Základy polovodičové techniky

Určeno pro posluchače bakalářských studijních programů FS

Obsah

1. Úvod str. 2
2. Polovodičové prvky str. 2
    2.1. Polovodičové diody str. 3
    2.2. Tyristory str. 7
    2.3. Triaky str. 8
    2.4. Tranzistory str. 9
3. Usměrňovače

4. Střídače str.
5. Střídavé měniče napětí str.

Doc. Ing. Václav Vrána CSc.
Ing. Václav Kolář, Ph.D.

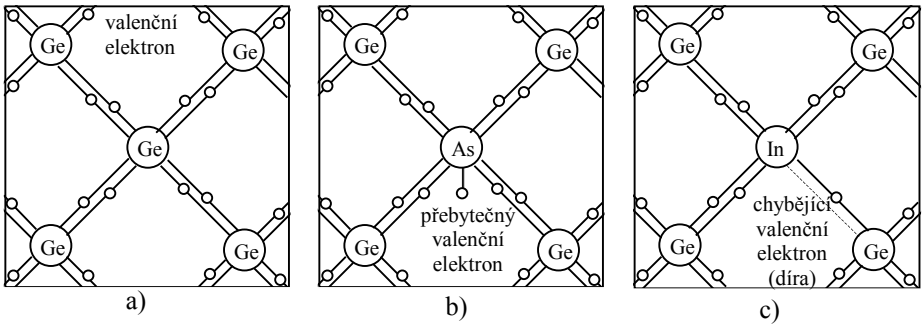
leden 2003

1. Úvod

Polovodičová technika se začala intenzivně rozvíjet jako samostatný obor od roku 1949. Pronikla do všech oblastí elektrotechniky a polovodičové prvky, díky svým přednostem (nižší spotřeba energie, vyšší spolehlivost, životnost, odolnost, menší rozměry) nahradily dříve používané vakuové elektronky (jediným dosud běžně přežívajícím druhem elektronek jsou obrazovky).
V následujícím textu se budeme zabývat principem polovodičového jevu, konstrukcí základních polovodičových součástek a jejich využitím zejména v silnoprouodé elektrotechnice.
Kromě takzvaných diskrétních polovodičových součástek, které zde probereme (tedy diody, tranzistory, tyristory, triaky) jsou od sedmdesátých let 20. století stále významnější takzvané integrované obvody (IO). IO je součástka, která má v sobě umístěn celý obvod sestávající někdy z několika desítek, ale někdy také několika milionů tranzistorů, diod a rezistorů, při velikosti několika centimetrů. Použití IO přineslo další miniaturizaci, zlevnění a zvýšení spolehlivosti elektronických zařízení. Bez nich by elektronika nedosáhla dnešní úrovně.
(Například první elektronkový samočinný počítač ENIAC osazený elektronkami z roku 1946 pracoval s frekvencí 100 kHz, zabíral plochu tělocvičny, stál 486 804 dolarů v tehdejší měně, a střední doba mezi poruchami byla 6 hodin. Jeho výpočetní výkon byl sice na svou dobu nepředstavitelně velký, ale z dnešního pohledu maličký. Obrovský posun výpočetní techniky do dnešních dnů umožnily mimo jiné právě IO.)
Z důvodu omezeného prostoru se ale IO v tomto textu nebudeme zabývat.

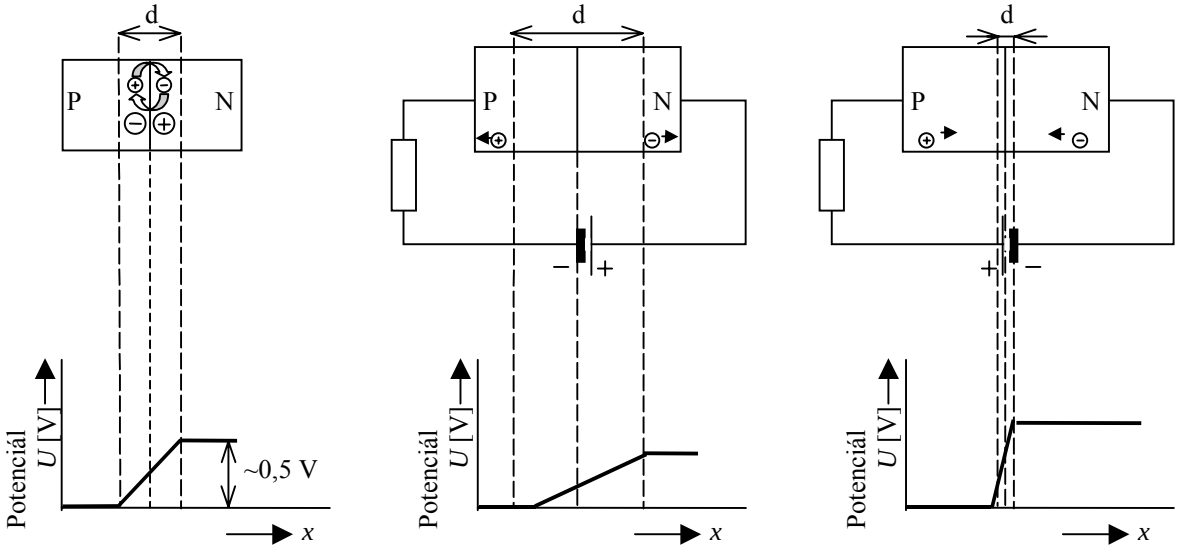
2. Polovodičové prvky

Funkce a vlastnosti polovodičových prvků jsou dány vlastnostmi látek zvaných polovodiče.Co je to polovodič? V dostupné odborné literatuře lze získat zevrubný popis polovodivého efektu. Pro účely tohoto předmětu postačí následující představy. Rozdíl mezi vodičem, polovodičem a izolantem spočívá v pevnosti vazby valenčních elektronů na jádra atomů. U vodičů je tato vazba velmi slabá a po připojení elektrického napětí se volné elektrony pohybují ve směru elektrického pole. Jinak řečeno, elektrický odpor vodičů je malý. U polovodičů a izolantů je vazba valenčních elektronů s jádry natolik silná, že za normálních podmínek se tyto elektrony neuvolní a proto po přiložení elektrického napětí nateče proud. Situace se změní dodává-li se elektronům energie prostřednictvím tepla nebo jiného záření. Zvyšuje-li se, např. teplota polovodiče nebo izolantu, odtrhnou se některé valenční elektrony od jádra atomu a zvýší tím vodivost materiálu. Rozdíl mezi polovodičem a izolantem se udává poměrem jejich vodivosti za pokojové teploty. Elektrická vodivost izolantů je asi 10^{15} krát menší než vodivost polovodičů.
Typickými polovodivými materiály je germanium a křemík. Atom těchto prvků má čtyři valenční elektrony, takže každý atom je se sousedním spojen čtyřmi vazbami. Pokud se zvýší jeho teplota vznikne pár – volný elektron a díra. Dírou je nazvána mezera ve struktuře po uvolněném elektronu. Tato dvojice se pak může vlivem vnějšího elektrického pole pohybovat a vzniká vodivost zvaná vlastní vodivost polovodičů. Tato vodivost je silně závislá na teplotě materiálu.
Druhým typem vodivosti je vodivost nevlastní – příměsová. Vznikne tím, že do čistého čtyřmocného křemíku je přimícháno určité množství pěti- nebo třímocného prvku



