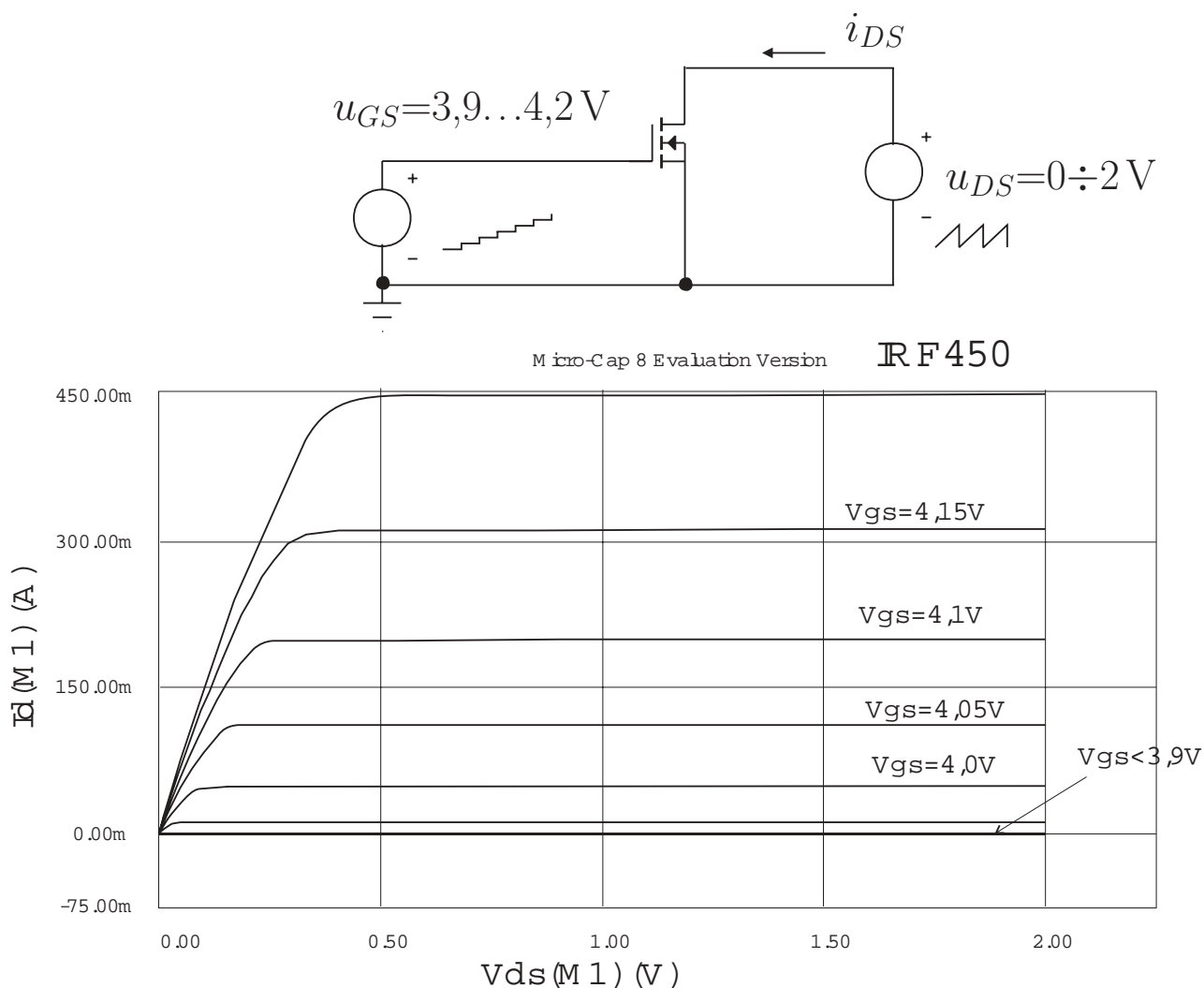
Dále rozlišujeme FETy s vestavěným a indukovaným kanálem. Lze dotovat i vrstvu pod řídicí elektrodou, takže kanál vede proud i při nulovém řídicím napětí. Záporným napětím na N kanálu a kladným na P kanálu je možno kanál uzavřít.

Řídicí elektrodu lze vytvořit i přechodem PN, který musí být vůči kanálu nevodivý. Napětím na přechodu lze ovládat tloušťku vyprázdněné vrstvy, která vestavěný kanál přehrazuje. Tyto FETy se označují jako JFETy (Junction FET).



Obrázek 5.2: Schematické značky FETů

Řízení proudu mezi drainem a sourcem se uskutečňuje zvětšováním a zmenšováním tloušťky inverzní vrstvy pomocí napětí řídicí elektrody. Pro malá napětí drainu je řídicí elektrodou ovládán odpor cesty mezi drainem a sourcem. Tento odpor je lineární jen do určitého napětí, za nímž dojde k vyčerpání nosičů, které jsou v kanálu k dispozici. Tím je omezeno další zvětšování proudu. Voltampérovou charakteristiku (indukovaného) kanálu D-S pro různá napětí na řídicí elektrodě ukazuje následující obrázek.



