



SKRIPTA

**Modul: POLOVODIČOVÉ PRVKY V SILNOPROUDÉ
ELEKTROTECHNICE**

Obor: 26-51 H/003 – Elektrikář

Ročník: 3. ročník - Elektrikář silnoprúd

Zaměření: Silnoprúd

Výchovné cíle:

- **V tomto modulu - bloku vám budou jasné fyzikální příčiny spínání tyristoru, jeho blokovací schopnosti**
- **budete znát rozdíly ve funkci tranzistorů a tyristoru**
- **budete znát různé možnosti použití obou těchto součástek, jimiž můžeme řídit velikost elektrického výkonu, předávaného zátěži.**

Předpokládané znalosti pro zvládnutí modulu – bloku Polovodiče

- **blok Elektronika – základní polovodičové součástky**

Související moduly – bloky

- **blok řízení výkonu**

Pojmy k zapamatování:

dioda, tranzistor, tyristor, blokovací stav tyristoru, řídicí elektroda, závěrné napětí, řídicí elektroda, polovodičové oblasti, elektrony a díry

1. PRINCIP ČINNOSTI TYRISTORU

Úvod

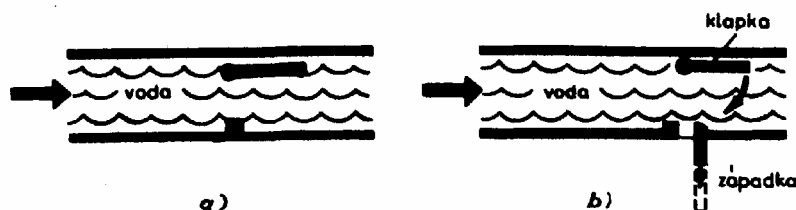
Při studiu polovodičových součástek postupujeme systematicky od nejjednodušších ke složitějším; na začátku jsme se zabývali vlastnostmi diod, využívajících jediného přechodu PN, pak jsme přidali další přechod a zabývali se strukturou tranzistoru PNP či NPN, nyní přidáme ještě jednu oblast a přejdeme k rozboru chování struktury PNPN, tzn. seznámíme se s tyristorem.

Můžeme říci, že tato polovodičová součástka je poměrně „mladá“; do běžné elektrotechnické praxe pronikla teprve v sedmdesátých letech 20. století a pronikavě ovlivnila řešení všech problémů, souvisejících s řízením elektrického výkonu.

Princip funkce tyristoru vyložíme s využitím všech poznatků, jichž jsme nabyli v předchozích programech; všechny polovodičové součástky využívají vlastností přechodu PN, a proto musí mít leccos společného a ovšem i mnoho rozdílného.

1.1. Názorná představa vysvětlující rozdíl chování diody a tyristoru

Základní vlastností diody je její schopnost propouštět proud v jednom směru a přerušit elektrický obvod tehdy, měl-li by diodou procházet proud ve směru opačném. Názornou analogii chování diody naznačuje obr. 163a; trubkou prochází snadno proud vody ve směru zleva napravo, přičemž svým tlakem odklápí otočnou klapku směrem vzhůru. Jakmile by však měl proud změnit svůj směr, klapka se na čepu působením vody pootočí zpět, zachytí se o pevný doraz a průchodu proudů ve směru zprava doleva zabrání.



Obr. 163. Funkce diody a tyristoru

Chceme-li podobné analogie použít při znázornění základních vlastností tyristoru, musíme do trubky vložit ještě pohyblivou západku (obr. 163b), která setrvává v klidu v naznačené poloze a pouze v okamžiku, kdy přivedeme řídicí impuls, sklouzne do čárkovaně naznačené polohy. Po skončení řídicího impulsu se klapka opět posune do polohy, naznačené na obr. 163b. Prochází-li již jednou voda zleva doprava, chová se trubka (tyristor) stejně jako v uspořádání z obr. 163a (dioda). Jakmile by mělo dojít ke změně směru pohybu vody, otočí se klapka stejně jako dříve směrem k pevnému dorazu, při svém pohybu stlačí pružinu, na které je uložena západka a přeruší vodní proud podobně jako na obr. 163a.