Obr. 2-1. Typy vodivosti v polovodiči: a) vlastní, b) příměsová N, c)příměsová P

(As, In). U každého atomu pětimocného prvku zůstane jeden přebytečný volný elektron a vzniklá vodivost je vodivost typu N (negativní). Naopak u trojmocné příměsi bude jeden valenční elektron chybět, vznikne „díra“ a tím vodivost typu P (pozitivní). Takto vzniklý volný elektron i díra jsou snadno pohyblivé a výrazně zvyšují vodivost materiálu. (obr.2-1)
Spojí-li se dva polovodiče různých typů tak, že jejich krystalové mřížky těsně na sebe navazují, vzniká na styku obou polovodičů tzv. přechod P – N. Vlivem difuze se vytváří v bezprostředním okolí styku polovodičů tzv. potenciálová přehrada. Díry s polovodiče typu P přecházejí do polovodiče typu N a naopak. Tato difuze, díky vznikající elektrické potenciálové přehradě se zastaví a poměry na přechodu se ustálí (obr.7.2a). Rozdíl potenciálů E mezi oběma polovodiči je poměrně malý. U germania je to asi 0,4 V, u křemíku 0,6 V. Šířka potenciálové přehrady d je ale velmi úzká (d = 10^{-3} až 10^{-6} cm). Elektrické pole nabývá vysokých hodnot a jeho silové účinky na elektrony jsou značné. Za normálních podmínek neprochází přes P – N přechod téměř žádný proud. Přiloží-li se k přechodu vnější napětí, vzniklá rovnováha se změní.
Pokud je vnější napětí orientováno tak, že na části N je záporná pól zdroje, zmenšuje se potenciálová přehrada a mohou ji pronikat elektrony s menší rychlostí. P – N přechod je polarizován v propustném směru (obr.2-2b). Při opačné orientaci vnějšího napětí se potenciálová přehrada ještě zvětšuje a elektrostatické síly bránící průchodu elektronů přes přechod se zvětší. V tomto případě jde o závěrný směr přechodu. V závěrném směru teče diodou jen malý proud, nazývaný zbytkový, způsobený především ne dostatečně čistou výrobou (obr.2-2c)

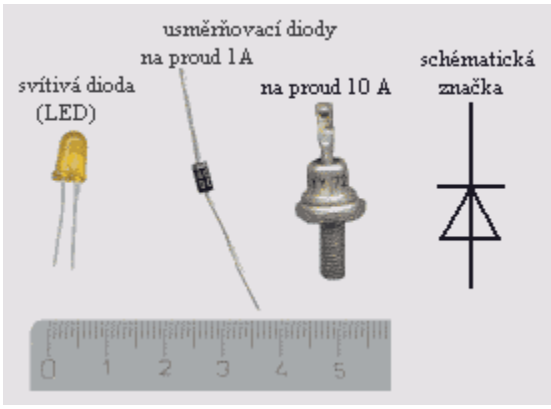


Obr. 2-2 – PN přechod s vnějším napětím: a)bez napětí b)v propustném směru c)v závěrném směru

2.1 Polovodičové diody

Polovodičové diody jsou nelineární prvky, které využívají vlastností polovodičového přechodu P – N. Podle oblasti použití je můžeme rozdělit do několika základních skupin:

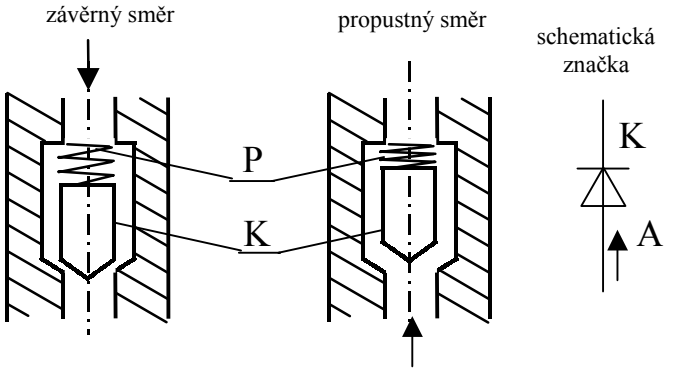
a) Usměrňovací diody
b) Zenerovy diody
c) Tunelové diody
d) Schottkyho diody
e) Variapy



Obr.2-3 – Polovodičové diody

f) Světelné diody a fotodiody

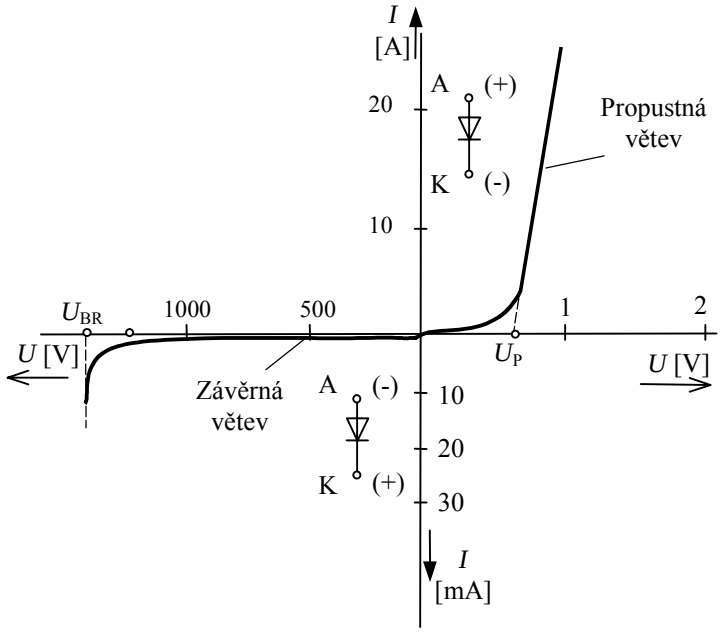
a) Usměrňovací diody patří k nejpočetnější skupině diod využívajících usměrňovacích účinků P – N přechodů k usměrňování střídavých proudů. Schématická značka diody je na obr. 2-3. Dioda má dvě elektrody, anodu a katodu. Vede proud jen jedním směrem a to od anody ke katodě. Pokud je anoda kladnější než katoda proud teče a dioda je zapojena v propustném směru. V opačném případě, kdy katoda je kladnější anody, je dioda orientována v záměrném směru a proud diodou neteče.



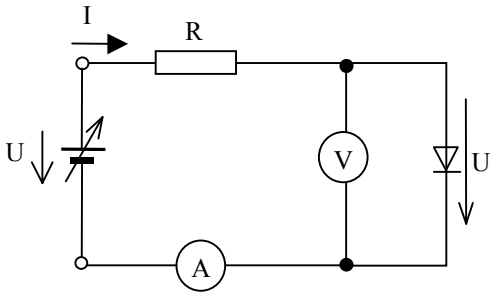
Obr.2-4 – Hydraulická analogie diody

Hydraulickou analogii diody je zpětný ventil, obr.2-4. Jedná se o ventil, jehož kuželka K je přitlačována pružinou p. Působí-li tlak ve směru šipky, kuželka dosedá do sedla a kapalina neproudí. V opačném případě bude kuželka nadzvedávána proti síle pružiny ze sedla a kapalina bude ventilem proudit.

Ideální dioda má v propustním směru nulový odpor a v závěrném směru nulovou vodivost. Vlastnosti reálné diody popisuje její voltampérová charakteristika, obr.2-5. Je to závislost velikosti proudu diodou na velikosti napětí mezi její anodou a katodou. VA charakteristika popisuje základní statické vlastnosti diody. Její tvar lze získat měřením pomocí zapojení na obr. 2-6.



Obr. 2-5 – Voltampérová charakteristika diody



Obr. 2-6 – Zapojení pro měření VA charakteristiky diody

Při zvyšování napětí v propustném směru roste proud diodou pozvolna až do hodnoty prahového napětí U_p. U germania je jeho hodnota asi 0,4 V, u křemíku asi 0,6 V. Při dalším zvyšování proud diodou poroste daleko rychleji. V závěrném směru je proud velmi malý až do vysokých hodnot závěrného napětí napětí U_{BR}. Při hodnotě U_{BR}, nazývané průrazné (breaking), se velikost proudu začne prudce zvyšovat. Tuto hodnotu by napětí v závěrném směru nemělo překročit, protože dochází k průrazu diody a tím k jejímu zničení. Hodnota průrazného napětí je jedním z omezujících faktorů a udává, jak velká napětí může dioda usměrňovat. Druhým omezujícím faktorem je velikost proudu v propustném směru. Při průchodu proudu diodou vznikají tepelné ztráty. Teplo je nutno odvádět. Schopnost odvodu tepla je závislá na konstrukci diody a jejím vnějším chlazení.