Obrázek 5.3: Výstupní charakteristiky MOS FETu

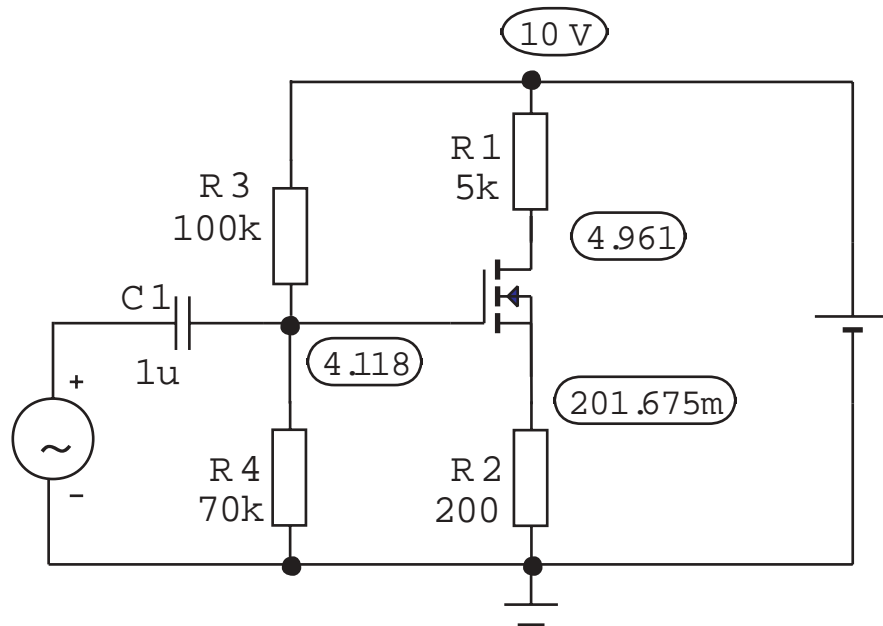
---

Vrátíme se k modelu struktury a budeme diskutovat některé podrobnosti.

- V přívodech ke kanálu jsou v modelu zařazeny rezistory, které reprezentují odpor přívodů a polovodivého materiálu mimo kanál.
- V mnoha praktických aplikacích jsou spojeny svorky B a S, takže se často předpokládá  $u_{SB} = 0 \Rightarrow u_{GB} = u_{GS}$ .
- Prahové napětí u FETů je takové napětí, při kterém se objevuje inverzní vrstva – vzniká kanál (tranzistor na obrázku má prahové napětí  $\approx 3,9$  V). Pro tranzistory s indukovaným kanálem N je prahové napětí kladné, pro tranzistory s vestavěným kanálem je záporné, a v obou případech se kanál otvírá růstem řídicího napětí směrem ke kladným hodnotám. U tranzistoru s kanálem typu P je tomu naopak.
- Je zřejmé, že proudový zdroj v modelu tranzistoru je z kategorie řízených zdrojů. V tomto případě jde o napětím řízený zdroj proudu, u něhož lze definovat řídicí účinek konstantou (transkonduktancí) jen pro velmi malé změny obvodových veličin, takže v modelu musíme počítat s obecnou funkční závislostí

$$i_{DS} = G(u_{GB}) \quad \text{příp.} \quad i_{DS} = G(u_{GS}).$$

Na obrázku je schéma zesilovače s MOS tranzistorem, jehož charakteristiky jsme již ukázali. Povšimněme si, jak se nastavilo stejnosměrné předpětí  $u_{GS}$  a jaké stejnosměrné napětí je na drainu.

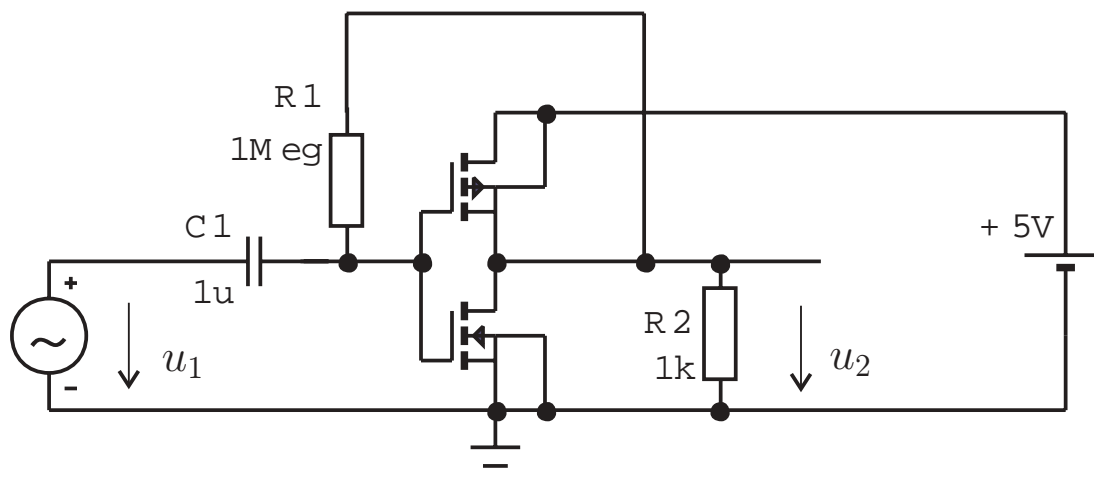


Obrázek 5.4: Zesilovač s MOS FETem

Ostatní úvahy o funkci obvodu s malým střídavým napětím jsou shodné jako u zesilovače s bipolárním tranzistorem, včetně posouzení frekvenční charakteristiky. V lineárním modelu, který má rovněž stejnou strukturu, bychom dosadili:  $A \approx -24$ ,  $R_{vst} = (70 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ k}\Omega) / (70 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega) = 41,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{vyst} = 5 \text{ k}\Omega$ .