Podstatný rozdíl nastává tehdy, jestliže tlak v potrubí (napětí v elektrickém obvodu) působí opět v „propustném směru“ trubky, tzn. zleva doprava. Západka nyní zabraňuje pohybu klapky, takže hradicí účinek klapky zmizí pouze tehdy, jestliže na řídicí západku (řídicí elektrodu tyristoru) přivedeme impuls, tj. posuneme ji na okamžik směrem dolů (řídicí elektrodou tyristoru projde řídicí proud).

Shrneme-li vše, co jsme uvedli ve formě analogie a co v dalším programu osvětlíme na základě rozborů jevů, probíhajících v přechodech PN, můžeme stručně uvést porovnání diody a tyristoru:

Dioda a tyristor se chovají zcela stejně v závěrném směru, kdy obvod, v němž jsou zapojeny, přerušují.

Pokud dioda i tyristor sepnuly (přešly do vodivého stavu), chovají se opět stejně; oběma prochází propustný proud.

Rozdíl spočívá v podmínkách sepnutí - u diody stačí, aby na její elektrody bylo připojeno napětí vhodné polarity, u tyristoru musí být splněna další podmínka - je nutno přivést řídicí

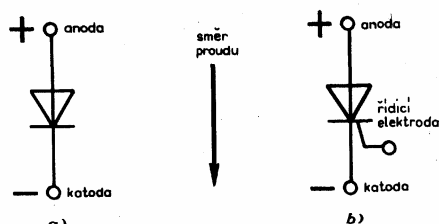
napětí na řídicí elektrodu. Pokud se tak nestane, tyristor do vodivého stavu nepřejde (říkáme, že blokuje).

Kontrolní otázka: Jakou výhodu má tyristor ve srovnání s diodou z hlediska řízení výkonu, předávaného zátěži?

1.2. Schematická značka diody a tyristoru

Na obrázku 164a, b jsou uvedeny schematické značky diody a tyristoru. Obě součástky mají dvě hlavní elektrody, označované jako anoda A a katoda K. Propustný proud vstupuje do součástky anodou a vychází katodou. Tyristor má navíc vyvedenu třetí elektrodu: řídicí elektrodu G.

Kontrolní otázka: Kterou elektrodou se liší tyristor od diody?



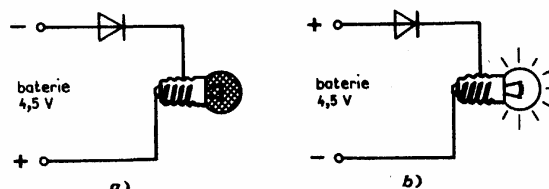
Obr. 164. Značka diody a tyristoru

1.3. Provozní stavy diody

Na obrázku 165 je naznačen pokus, který jsme provedli na začátku našeho studia (kap. 1). V prvním případě (obr. 165a) se žárovka nerozsvítí, protože dioda je polarizována závěrně, k čemuž dochází tehdy, je-li katoda kladná oproti anodě. Jakmile změním polaritu vnějšího zdroje a anoda se stává kladnou oproti katodě, dioda sepne (obr. 165b).

Kontrolní otázka: Který pól (kladný či záporný) musíme spojit v obvodě z obr. 165 s oblastí typu P přechodu PN diody, aby byla dioda polarizována závěrně a jak se příslušná elektroda diody nazývá?

- a) Kladný.
- b) Záporný.
- c) Katoda.
- d) Anoda.