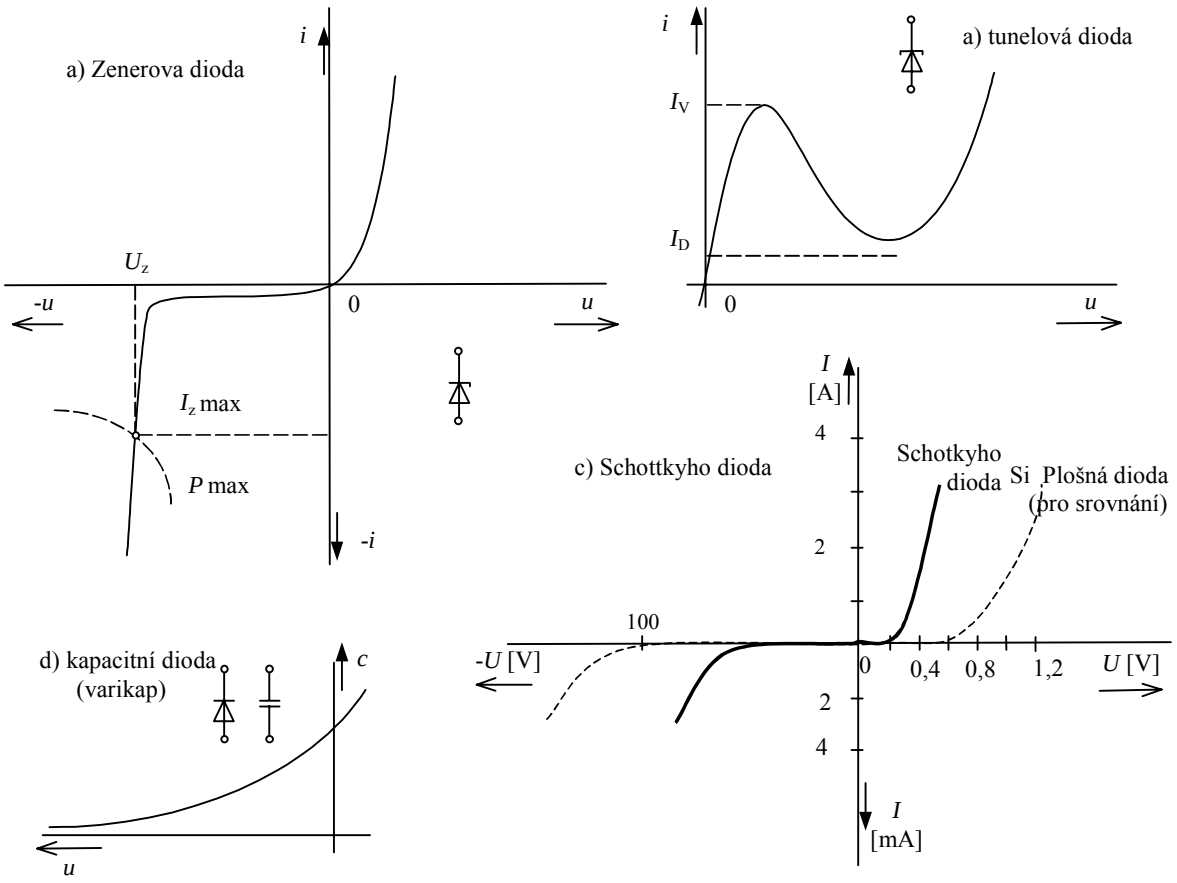
Podle provedení jsou diody hrotové a plošné.
U hrotových diod je P – N přechod vytvořen na styku destičky polovodiče s hrotem wolframového drátku. Používají se pro usměrňování malých proudů až do vysokých hodnot kmitočtů.
U plošných diod je přechod vytvořen na daleko větší ploše, například difuzí par příměsí prvků do základní polovodičové destičky. Plošné diody se využívají pro usměrňování větších proudů. Jejich použití je omezeno na nižší kmitočty, protože velká plocha přechodu představuje i velkou kapacitu přechodu.
K ochraně před vlivy okolí je vlastní přechod zapouzdřen do skleněných, kovových nebo plastových pouzder. Pouzdra výkonových diod jsou konstruována tak, aby je bylo možno upevnit na vnější chladič, obr. 2-3. V současné době je do jednoho pouzdra umisťováno několik diod vzájemně propojených tak, aby vytvářely integrované celky, např. můstkový usměrňovač. Usměrňovací diody se vyrábějí pro proudy do 10^3 A a napětí do tisíce voltů v závěrném směru.

b) Zenerovy diody

Vhodnou technologií výroby přechodu P – N (bohatstvím příměsí a konstrukcí) lze u charakteristiky křemíkové plošné diody dosáhnout v závěrné oblasti strmého zlomu (nedestruktivního průrazu). Závěrný proud se po překročení napětí U_z (tzv. Zenerova) rychle, lineárně, zvyšuje (obr.2-7a). Velikost Zenerova napětí je závislá na měrném odporu výchozího polovodičového materiálu a může se pohybovat od 2 do 120 V. Zenerova dioda se používá v obvodech stabilizátorů a omezovačů napětí. Při provozu se nesmí překročit maximální proud I_{zmax}, který je pro daný typ určen maximální výkonovou ztrátou P_{max}. Vyrábějí se diody pro P_{max} od 0,1 do 10W. Důležitým parametrem diod je diferenciální odpor $R_d = \Delta u/\Delta i$, který určuje účinnost stabilizace.

c) Tunelové diody

Dalším zvyšováním příměsí u polovodičů se zvyšuje počet minoritních nositelů a vzrůstá proud v závěrném směru. Současně se zmenšuje potenciálová přehrada a v propustné části dochází již při malých napětích k tzv. tunelovému jevu, při kterém přechodem P – N protéká velký proud (obr. 2-7b). Po dosažení vrcholu proudu I_v přechází charakteristika tunelové (Esakiho) diody v klesající část se záporným diferenciálním odporem. Po dosažení proudu I_v charakteristika přechází v obvyklý tvar. Záporný diferenciální odpor tunelových diod se využívá v obvodech oscilátorů a spínačů až do vysokých kmitočtů.



Obr. 2-7 - VA charakteristiky: a) Zenerovy diody, b) tunelové diody, c) Schottkyho diody d) charakteristika kapacitní diody (varikapu)

d) Schottkyho diody

Pro usměrňování střídavého proudu (do 50 A) až do vysokých frekvencí (0,5 až 1 MHz) se používají Schottkyho diody. K usměrňujícímu účinku v nich dochází na styku polovodiče s kovovou elektrodou. Oproti běžným plošným diodám mají podstatně menší prahové napětí U_p, ale poněkud větší zbytkový proud v závěrném směru a menší průrazné napětí (desítky voltů), viz obr. 2-7c.

e) Kapacitní dioda – VARIKAP

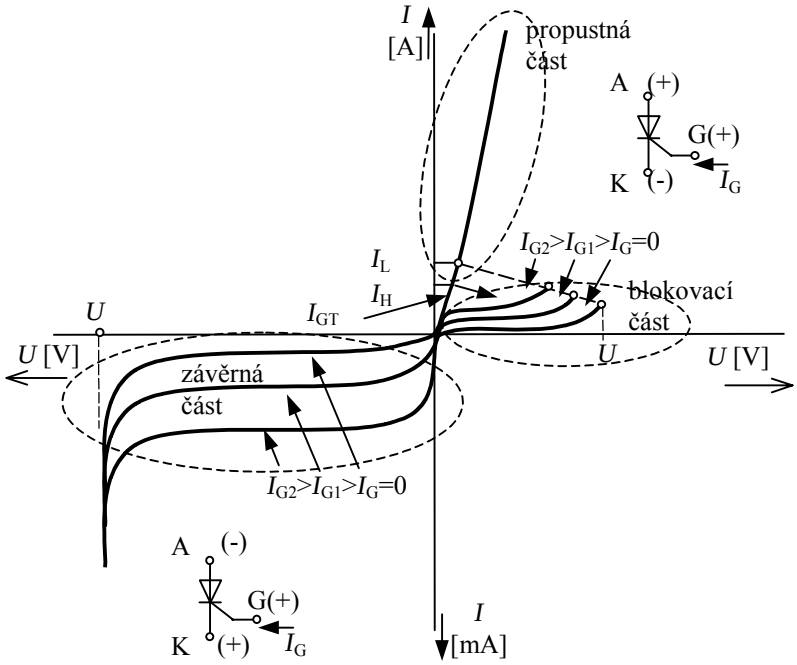
Varikap je plošná dioda u které je kapacita P – N přechodu závislá na přiloženém napětí. Typický průběh závislosti kapacity diody na napětí je na obr. 2-7d. Varikapů se používá jako ladicích prvků pro automatické dolaďování obvodů rozhlasových a televizních přijímačů. Umožňují zvýšení spolehlivosti elektronických obvodů a jejich výraznou miniaturizaci.

f) Fotodiody a svítivé diody

Diody využívající fotoelektrického a luminiscenčního jevu na přechodu P – N se používají v optoelektronice. Fotodiody jsou fungují jako snímače reagující na světlo, svítivé (luminiscenční či LED) diody se často používají jako signálky, či jako součást svítících displejů.