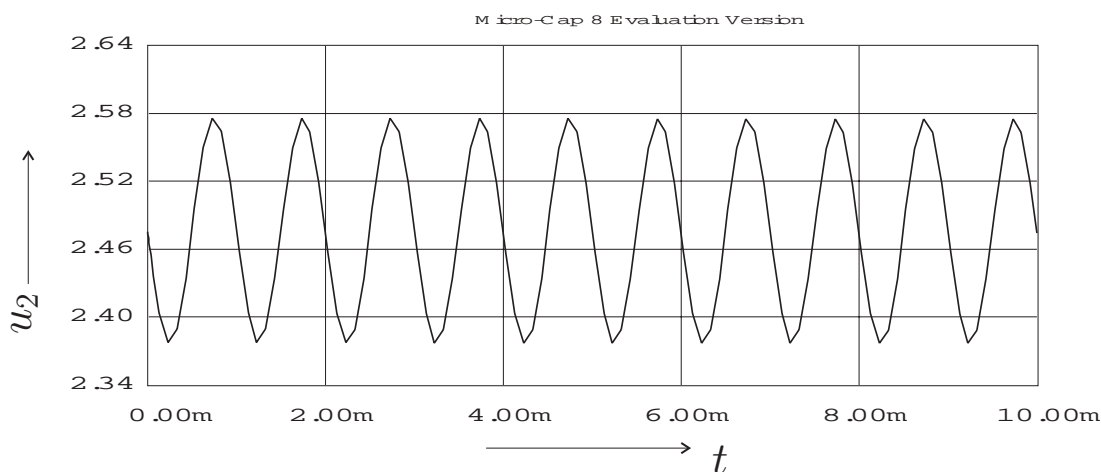
## Struktura CMOS

Na závěr výkladu o unipolárních tranzistorech uvedeme strukturu, která zaujímá význačné postavení v konstrukci integrovaných obvodů. Jedná se o kombinaci tranzistorů s kanálem typu N a P. Možnost využít takovou kombinaci jako zesilovač ukazuje obrázek. V dalších kapitolách poznáme, že ještě významnější je tato struktura v konstrukci logických integrovaných obvodů a počítačových čipů.



Obrázek 5.5: Zesilovač CMOS

Další obrázek ukazuje výstupní napětí  $u_2$  pro případ, že vstupní napětí  $u_1$  má amplitudu 1 mV a kmitočet 1 kHz.

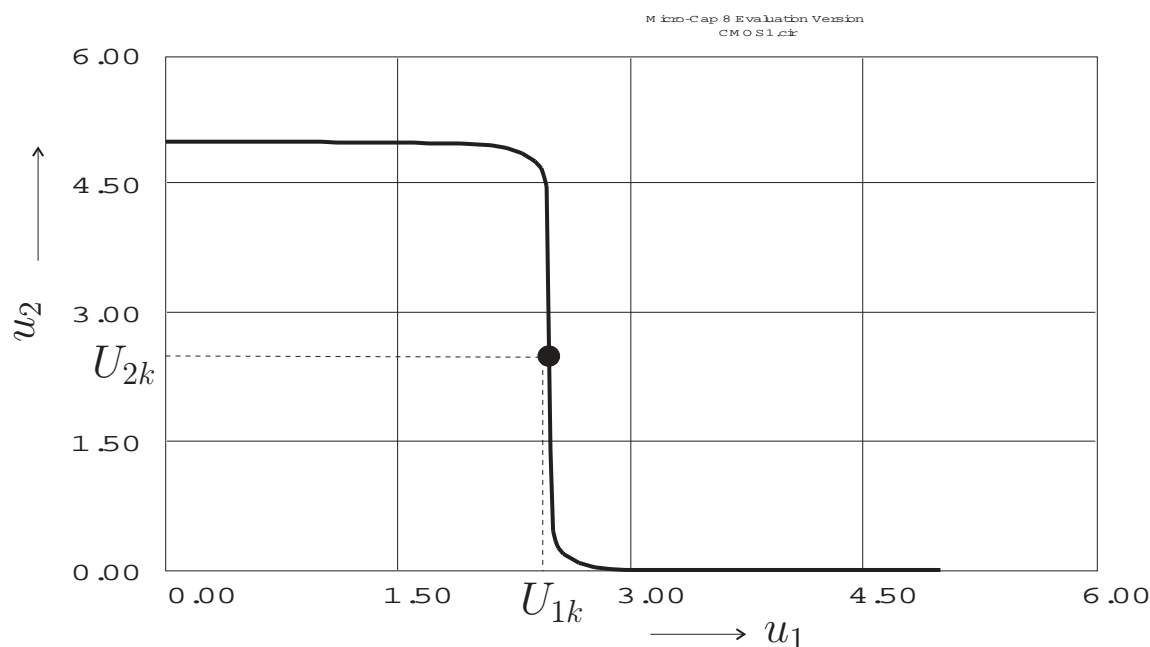


Obrázek 5.6: Výstupní napětí zesilovače CMOS

Pracovní bod je nastaven rezistorem  $R_1$  tak, že výstupní napětí má stejnosměrnou složku 2,5 V. Zesílení  $A \approx -100$ .

Vtip uspořádání struktury CMOS spočívá v tom, že oba tranzistory jsou buzeny týmž signálem a protože mají opačný typ vodivosti kanálu, způsobí rostoucí vstupní napětí zvětšování odporu horního tranzistoru a pokles odporu dolního tranzistoru (zvyšování proudu dolním tranzistorem). Výstupní napětí klesá díky oběma efektům, a pro klesající vstupní napětí se situace obrátí, horní tranzistor se otvírá a dolní zavírá, napětí na výstupu roste.

Následující obrázek ukazuje pro strukturu CMOS závislost výstupního napětí na vstupním, a to pro vstupní napětí v celém intervalu od nuly do hodnoty napájecího napětí.



Obrázek 5.7: Charakteristika vstup-výstup struktury CMOS

Vidíme, že efekt současného zavírání jednoho tranzistoru a otvírání druhého vede k tomu, že při velkém vstupním napětí je horní tranzistor zcela uzavřen (na výstupu je nulové napětí, protože dolní tranzistor je zcela otevřen) a naopak při nízkém napětí se uzavře dolní tranzistor a horní je otevřen (výstupní napětí je rovno napájecímu).