Obr. 165. Dioda v závěrném a vodivém stavu

1.4. Provozní stavy tyristoru

Na obrázku 166 jsou vyznačeny všechny provozní stavy tyristoru. Tyristor je polarizován závěrně a) a nepropouští proud - žárovka nesvítí tak jako v případě diody na obr. 165a. Sepne-li tyristor, je polarizován v propustném směru b) a chová se stejně jako dioda na obr. 165b. Kladný pól vnějšího zdroje je připojen na anodu — žárovka svítí. Na rozdíl od diody je však tyristor schopen blokovat (nacházet se v blokovacím stavu), jestliže na jeho anodu přivádíme kladné napětí vnějšího zdroje, ale na řídicí elektrodu G jsme nepřivedli řídicí impuls - žárovka nesvítí, na tyristoru se objevuje blokové napětí, katoda tyristoru je záporná oproti anodě c).

Kontrolní otázka: Kterým stavem se liší tyristor od diody?

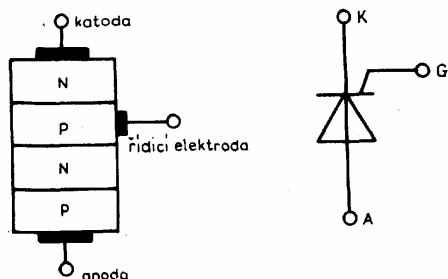
- a) Blokovacím.
- b) Propustným.
- c) Závěrným.

KONTROLNÍ TEST A

1. Která polovodičová součástka se podobá částečně svojí funkcí tyristoru?
2. Které elektrody jsou u diody a tyristoru označeny stejně?
3. Jak se nazývá elektroda, kterou se liší tyristor od diody?
4. Jmenujte všechny možné provozní stavy tyristoru.

1.5. Struktura tyristoru

Nyní, když jsme se seznámili se základní funkcí tyristoru, přejdeme k rozboru jeho vnitřního složení. Struktura tyristoru je vytvořena na křemíkovém krystalu, vykazujícím čtyři oblasti různé vodivosti. Jeho uspořádání je schematicky vyznačeno na obr. 167; oblasti typu P a N se střídají, přičemž vnější oblast P je připojena na anodu, vnější oblast N na katodu a řídicí elektroda G je spojena s vnitřní oblastí typu P.



Obr. 167. Struktura tyristoru

Kontrolní otázka: Se kterou oblastí bezprostředně souvisí oblast typu P, z níž je vyvedena řídicí elektroda?

- S vnější oblastí typu N.
- S vnější oblastí typu P.

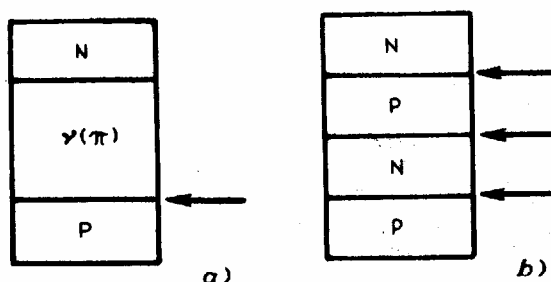
1.6. Porovnání struktury diody a tyristoru

V úvodních člancích jsme se zmiňovali o tom, že tyristor má mnoho společného s diodou. Všimněte si schematického náčrtku, znázorňujícího strukturu P_vN (P_iN) diody (obr. 168a), sestávající z oblasti typu P a oblasti typu N, mezi nimiž se nalézá slabě dotovaná střední oblast, v daném případě typu N, jedná-li se o diodu PN.

Jestliže u diody na obr. 168a nahradíme slabě dotovanou oblast v dvěma oblastmi typu P, N, přechází struktura diody na strukturu tyristoru.

Při sledování ději, probíhajících uvnitř struktury tyristoru, zjistíme, že rozhodují poměry, vznikající v místech, kde se jednotlivé oblasti stýkají, tzn. na přechodech PN, jež jsou na obr. 168b vyznačeny šipkami.

Kontrolní otázka: Kolik přechodů PN využívá dioda, kolik tyristor?



Obr. 168. Struktura diody P_vN, P_iN a tyristoru

1.7. Pohyb nosičů nábojů v tyristoru na který není přivedeno vnější napětí

V článku 8 a dále se budeme zabývat pohybem nosičů nábojů v oblastech P, N po přiložení napětí na jednotlivé elektrody tyristoru. Nejprve však pozorujme případ, kdy na tyristor nepřivádíme napětí; anoda a katoda jsou uzemněny, tedy na společném potenciálu, rovněž řídicí elektroda není připojena k žádnému zdroji napětí.