2.2 Tyristory

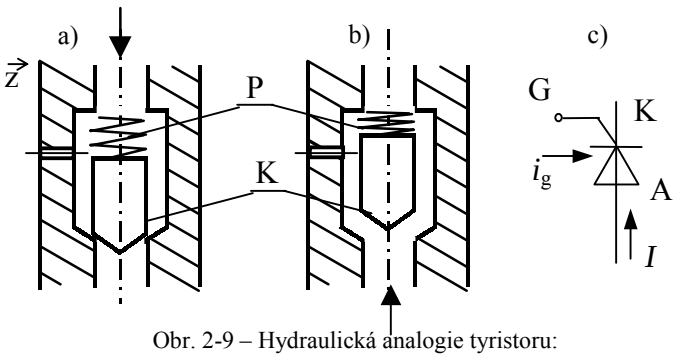
Tyristor je čtyřvrstvý polovodičový prvek, který mimo hlavních elektrod (katody a anody) má ještě další, řídicí, elektrodu (G). Z hlediska funkce je tyristor řízená usměrňovací dioda. Jeho vlastností popisuje voltampérová charakteristika, obr. 2-8. Charakteristiku je možno rozdělit na tři části: závěrnou, blokovací a propustnou . Přechod mezi blokovací a propustnou částí tvoří tzv. oblast záporného diferenciálního odporu.



Obr. 2-8 – VA charakteristika tyristoru

Vlastnosti tyristoru v oblasti závěrné části jsou víceméně shodné se závěrnou oblastí diody. Tyristorem protéká jen malý proud až do průrazné hodnoty závěrného napětí. Průběh proudu mezi anodou a katodou v blokovací části charakteristiky je závislý na velikosti proudu řídicí elektrodou I_G. Při zvyšování anodového napětí pomalu narůstá anodový proud až do hodnoty ležící na křivce. Při této hodnotě tyristor sepne, to znamená, že pracovní bod skokem přejde na část propustnou. Proudy v blokovací části jsou řádově malé a tyristor je v této oblasti prakticky uzavřen.

Propustná část charakteristiky tyristoru je shodná s průběhem charakteristiky usměrňovací diody. Od okamžiku sepnutí nemá proud řídicí elektrodou na činnost tyristoru již žádný vliv. Tyristor se uzavírá jen v případě, když proud mezi anodou a katodou poklesne pod hodnotu vratného proudu I_H, jehož hodnota se v praxi pokládá za velmi blízkou nule.

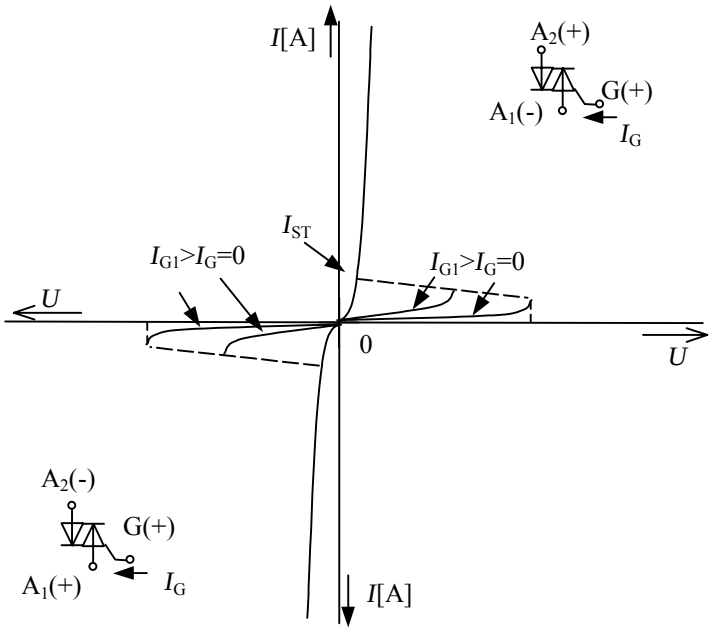


Obr. 2-9 – Hydraulická analogie tyristoru:
a)závěrný směr, b)propustný směr, c)schematická značka

Funkci tyristoru lze objasnit na jeho hydraulické analogii zobrazené na obr. 2-9a,b. Podobně jako u diody jde o zpětný ventil, který je doplněn blokovací západkou Z. Pokud je západka vysunuta chová se ventil jako zpětný, tzn. v jednom směru propouští a v druhém je uzavřen. Pokud se západka zasune nad kuželku ventilu, a to je možné jen při uzavřeném ventilu, pak bude ventil uzavřen bez ohledu na směr působení tlaku.

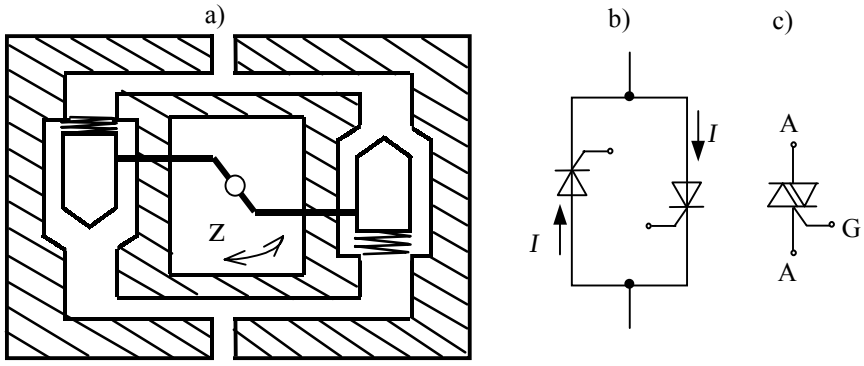
Tyristory se využívají pro bezkontaktní spínání elektrického proudu (bezkontaktní zapalování, zapínání spotřebičů apod.), k regulaci příkonu elektrického proudu (řízení osvětlení, bezeztrátová regulace výkonu topení, svítidel, elektrických motorů tramvají, trolejbusů, lokomotiv apod.). Jejich výhodou je velká rychlost spínání a velká proudová i napěťová zatížitelnost. Vyrábějí se pro obdobný rozsah napětí a proudů jako diody.

2.3Triaky



Obr. 2-10 – VA charakteristika triaku

Podstatnou nevýhodou tyristoru je jeho schopnost vést proud pouze jedním směrem. Proto byl vyvinut další polovodičový prvek, triak. Je to pětivrstvý bistabilní spínací prvek schopný vést elektrický proud oběma směry.Triak má vlastnosti přibližně odpovídající vlastnostem dvou antiparalerně zapojených tyristorů, obr. 2-11b, u kterých jsou řídicí elektrody vhodně propojeny v jedinou. Jeho vlastnosti popisuje voltampérová charakteristika zobrazená na obr. 2-10. V prvním i třetím kvadrantu je vlastně blokovací a propustná část charakteristiky tyristoru. Rozdíl mezi nimi bývá v různé velikosti proudu řídicí elektrodou potřebného pro sepnutí, při stejném napětí mezi anodou a katodou. Ve třetím kvadrantu bývá potřebná hodnota asi dvojnásobná. Tímto řešením se získávají větší regulační možnosti.