Zesilovač z předchozího obrázku má klidový bod uprostřed této charakteristiky ( $U_{1k} \approx U_{2k} \approx 2,5$  V).



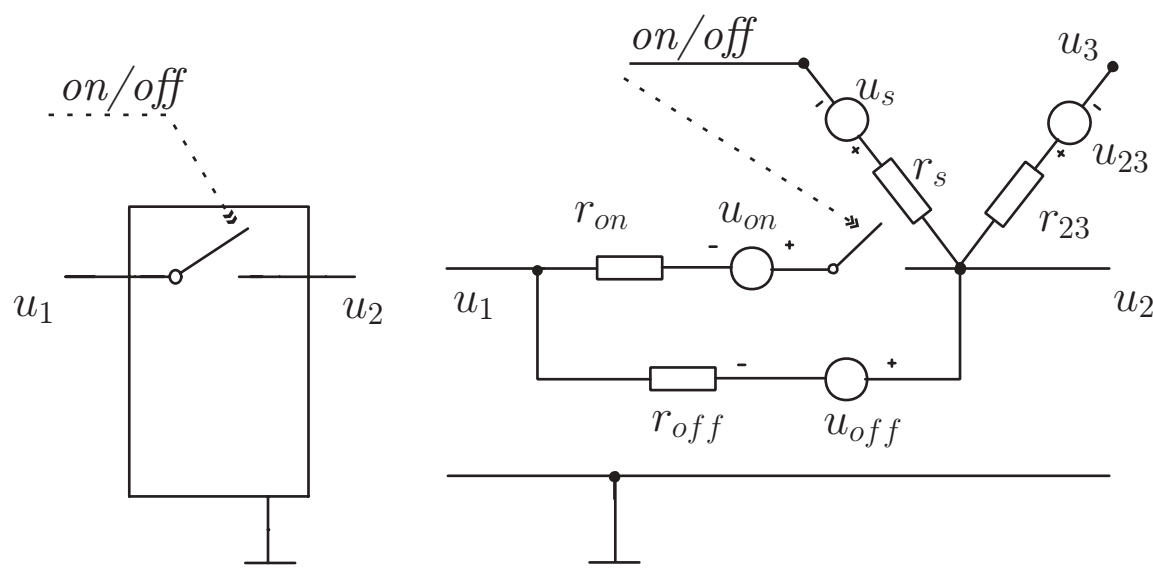
## Kapitola 6

### Spínače

V jakých aplikacích jsou používány spínače?

Jaké základní parametry charakterizují spínač?

Shrnutí základních parametrů vyznačených v obrázku:



Obrázek 6.1: Model spínače

- Odpor v sepnutém stavu  $r_{on}$
- Rušivé napětí vzniklé na sepnutém spínači  $u_{on}$
- Odpor v rozpojeném stavu  $r_{off}$
- Rušivé napětí vytvořené rozpojeným spínačem  $u_{off}$
- Izolace vůči okolí (dalším spínačům)  $u_{23}, r_{23}$
- Způsob ovládání
  - mechanické
  - elektromagnetické
  - elektrické
- Vliv řídicího obvodu na spínaný obvod  $u_s, r_s$
- Rychlost sepnutí a rozpojení.

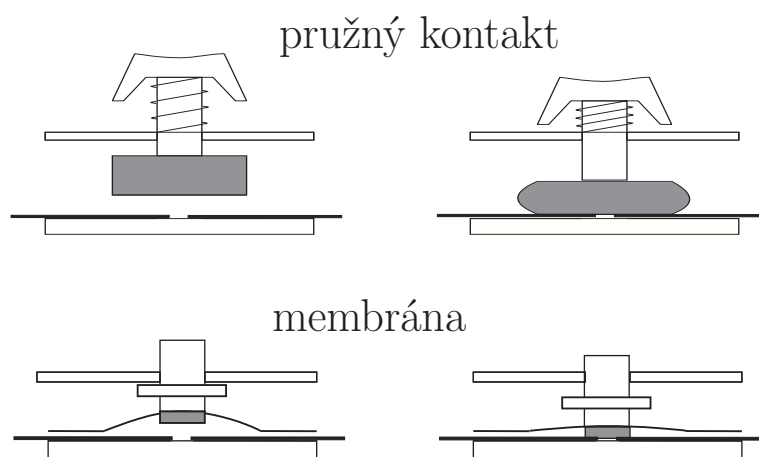
## Mechanický spínač

Mechanickým spínačem míníme dvojici kontaktů, jejichž spojení je ovládáno manuálně, nebo silou, která není vyvozena elektrickým obvodem. Pro kvalitní mechanický spínač, složený ze speciálních kovových slitin platí:

- Odpor v sepnutém stavu  $r_{on}$  může být v řádu tisícín ohmu a závisí na materiálu kontaktů a na stavu jejich povrchu.
- Rušivé napětí na sepnutém spínači  $u_{on}$  vzniká převážně termoelektrickým jevem, pokud spoje mezi různými materiály nemají shodnou teplotu
- Odpor v rozpojeném stavu  $r_{off}$  závisí na konstrukci a kvalitě povrchu materiálu, na kterém jsou kontakty namontovány. Může dosahovat terraohmů
- Rušivé napětí vytvořené rozpojeným spínačem  $u_{off} = 0$
- Izolace vůči okolí (dalším spínačům)  $u_{23}, r_{23}$  závisí na konstrukci a použitých materiálech. Většinou je působení okolních elektrických obvodů zanedbatelné
- Rychlost sepnutí a rozpojení závisí na setrvačných hmotách kontaktů a mechanické konstrukci. Bývá v řádu milisekund až sekund.