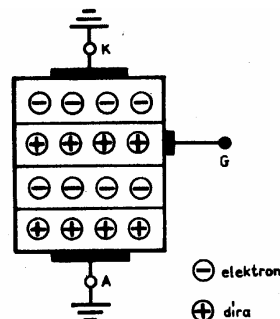
Pro lepší přehlednost vynecháváme ve schématech náčrtku struktury tyristoru (obr. 169 a další) krystalovou mříž, složenou z atomů křemíku (kapitola 1). Značky e představují pohyblivé nosiče nábojů, díry a elektrony.

I když se mohou nosiče nábojů v jednotlivých oblastech P, N volně pohybovat, nedojde přece k jejich vzájemnému promíslení vzhledem ke vzniku záporného prostorového náboje v prostoru přechodů PN (kap. I), a tím i vzniku difúzního napětí.

Kontrolní otázka: Proč se dokonale nepromísí volné elektrony a díry oblastí P a N z obr. 169 v případě, že tyristorem neprochází žádný proud?

a) Protože na přechodu PN vzniká oblast prostorového náboje, a tím difúzní napětí, jež brání dalšímu pohybu nábojů v oblasti přechodu.

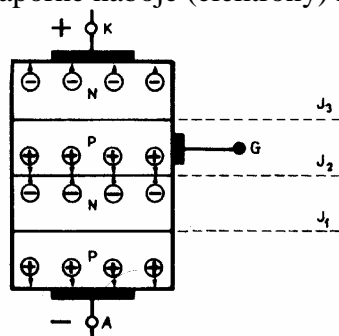
b) Protože volné elektrony a díry zmizí v oblasti přechodu PN a tím vznikne vrstva, jež brání smíslení nábojů.



Obr. 168. Nosiče nábojů ve struktuře tyristoru, na který není přivedeno napětí

1.8. Pohyb nosičů nábojů v závěrně polarizovaném tyristoru

Jestliže anodu tyristoru spojíme se záporným a katodu s kladným pólem vnějšího zdroje, dojde k posunu nosičů nábojů. Kladné náboje (díry) se přitahují k záporné elektrodě (anodě), záporné náboje (elektrony) ke kladné elektrodě (katodě).



Obr. 170. Nosiče nábojů v závěrně polarizovaném tyristoru

Na třech přechodech PN J_1 , J_2 , J_3 tyristoru proto dochází k různému rozdělení nosičů nábojů (obr. 170). Přechod J_1 je o nosiče ochuzen, tzn. jeho oblast je nevodivá. Přechod je při uvedené polaritě vnějšího napětí polarizován závěrně. Přechod J_2 je o nosiče nábojů obohacen, jeho oblast vykazuje značnou elektrickou vodivost, přechod je polarizován propustně.

O přechodu J_3 platí to, co jsme již řekli o přechodu J_1 .

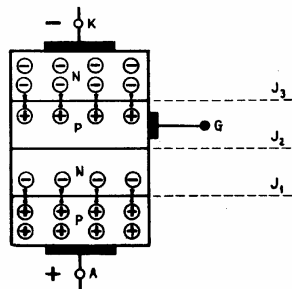
Protože je přechod J_1 polarizován závěrně, tyristorem neprochází proud. Říkáme, že tyristor je polarizován v závěrném směru (anoda je záporná, oproti katodě - porovnejte stejnou situaci u diody).

Kontrolní otázka: Které přechody jsou polarizovány závěrně v případě, že se na tyristoru objevuje závěrné napětí?