Obr.2-11 – Analogie triaku: a)hydraulická, b)pomocí dvou tyristorů, c)schematická značka

Vnější funkci triaku lze rozdělit na čtyři části:

- triak sepne, pokud je mezi hlavními elektrodami dostatečně velké napětí a do řídící elektrody se přivede proudový impuls o velikosti schopné k jeho sepnutí,
- triak vede, pokud proud mezi hlavními elektrodami neklesne pod hodnotu vratného proudu (v okolí nuly),
- triak se uzavírá, klesne-li proud pod hodnotu vratného proudu (nezáleží na velikosti proudu I_G),
- triak je uzavřen (rozepnut), pokud jim neteče proud a proud I_G má hodnotu menší než spínací (nezáleží na hodnotě napětí mezi hlavními elektrodami).

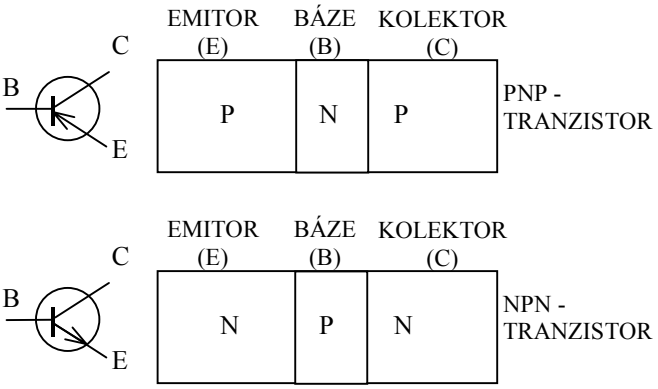
Funkci triaku dokresluje jeho hydraulická analogie na obr.2-11a. Je to antiparalerní (protisměrné) spojení dvou řízených zpětných ventilů, jejichž blokovací západky jsou spojeny pákou tak, aby byly ovládány současně. Oblasti použití triaků jsou v podstatě shodné s tyristory. Jejich aplikace je v řadě případů jednodušší.

2.4 Tranzistory

Tranzistor byl objeven v roce 1948 jako výsledek úsilí nahradit vakuové elektronky polovodičovým zesilovacím prvkem.

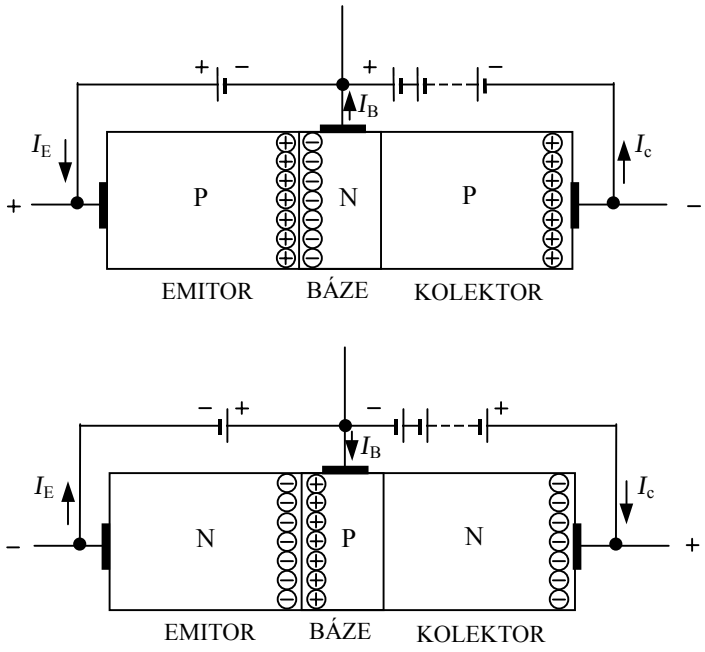
a) Popis funkce

Struktura tranzistoru se skládá se tří oblastí typu P a N, jež jsou za sebou řazeny buď ve sledu P – N – P, tj. tranzistor typu PNP, nebo N – P – N, tj. tranzistor typu NPN (obr.2-12). Vývody z jednotlivých oblastí se označují jako emitor E, báze B, kolektor C. Emitor vysílá (emituje, vystřikuje) pohyblivé nosiče nábojů do prostoru báze, odkud je přejímá (sbírá) kolektor.



Obr. 2-12 – Tranzistor PNP a NPN

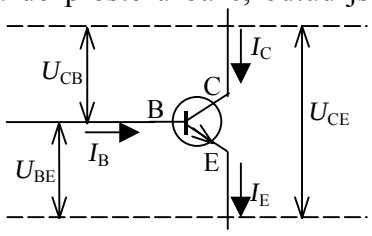
Tranzistor využívá dvou přechodů PN, jede je mezi emitorem a bází, druhý mezi kolektorem a bází. Tranzistor si lze představit složený ze dvou diod, emitorové a kolektorové, jež jsou zapojeny proti sobě. Přiloží-li se mezi kolektor a emitor napětí, neprochází proud, protože při obou možných polaritách vnějšího napětí je vždy jedna z diod polarizována závěrně. Funkci tranzistoru nelze vysvětlovat pomocí zapojení dvou diod, protože všechny tři oblasti vzájemně spolupracují především díky malé šířce střední oblasti, báze, na kterou se také přikládá vnější napětí.



Obr. 2-13 – Vnější napájení tranzistoru

Je-li napětí vnějšího zdroje U připojeno na tranzistor typu PNP tak, že kladný pól je spojen s emitorem, záporný s kolektorem a část tohoto potenciálního rozdílu je přivedena na bázi (obr.2-13), je báze oproti kolektoru kladná a oproti emitoru záporná. Pro typ NPN jsou polarity opačné. Pokud by působilo pouze napětí uvedené polarity mezi emitorem a bází, procházel by emitorovým přechodem velký proud, protože by se pohyboval značný počet děr z emitoru do báze, popř. velký počet elektronů z báze do emitoru.

Kolektor je však připojen na záporné napětí. Nosiče kladných nábojů (díry) přecházejí vlivem malého napětí mezi emitorem a bází přes první přechod do prostoru báze, odtud jsou však působením značného napětí mezi kolektorem a bází hnány přes druhý přechod a pravou oblast typu P ke kolektorovému vývodu. Proud, vycházející z emitoru, se tedy dělí do dvou složek: první složka směřuje k bázi, druhá ke kolektoru.



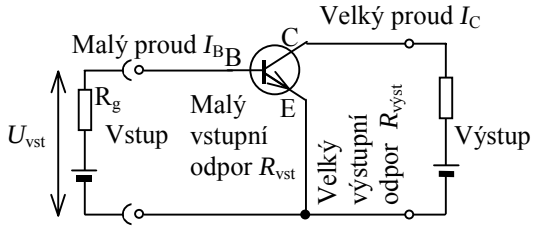
Obr. 2-14 – Označení proudů a napětí tranzistoru

Snahou výroby je taková konstrukce tranzistoru, aby co možná největší část emitorového proudu

přecházela do kolektoru a jen minimální zbytek do báze. U moderních tranzistorů činí proud báze jen několik setin či tisícin proudu emitoru. Emitorový proud I_E je tedy vždy větší než kterýkoli v obou zbývajících proudů, je roven součtu proudu báze I_B a kolektoru I_C.
Při rozboru tranzistorových obvodů se používá těchto označení proudů a napětí (obr.2-14):
I_E – stejnosměrný proud emitoru
I_C – stejnosměrný proud kolektoru
I_B – stejnosměrný proud báze
U_{BE} – stejnosměrné napětí báze – emitor
U_{CB} – stejnosměrné napětí kolektoru – báze
U_{CE} – stejnosměrné napětí kolektor – emitor

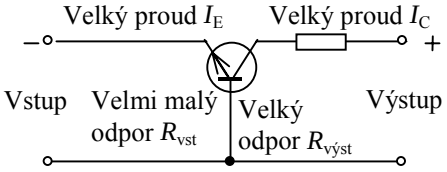
b) Základní zapojení tranzistoru

Tranzistor má tři vývody: emitor, bázi, kolektor. Je-li zapojen jako zesilovač, musí mít dvě svorky na vstupní a dvě na výstupní straně. Každý ze tří vývodů tranzistorů může být vstupem i výstupem zesilovače, a proto existují tři základní zapojení tranzistoru, nazývaná zapojení se společným emitorem (obr.2-15), se společnou bází (obr.2-16), se společným kolektorem (obr.2-17). Chování tranzistoru značně závisí na tom, které z uvedených zapojení je použito.