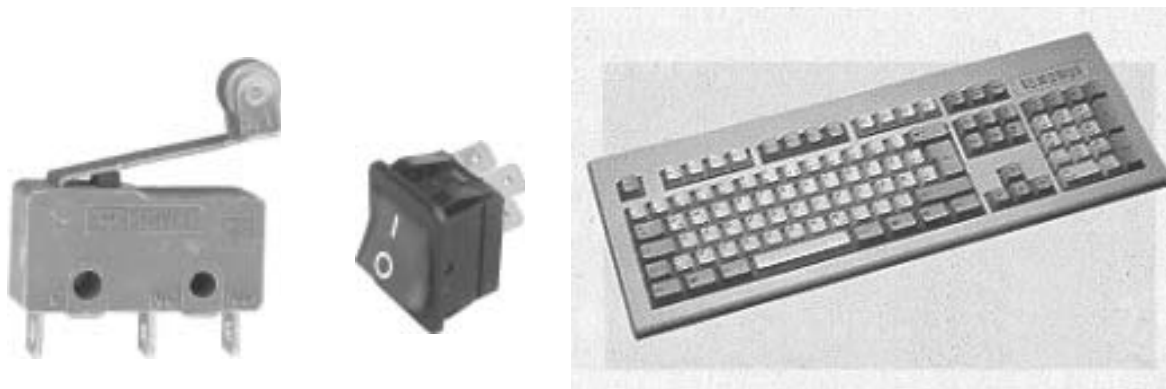
Specifickým problémem mechanických spínačů jsou tzv. „odskoky“ kontaktů. Jedná se o jev, který souvisí se setrvačným chováním pružného materiálu, z kterého bývají kontakty vyrobeny. V okamžiku sepnutí může dojít ke krátkému (i opakovanému) rozpojení a spojení, které se teprve po čase ustálí v sepnutém stavu. V závislosti na mechanických vlastnostech kontaktu mohou odskoky trvat několik jednotek až desítek milisekund.

Zvláštním případem mechanických spínačů jsou klávesy počítačových klávesnic a klávesnic kalkulaček a mobilních telefonů, u nichž je spínání obvodu zabezpečeno vodičem, který je přitlačen k dvojici kontaktů na desce plošných spojů. Kontakt může být kovový (dobře ošetřený proti korozi), nebo také z vodivé pryže, která tvoří pružnou membránu. Odpor v sepnutém stavu může být u takových klávesnic v řádu jednotek až stovek ohmů. Sepnutí je vyhodnoceno elektronickým obvodem.



Obrázek 6.2: Spínače

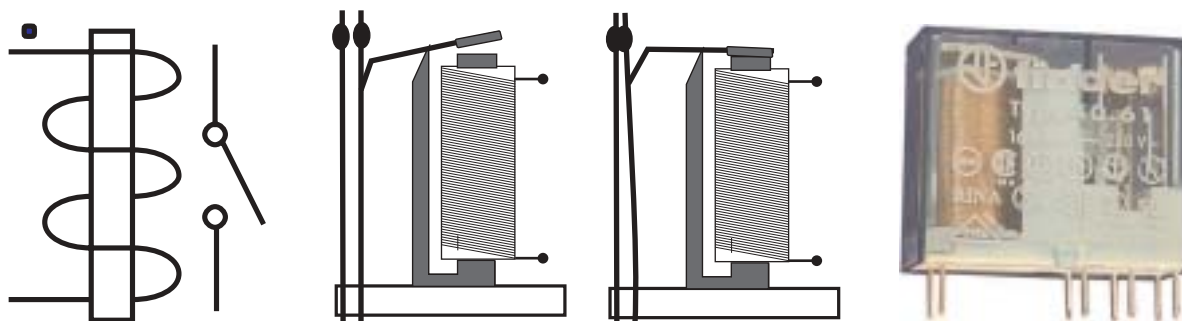
Pro pružný kontakt je typickou aplikací počítačová klávesnice, pro membránový kontakt je typickým příkladem aplikace mobilní telefon.



Obrázek 6.3: Spínače

## Elektromagnetické relé

Z hlediska spínaného obvodu je možno elektromagnetické relé považovat po všech stránkách za mechanický spínač, který jsme již popsali. Do úvah vstupuje řídicí elektrický obvod, který může být zcela izolovaný od obvodu spínaného. Je však třeba počítat s možností ovlivnění spínaného obvodu rušivými signály vytvořenými elektromagnetickým polem a kapacitními vazbami.

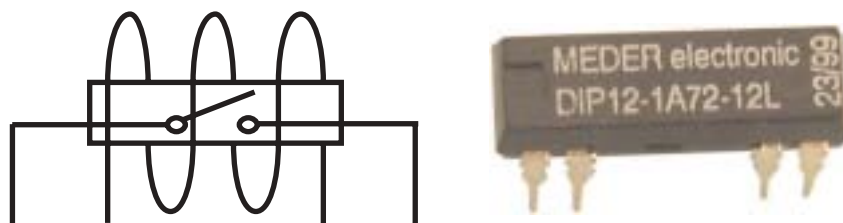


Obrázek 6.4: Klasické relé

Relé je sestaveno z elektromagnetu, který pohybuje kotvou a ta mechanicky ovládá spínání, vypínání a přepínání kontaktů. Jedním elektromagnetem lze ovládat větší množství kontaktů s různými funkcemi.

Rychlost spínání a vypínání je určována dvěma zpožďujícími činiteli – přechodným dějem ve vinutí cívky a setrvačnými hmotami kotvy a pérového svazku nesoucího kontakty. Doba přitahu a odpadu kotvy se pohybuje v mezích od desítek milisekund do zlomků sekund. Existují i relé s uměle zpožďovaným sepnutím a rozpojením.