1.9. Pohyb nosičů nábojů u tyristoru v blokovacím stavu

Připojíme-li nyní na anodu kladný pól zdroje a na katodu záporný, dojde k posunu nosičů nábojů, naznačenému na obr. 171: díry jsou odpuzovány kladným pólem (nyní anodou) a přitahovány k zápornému (nyní katodě); u elektronů je tomu obráceně. Na přechodech PN nastává proto tento stav:

přechod J1 - zaplaven nosiči nábojů, polarizován v propustném směru;
 přechod J2 - ochuzen o nosiče, polarizován závěrně;
 přechod J3 - platí totéž, co pro přechod J1.



Obr. 171. Nosiče nábojů v tyristoru, který se nachází v blokovačím stavu

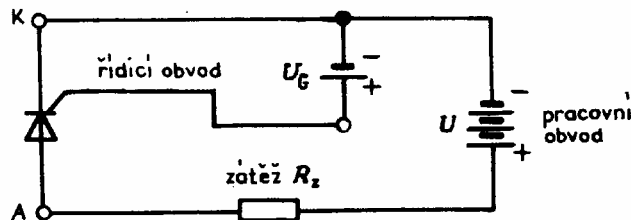
Vzhledem k působení přechodu J2 nemůže ani nyní procházet tyristorem proud - říkáme, že tyristor blokuje. (Poznámka: Nezaměňujte dva výrazy: závěrný stav a blokovačím stav, i když v obou případech je tyristor nevodivý. O závěrném stavu neboli směru mluvíme pouze v případě, že je anoda tyristoru záporná oproti katodě, o blokovačím tehdy, je-li tomu naopak a tyristor je nevodivý.)

Kontrolní otázka: Jestliže je anoda kladná oproti katodě, tyristor blokuje (předpokládáme odpojenou řídicí elektrodu). Kolik a které přechody potom blokuje?

1.10. Řídicí obvod tyristoru

Vysvětlili jsme již blokovačím a závěrný stav tyristoru a nyní nám zbývá třetí případ: stav, kdy tyristor sepnul a je polarizován propustně.

Vyjdeme z blokovačím stavu (článek 9), který nutně předchází sepnutí tyristoru. Zjistili jsme, že oba krajní přechody J1 a J3 jsou polarizovány propustně, kdežto přechod J2 blokuje. Kdyby se nám podařilo zaplavit i tento přechod nosiči nábojů, stal by se rovněž vodivým. Ani jedna z obou možných polarit vnějšího napětí tento stav nevyvolá - to již víme - zbývá proto využít řídicí elektrody, kterou jsme dosud pokládali za odpojenou.



Obr. 172. Řídicí obvod tyristoru

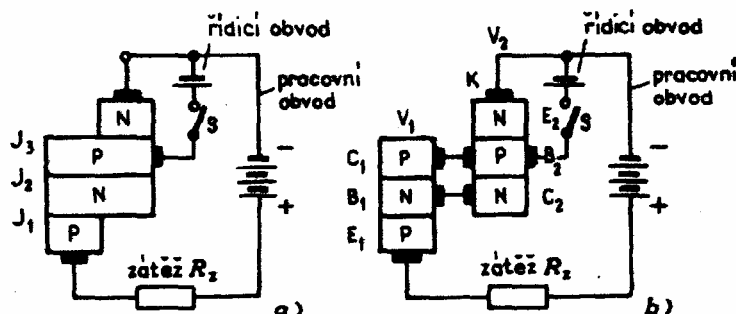
Přechod z blokovačím stavu do propustného nazýváme sepnutím tyristoru. Sepnutí dosáhneme tak, že na řídicí obvod tyristoru připojíme pomocné napětí (řídicí), jež vyvolá v řídicí elektrodě G proud I_G . Nej jednodušší zapojení tyristoru ukazuje obr. 172: v hlavním, pracovním obvodu je zapojen zdroj stejnosměrného napětí U a zatěžovací odpor R_z , v řídicím obvodu pomocné stejnosměrné napětí U_G , jež vyvolá proud, vstupující do řídicí elektrody G a vycházející katodou K zpět do zdroje U_G . Zdůrazněme: na řídicí elektrodu připojujeme kladný pól zdroje U_G , katoda je spojena s jeho záporným pólem.