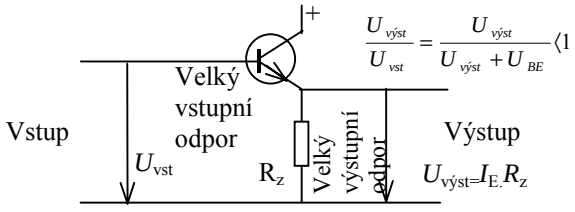
Obr. 2-15 – Zapojení tranzistoru se společným emitorem

V technické praxi se nejčastěji vyskytuje zapojení tranzistoru se společným emitorem (obr.2-15). Vstupní signál se u něj přivádí mezi bázi a emitor, výstupní signál se odebírá v obvodu kolektor-emitor. Protože dioda báze – emitor je polarizována v propustném směru, vstupní odpor tranzistoru R_{vst} je malý. Ve výstupním obvodu je v sérii se zatěžovacím odporem zapojena dioda báze – kolektor, polarizovaná závěrně, takže výstupní odpor R_{vyst} je velký.



Obr. 2-16 – Zapojení tranzistoru se společnou bází

Malý vstupní odpor, který dosahuje hodnoty kolem 1000Ω, způsobuje, že pro řízení tranzistoru je potřebný jistý výkon. Aby se tento budicí výkon využil co nejlépe, musí být výstupní odpor zdroje R_g přizpůsoben vstupnímu odporu tranzistoru R_{vst}. Optimální stav je když $R_g = R_{vst}$.



Obr. 2-17 – Zapojení tranzistoru se společným kolektorem

Tranzistor je polovodičový prvek, který slouží především k zesilování elektrických signálů. Pracuje tak, že malý vstupní proud (proud báze I_g) vyvolá velký výstupní proud kolektoru I_C, malá změna vstupního proudu vyvolá velkou změnu výstupního proudu. Protože proud báze bývá u moderních tranzistorů 100 až 1000 krát menší než proud emitoru, je stejnosměrný proudový zesilovací činitel takových tranzistorů

$$h_{21E} = I_C/I_B = 100 \text{ až } 1000 \qquad (2\text{-}1)$$

c) Základní parametry tranzistoru

Proudový zesilovací činitel h_{21} (α_E, β) udává, jak bylo uvedeno, zesilovací schopnost tranzistoru. Častěj je definován pro malé změny proudů jako jejich podíl:

$$h_{21E} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \qquad (2\text{-}2)$$

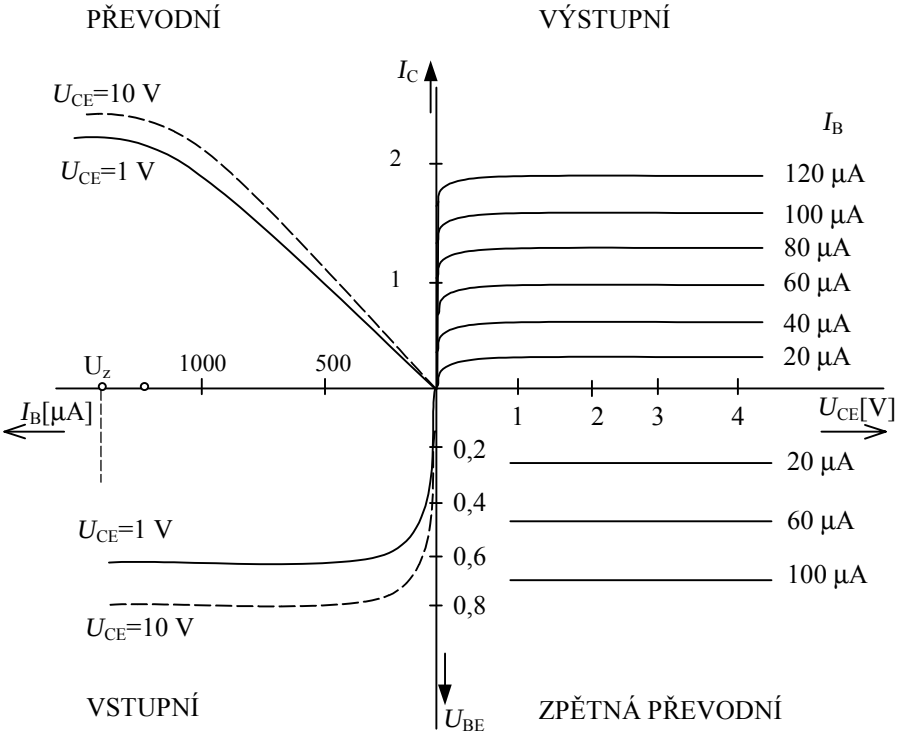
Důležitým údajem o vlastnostech tranzistorů je velikost zbytkového proudu I_{CE0}, který protéká kolektorovým obvodem při nulovém proudu báze (u křemíkových tranzistorů malého výkonu je řádu nanoampérů).

Přípustné výkonové zatížení tranzistoru je omezeno maximální přípustnou kolektorovou ztrátou,

$$P_{Cmax} = U_{CE}.I_C \quad (2\text{-}3)$$

která je důležitým údajem pro provoz tranzistorů, stejně jako maximální přípustné hodnoty napětí a proudů jednotlivých elektrod. Přípustná kolektorová ztráta je určena konstrukcí a pohybuje se v mezích stovek mW u malovýkonových až stovek W u výkonových tranzistorů. Kmitočtové vlastnosti tranzistoru udává mezní kmitočet proudového zesilovacího činitele f_m, při kterém poklesne jeho velikost na 0,707 hodnoty při nízkých kmitočtech. Pokles je způsoben kapacitami přechodů a konečnou rychlostí nosičů nábojů, závisí na použité technologii a konstrukci tranzistorů. Podle f_m dělíme tranzistory na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční.

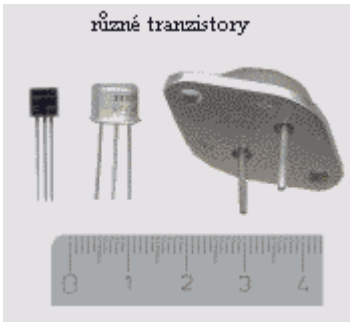
Stejnosměrné vlastnosti tranzistoru se vyjadřují VA charakteristikami obr. 2-18. Nejdůležitější jsou charakteristiky výstupní $I_C = f(U_{CE})$ a vstupní $I_B = f(U_B)$. Bývá zvykem je zakreslovat do jediné souřadné soustavy ještě spolu s charakteristikami převodními $I_C = f(I_B)$ a zpětnými převodními $I_B = f(U_C)$. Na obr.2-18 je typická soustava charakteristik tranzistoru typu NPN pro zapojení se společným emitorem.



Obr. 2-18 – Voltampérové charakteristika tranzistoru

Druhým nejpoužívanějším zapojením je zapojení se společným kolektorem, tzv. emitorový sledovač (obr.2-17). Toto zapojení je typické svým vysokým vstupním odporem, přibližně jednotkovým napěťovým zesílením a velkým zesílením proudovým. Používá se především do vstupních dílů zařízení u kterých vyžadujeme vysoký vstupní odpor.

Zapojení se společnou bází se využívá ve výjimečných případech, kdy vyžaduje zvláště malý vstupní odpor a dobrý frekvenční přenos.



Obr 2-19 Různé tranzistory na malé a střední výkony (z leva 0,6 2,6 a 35 W)

d) Konstrukce tranzistoru

Vlastní systém tranzistoru vyráběný především planární tech-

nologií se umisťuje do vhodného kovového nebo plastického pouzdra. U výkonových tranzistorů se systém upevňuje pro snadný odvod tepla na silnější základovou desku. Ta tvoří současně vývod kolektoru a je konstruována většinou pro uchycení na větší kovovou plochu – chladič (viz. obr. 2-19.).