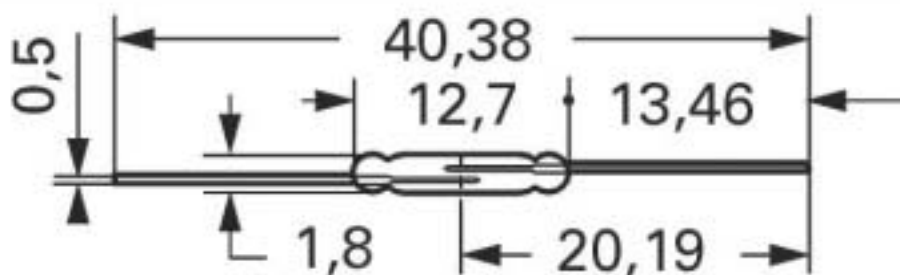
**Jazýčkové kontakty** mají kontaktní pružiny vyrobené z feromagnetického materiálu a zatavené ve skleněné trubičce. Vnější dostatečně velké magnetické pole zmagnetuje kontaktové pružiny, které se vzájemně přitahnou a tím se kontakty spojí. V jazýčkovém relé jsou kontakty vloženy do jádra budicí cívky, kde procházející proud vytvoří magnetické pole potřebné k sepnutí.



Obrázek 6.5: Jazýčkové relé

Rychlá jazýčková relé dosahují spínací a vypínací doby v řádu desetin až jednotek milisekund.

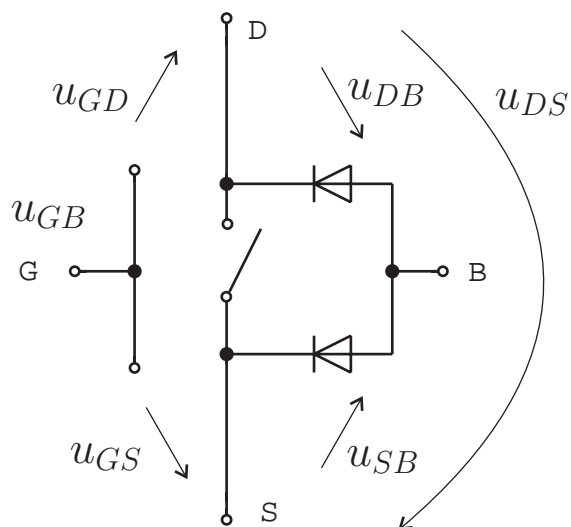
Samotný jazýčkový kontakt lze také spínat permanentním magnetem. Může pak sloužit jako indikátor polohy (koncový spínač) a indikátor pohybu.



Obrázek 6.6: Jazýčkový kontakt

## Polovodičové spínače – FET

V současné době jsou ve funkci elektronického spínače nejčastěji používány struktury tranzistoru řízeného elektrickým polem. Uvedli jsme, že řídicí elektroda ovládá svým napětím vůči substrátu tloušťku vodivého kanálu, a to od úplného potlačení vodivé vrstvy až po velmi tlustý, vodivými nosiči náboje naplněný, vodivý kanál.



Obrázek 6.7: FET jako spínač

K vytvoření modelu spínače s FETem jsme mohli velmi jednoduše upravit model, který pro FET platí v širokém rozsahu aplikací. Vidíme, že oproti mechanickým spínačům dostáváme elektronický spínač (bez pohyblivých mechanických dílů), který však přináší zásadní změnu v tom, že nelze zcela odděleně řešit řídicí a spínaný obvod (spínání nelze ovládat mechanicky). V elektronickém spínači bude ve většině konstrukcí nutno počítat se vzájemnými interakcemi mezi oběma obvody. Získáme za to spínač rychlejší než jakýkoli mechanický spínač, spínač laciný a spolehlivý s velmi dlouhou životností.

---

Shrneme údaje o vlastnostech spínače s MOSFETem a potom budeme o některých specifikách diskutovat:

- Odpor v sepnutém stavu  $r_{on}$  může být v řádu desetin i setin ohmu. Prakticky použitelné jsou však i spínače s odporem v sepnutém stavu v řádu desítek ohmů. Nesmíme však zapomenout na vyčerpateľnost volných nosičů náboje, takže sepnutý spínač má vždy omezený maximální proud, který lze spínačem vést
- Rušivé napětí vzniklé na sepnutém spínači  $u_{on}$  je v ustáleném stavu nulové – spínač sám žádné rušení nevytváří. Je však třeba počítat s kapacitní vazbou mezi řídicí elektrodou a kanálem, takže změny napětí na gatu se mohou přenést na kanál, zvláště v okamžiku vypínání a spínání
- Odpor v rozpojeném stavu  $r_{off}$  dosahuje velmi vysokých hodnot řádu megaohmů až terraohmů
- Rušivé napětí vytvořené rozpojeným spínačem  $u_{off}$  – platí totéž, co bylo zmíněno u sepnutého spínače
- Izolace vůči okolí (dalším spínačům) musí být zajištěna napěťovými poměry na elektrodách spínače – bezpečně uzavřené diody S-B a D-B
- Způsob ovládání a vliv řídicího obvodu na spínaný obvod: Spínač je ovládán napětím řídicí elektrody G vůči substrátu B. Určitým problémem je, že v sepnutém spínači je mezi substrátem a řídicí elektrodou vložen vodivý kanál, který na sobě má napětí spínaného obvodu, takže může být vodivost kanálu ovlivněna napětím, které je spínačem spínáno. To musí respektovat napětí na řídicí elektrodě G tím, že kanál dostatečně otevře, i když se napětí kanálu mění. K ovládání není potřeba žádný elektrický výkon, avšak kapacita gatu proti substrátu (kanálu) může u výkonových spínačů dosahovat řádově až nanofaradů

- Rychlost sepnutí a rozpojení: Při sepnutí a rozpojení hraje významnou roli přechodný děj, při kterém se nabíjí a vybíjí kapacita řídicí elektrody. Tato kapacita souvisí s požadavkem na vodivost a proudovou zatížitelnost vytvořeného kanálu. Čím větší má být vodivost sepnutého spínače, tím větší je kapacita gatu.