Kontrolní otázka: Kdy můžeme dosáhnout sepnutí tyristoru; jestliže byl tyristor před přivedením napětí U_0

- polarizován závěrně,
- blokoval,
- byl polarizován propustně.

1.11. Náhrada struktury tyristoru dvěma komplementárními tranzistory

Vysvětlíme nyní, proč tyristor po přivedení řídicího napětí na řídicí elektrodu sepne, tzn. přejde z blokovacího stavu do vodivého. Protože je tento děj dosti komplikovaný, nahradíme v naší úvaze strukturu tyristoru dvěma fiktivními tranzistory V1, V2. Na obr. 173a je naznačen tyristor,



Obr. 173. Tyristor jako zapojení dvou fiktivních tranzistorů

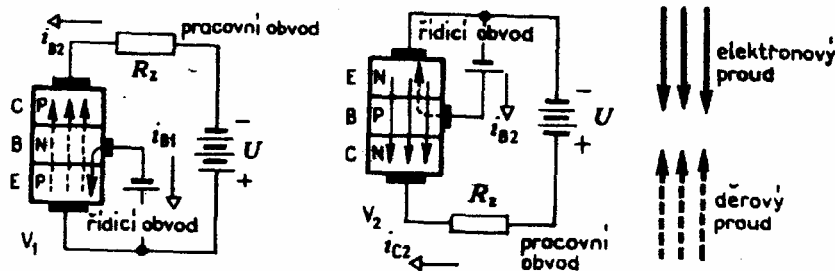
na obr. 173b myšlená náhrada jeho struktury dvěma doplňkovými tranzistory PNP (V1) a NPN (V2). Schéma ukazuje, že báze jednoho tranzistoru je spojena s kolektorem druhého, kdežto emitory představují vývody tyristoru: emitor E1 prvního tranzistoru V1 je totožný s anodou, emitor E2 s katodou původního tyristoru. Protože spínač S zůstává v řídicím obvodu dosud rozpojen, tyristor blokuje.

Kontrolní otázka: Při polaritě vnějšího napětí, naznačené na obr. 173 blokuje přechod J2 uvažovaného tyristoru. Které přechody tranzistorů odpovídají v náhradním schématu přechodu J2?

- a) Přechody editor - báze (EB).
- b) Přechody báze - kolektor (BC).

1.12. Pohyb nosičů nábojů ve struktuře fiktivních tranzistorů

Nyní si všimneme chování obou fiktivních tranzistorů z náhradního schématu tyristoru, uvedeného na obr. 173, po přivedení řídicího napětí. předpokládejme, že obvody obou tranzistorů jsou prozatím odděleny, každý pracuje samostatně na zatěžovací odpor, zapojený v kolektorovém obvodu. Jestliže připojíme na vstup tranzistorů řídicí napětí, tzn. polarizujeme propustně přechod báze - emitor, počnou procházet z báze tranzistoru V1 typu PNP do emitoru volné elektrony, v případě tranzistoru V2 typu NPN dochází k injekci děr z báze do prostoru emitoru. Tranzistorový jev vyvolá známým způsobem zesílení proudu volných nosičů nábojů; u tranzistoru V1 emisi děr, procházejících přechodem editor - báze E1 - B1, pak báze - kolektor B1 - C1 a vyvolávajících velký kolektorový proud, u tranzistoru V2 pak emisi volných elektronů přes přechody E2 - B2, B2 - C2 (obr. 174).



Obr. 174. Elektronový a děrový proud tranzistoru

Při dostatečně velkém proudu obou bází oba tranzistory sepnou, takže napájecí napětí zdroje U se téměř celé objeví na zatěžovacím odporu R_2 . Jakmile řídicí napětí klesne na nulu, klesnou všechny proudy obou tranzistorů opět na nulu.