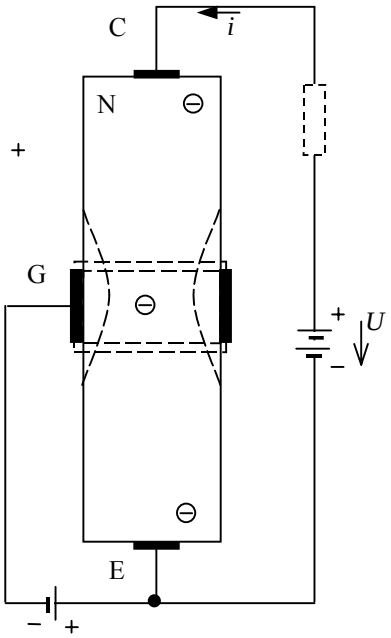
Unipolární tranzistor

Na rozdíl od předchozích tranzistorů (bipolárních) je u těchto tranzistorů proud tvořen pouze nosiči jednoho typu. Podle principu činnosti jsou nazývány také jako tranzistory **FET** – tranzistory řízené (elektrickým) polem.

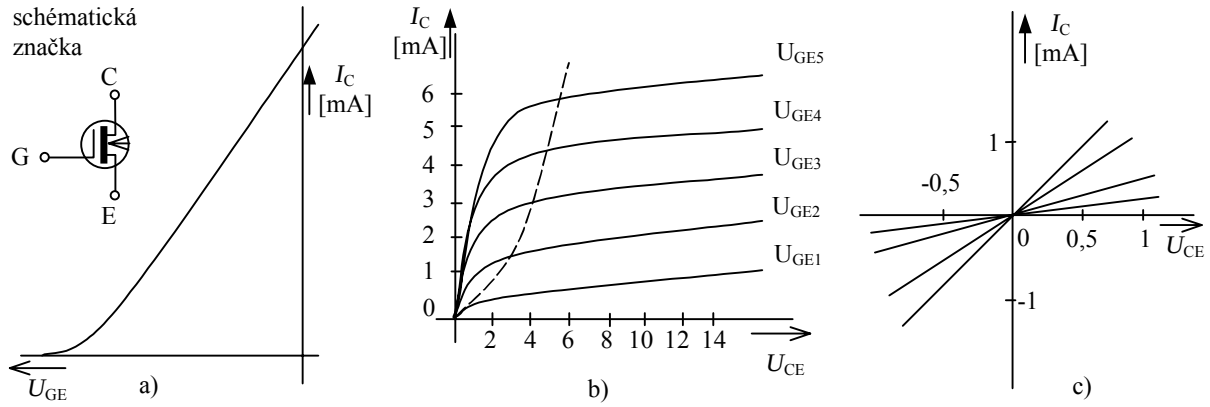
Princip činnosti je znázorněn na obr.2-20. K tyčince ze základního polovodiče, např. typu N, jsou připojen na koncích elektrody – emitor E a kolektor K. Vlivem připojeného napětí se majoritní nosiče pohybují mezi elektrodami. Po obvodě tyčinky je přiložena elektroda – hradlo G.

Vlivem jejího napětí se pod ní vytvoří oblast prostorového náboje, ze které jsou elektrony vytlačovány a dojde tím vlastně ke zmenšení efektivního průřezu vodivého kanálu a tím omezení průtoku nosičů mezi hlavními elektrodami. Hradlo G působí na procházející nosiče jen polem a tudíž nemá žádnou spotřebu, tedy vysoký vstupní odpor a je podobně jako elektronka řízen napětím. Základní vlastnosti popisují výstupní a převodní charakteristiky na obr.7.21.

Tranzistory řízené polem se používají v obvodech, které vyžadují vysoký vstupní odpor zesilovacího prvku, ve spínačích, zdrojích impulsů, jako napěťově řízené rezistory (viz.7.21c) a pro celou řadu aplikací elektroniky.



Obr. 2-20 – Princip činnosti tranzistoru FET



Obr. 2-21 – Charakteristika tranzistoru typu FET: a)převodu, b)výstupní, c)výstupní v okolí počátku

4. Střídače

Střídače jsou polovodičové měniče, které mění stejnosměrné napětí na střídavé.
Z hlediska tvaru výstupního napětí mohou být střídače s
- harmonickým výstupním napětím
- obdélníkovým výstupním napětím (častější případ),

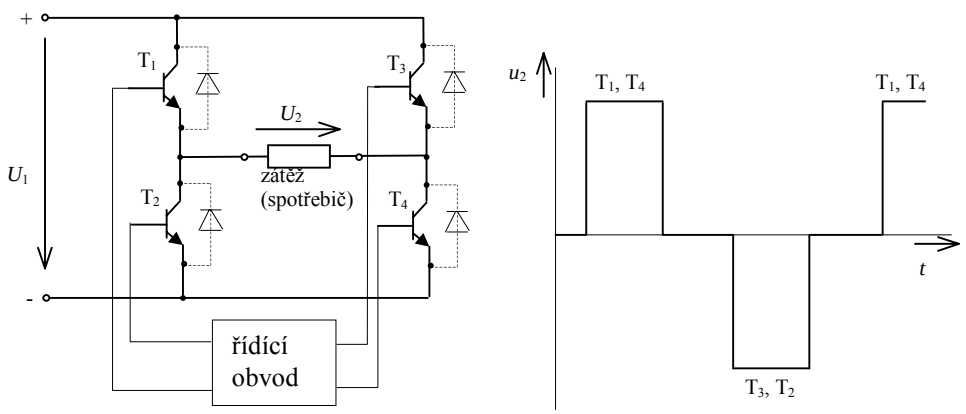
a z hlediska počtu výstupních fází rozdělit střídače na:
- jednofázové
- trojfázové.

Základem každého střídače jsou nějaké polovodičové spínače, může to být buďto tranzistor – pro výkony do řádu desítek kW, nebo tyristor pro výkony větší. Velkou výhodou tranzistorů je, že se dokážou samy vypnout (tyristor potřebuje vypínací obvod, případně ho může vypínat komutace zátěže, viz. níže) a že mohou dosahovat velkých spínacích frekvencí, (desítky kHz). Proto jsou v poslední době stále rozšířenější střídače s tranzistory, nejrozšířenější je tzv. střídač v můstkovém zapojení, který si dále popíšeme.

4.1. Střídač s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení)

Tento střídač může být jednofázový i trojfázový.
Používá se ve zdrojích střídavého napětí pro napájení běžných spotřebičů v mobilních zařízeních (auta, vlaky), dále pro řízení otáček asynchronních případně synchronních motorů, často je součástí tzv. nepřímých měničů frekvence (na vstupu měniče frekvence je usměrňovač, který střídavé napětí usměrní, pak následuje střídač, který ho opět rozstřídá, s jinou frekvencí.)
Jako spínací prvky se v tomto typu střídače většinou používají tranzistory.

Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím
Princip si vysvětlíme na jednofázovém můstkovém střídači, jehož schéma je na obrázku 4-1.
Pro vysvětlení principu činnosti nemusíme uvažovat tzv. zpětné diody (na obr. čárkovaně), které se uplatní pouze, jestliže je v zátěži nějaká indukčnost (v tom případě by bez diod došlo při vypnutí tranzistoru k jeho zničení vysokým indukovaným napětím).
V grafu výstupního napětí na obr.4-1. je na počátku nulové napětí, to není sepnut žádný tranzistor. Pak sepnou tranzistory T_1 a T_4, na zátěž se dostane kladné napájecí napětí. Po určitém čase oba tranzistory vypnou, na zátěži je opět nulové napětí. Pak sepnou tranzistory T_3 a T_2, na zátěž se připojí záporné napětí (tranzistory připojí zátěž jakoby obráceně než v prvním případě). Po určitém čase opět vypnou a celý cyklus se opakuje.