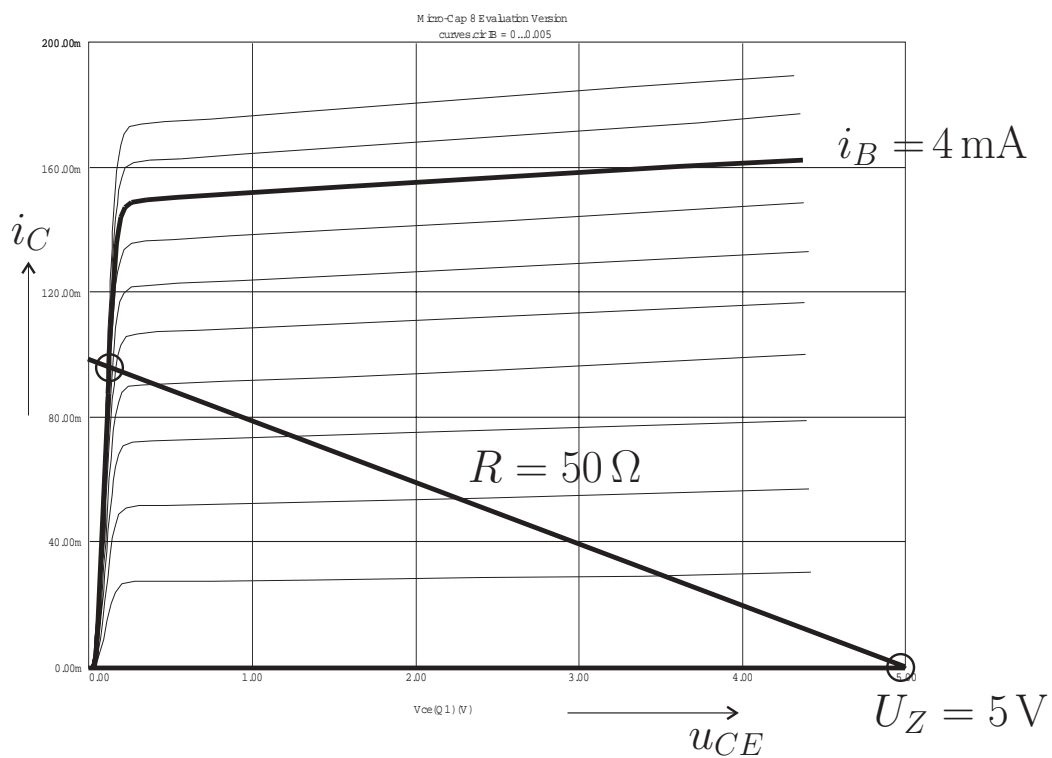
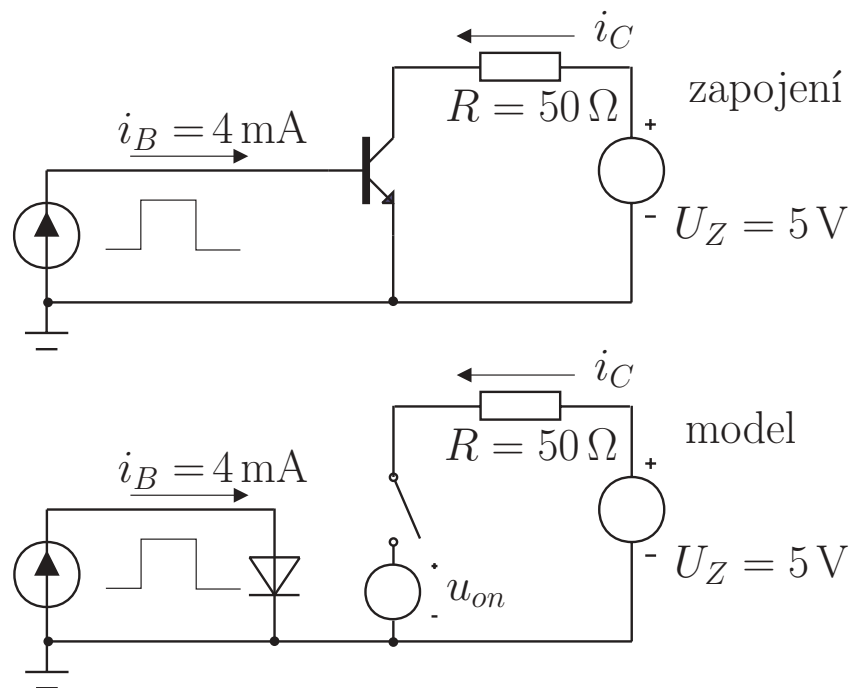
Např. spínací MOSFET IRF450 spíná proud max. 12 A (odpor sepnutého spínače je  $0,4\ \Omega$ ). Na rozpojeném spínači může být až 500 V, vstupní kapacita je 2,7 nF a čas sepnutí a vypnutí cca 200 ns (při dostatečně malém výstupním odporu zdroje řídicího signálu).

V přepínači signálů (analogovém multiplexeru) jsou použity paralelně spojené komplementární MOSFETy, které zajišťují konstantní hodnotu odporu v sepnutém stavu při proměnném napětí na spínači, a to v řádu sto ohmů, se spínacím časem v řádu 100 ns.