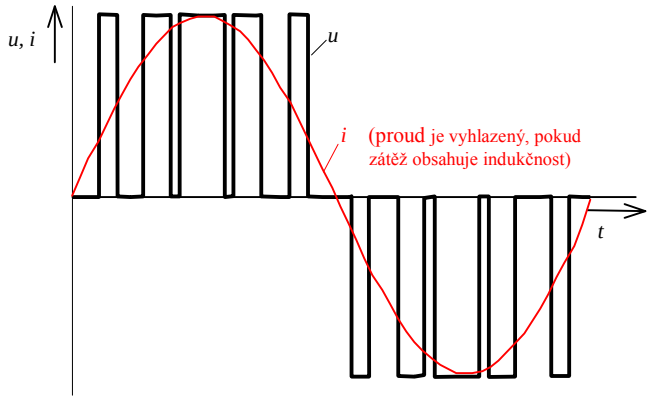
Obr. 4-1 Schéma jednofázového můstkového střídače a průběh výstupního napětí

Délkou doby sepnutí tranzistorů a prodlevy mezi sepnutími je možné řídit efektivní hodnotu výstupního napětí. (Čím menší prodleva, tím vyšší efektivní hodnota napětí.)
V případě že by v zátěži byla indukčnost, průběhy napětí i proudů by měly trochu odlišný tvar (indukčnost by indukovala napětí). Pro vysvětlení principu však stačí příklad s odporovou zátěží na obrázku 4-1.

Při chodu střídače nesmějí sepnout zároveň tranzistory T_1 a T_2, nebo T_3 a T_4, to by byl zkrat.

Pulsně šířková modulace u střídačů v můstkovém zapojení

V případě, že nechceme mít na výstupu střídače obdélníkový průběh, ale průběh více podobný sinusovce, můžeme použít jiný způsob spínání tranzistorů, takzvanou „Pulsně šířkovou modulaci“. Průběhy napětí a proudu v tomto případě jsou na obr.4-2. Napětí je sice stále obdélníkové, k tomu značně „rozsekané“, ale proud bude v případě odporově induktivní zátěže (např. motoru) téměř sinusový. (Indukčnost zátěže funguje jako setrvačnost vůči proudu a ten je potom vyhlazený.) S tímto způsobem spínání pracuje většina dnešních střídačů.



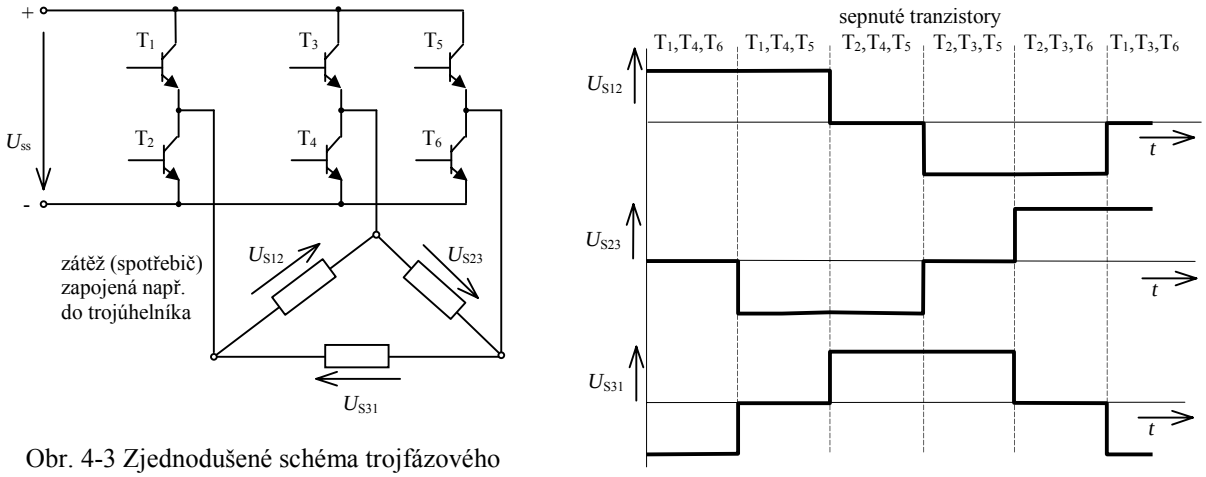
Obr. 4-2 Princip puzně šířkové modulace

Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Střídače tohoto typu se ale nejčastěji konstruují jako trojfázové. Zjednodušené schéma a průběh výstupního napětí trojfázového střídače v můstkovém zapojení je na obrázku 2-3.

V obrázku je nad grafy výstupních napětí napsáno v kterém okamžiku je který tranzistor sepnutý (takzvaný spínací diagram). Můžeme si představit že spínáním jednotlivých tranzistorů jsou výstupní svorky střídače připojovány buďto na kladné, nebo záporné napětí. Rozdíl mezi napětím dvou sousedních výstupních svorek pak vytváří sdružené napětí.

V praxi se tyto trojfázové střídače většinou konstruují s pulsně šířkovou modulací, podobně jako bylo uvedeno u jednofázového střídače. Pro vysvětlení principu ale stačí průběhy bez této modulace jak jsou na obrázku 4-3.



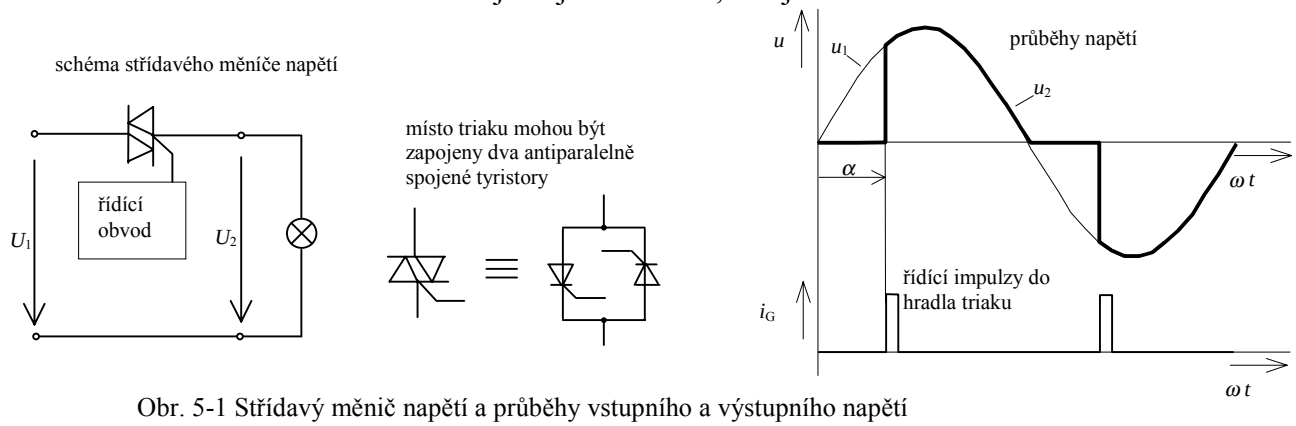
Obr. 4-3 Zjednodušené schéma trojfázového můstkového střídače a průběh sdružených výstupních napětí

5. Střídavé měniče napětí

Tyto měniče mění efektivní hodnotu střídavého napětí, přičemž frekvence zůstává zachována. Základní částí tohoto měniče je polovodičový spínací prvek, který spíná střídavý proud. Bývá to triak, případně dva antiparalelně zapojené tyristory.
Schéma a časové průběhy napětí jsou na obrázku 5-1.
Princip činnosti je dobře patrný z průběhu výstupního napětí měniče na obrázku 5-1.
Triak sepne v okamžiku, kdy řídící obvod pustí řídící proudový impuls do jeho hradla. Kdyby to nastalo hned v okamžiku kdy sinusovka začíná, dostalo by se na výstup měniče celé vstupní napětí. Pokud triak sepne později, dostane se na výstup měniče menší část sinusovky, a efektivní hodnota výstupního napětí je menší. Zpoždění sepnutí triaku vyjadřujeme takzvaným řídícím úhlem, který se obvykle značí α, viz. obr. 5-1. Změnou α od 0° do 180° lze měnit efektivní hodnotu U_2 od 0 až do hodnoty U_1. (Čím větší α, tím menší U_2.)
Pro velikost efektivní hodnoty napětí U_2 při odporové zátěži platí vztah 5-1.

$$U_2 = U_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \qquad (5\text{-}1)$$

Tyto měniče se používají k regulaci výkonu u činných spotřebičů, jako žárovek (takzvané stmívače - velmi rozšířené použití) nebo některých tepelných spotřebičů a také k řízení otáček střídavých komutátorových motorků, například v ručních vrtačkách.
Střídavé měniče se mohou konstruovat jako jednofázové, i trojfázové.



Obr. 5-1 Střídavý měnič napětí a průběhy vstupního a výstupního napětí