V logických členech CMOS je odpor sepnutého spínače v řádu desítek ohmů a časy sepnutí v jednotkách až desetínách nanosekundy.



# Polovodičové spínače – bipolární tranzistor



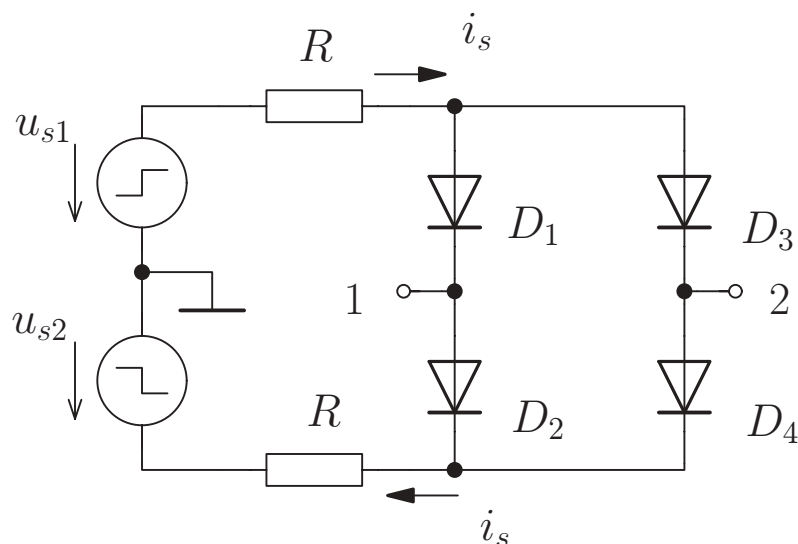
Obrázek 6.8: Charakteristiky tranzistoru jako spínače

- Odpor v sepnutém stavu  $r_{on}$  může být v řádu desetin i setin ohmu. Omezení maximálního proudu, který lze spínačem vést, je dáno hodnotou zesilovacího činitele a velikostí budičího proudu v obvodu báze. Spínač je schopen spínat proud jednoho směru, a to do společné svorky s řídicím obvodem
  - Rušivé napětí vzniklé na sepnutém spínači  $u_{on}$  je v ustáleném stavu v řádu jednotek až desítek milivoltů
  - Odpor v rozpojeném stavu  $r_{off}$  dosahuje velmi vysokých hodnot. Ve vypnutém stavu je třeba respektovat existenci průrazného napětí přechodu kolektor-báze
  - Rušivé napětí vytvořené rozpojeným spínačem  $u_{off} = 0$
  - Izolace vůči okolí je dána izolací spínacího tranzistoru. Řídicí a spínaný obvod mají společnou (zemní) svorku
  - Způsob ovládání a vliv řídicího obvodu na spínaný obvod: Spínač je ovládán proudem do báze tranzistoru, takže řídicí proud protéká jednou z částí spínaného obvodu
  - Rychlost sepnutí a rozpojení: Při sepnutí a rozpojení hraje významnou roli přechodný děj, při kterém se v prostoru báze hromadí nosiče náboje. Proto je zvláště proces vypínání provázen „zotavením“ prostoru báze. Je-li tranzistor sepnut tak, že napětí kolektoru klesne pod napětí na bázi – tranzistor je nasycen, dochází při uzavírání tranzistoru k tzv. saturačnímu zpoždění. To lze omezit jenom tím, že pomocné obvody nedovolí kolektorovému napětí poklesnout až k milivoltovým hodnotám, ale zabezpečí napětí  $u_{on}$  na sepnutém spínači v řádu několika set milivoltů
- Spínací tranzistory mohou dosahovat rychlosti sepnutí v řádu zlomků až jednotek nanosekund. Obdobné časy lze získat i při vypnutí, je-li potlačeno saturační zpoždění.

## Polovodičové spínače – různé

### • Dioda – můstkový spínač

I když je polovodičová dioda součástí se dvěma svorkami (není zde zvláštní přívod, který by spínání ovládal), lze s diodami vytvořit zapojení, které se dá použít jako extrémně rychlý spínač. Zapojení ukazuje následující obrázek.



Princip spočívá v tom, že se při zapnutí uvádějí diody vnějším obvodem do stavu propustné polarizace ( $u_{s1}$  kladné,  $u_{s2}$  záporné), kdy mají malý diferenciální odpor (vykazují malé změny napětí na svých svorkách při změnách procházejícího proudu) a přenesou signál ze svorky 1 na svorku 2. Při vypnutí je na diody přivedeno dostatečně velké závěrné napětí ( $u_{s1}$  záporné,  $u_{s2}$  kladné), které zabrání změnám napětí na svorce 1 měnit napětí na svorce 2. Pokud jsou napětí  $u_{s1}$  a  $u_{s2}$  v absolutní hodnotě shodná (symetrické buzení), a to jak při sepnutí, tak při vypnutí, neovlivní řídicí signál obvodové veličiny ani ve vstupním obvodu na svorce 1, ani ve výstupním obvodu na svorce 2.

Diodový můstkový spínač se Schottkyho diodami dosahuje spínacích časů v řádu pikosekund.

## • Triak a tyristor

Triak a tyristor jsou součástky, které se chovají jako spínače, k jejichž sepnutí stačí krátký impuls na řídicí elektrodě. Sepnutý stav trvá po dobu, po kterou spínačem prochází proud. Pokud ve spínaném obvodu proud poklesne pod určitou hodnotu (příp. se obrátí polarita napětí na spínači), spínač vypne a sepnutí musí zabezpečit nový řídicí impuls. Existují i součástky, které lze vypnout impulsem na řídicí elektrodě (GTO). Schematické symboly ukazuje následující obrázek.