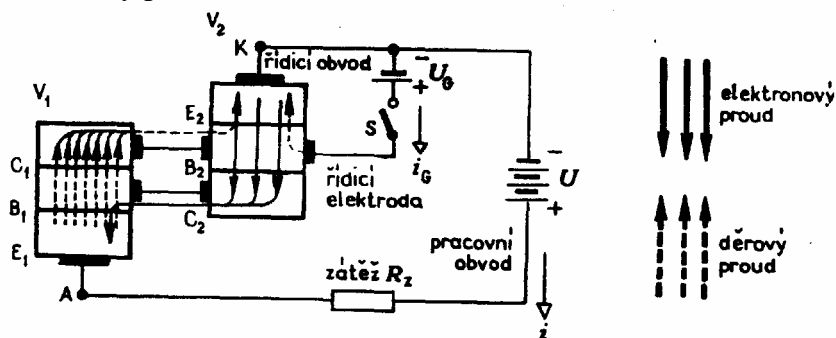
Kontrolní otázka: Kolektorový proud obou tranzistorů je vyvolán pohybem nosičů nábojů. Jsou tyto nosiče

- převážně jednoho druhu, tj. buď volné elektrony, či díry, nebo
- obou druhů, tj. jak volné elektrony, tak i díry?

1.13. Přechod tranzistoru z blokovacího stavu do propustného

Nyní zapojíme oba tranzistory z obr. 174 do obvodu, zastupujícího tyristorovou strukturu (obr. 175). Při dané polaritě vnějšího napětí U a rozpojených kontaktech mechanického spínače řídicího obvodu tranzistoru V_2 nevzniká v obvodu proud (zbytkové proudy obou tranzistorů zanedbáváme), protože ani jedním přechodem báze - emitor tranzistoru V_1 , V_2 nemůže procházet řídicí proud.

Jestliže nyní spojíme kontakty mechanického spínače S v řídicím obvodu tranzistoru V_2 , probíhá v obvodu obou tranzistorů děj, který postupně popíšeme. Řídicí proud báze tranzistoru V_2 , tzn. proud děr, emitovaných napětím U_0 , vstupuje do oblasti báze B_2 a vyvolává, vlivem tranzistorového jevu (obr. 174) značně větší proud, procházející emitorem E_2 a kolektorem C_2 . Kolektorový proud i_{c2} vstupuje do báze tranzistoru V_1 , pro který představuje řídicí proud báze B_1 . V důsledku toho se otevírá tranzistor V_1 a jeho emitorový a kolektorový proud značně vzrůstá.



Obr. 175. Elektronový a děrový proud u tyristoru

Výstupní kolektorový proud prvního tranzistoru V_1 je však vlivem vzájemného spojení obou tranzistorů současně řídicím proudem tranzistoru V_2 . Původní řídicí proud, vyvolaný vnějším zdrojem pomocného řídicího napětí U_0 , se tedy nyní zvětšil vlivem kladné vazby mezi oběma tranzistory. Pochod se stále opakuje a končí tím, že oba původně závěrně polarizované přechody báze - kolektor obou tranzistorů jsou zaplaveny nosiči nábojů a přecházejí proto do vodivého stavu. Oba tranzistory sepnuły, což znamená, že tyristor přešel do propustného stavu.

Kontrolní otázka:

Propustný proud tyristoru vzniká pohybem nosičů nábojů. Tyto nosiče jsou

- převážně jednoho druhu, tzn. buď volné elektrony, nebo díry,
- obou druhů, tzn. jak volné elektrony, tak i díry.

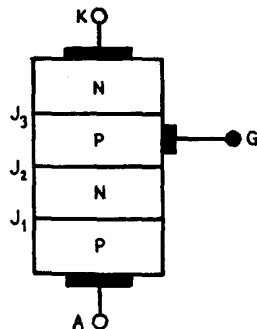
KONTROLNÍ TEST B

- Udejte sled polovodičových oblastí tyristoru počínaje anodou.
- Kolika přechodů PN využívá tyristor?
- Který proud tyristoru způsobí, že tyristor přejde z blokovacího stavu do propustného, tzn. sepne?

4. Jakým myšlenkovým obratem snadno vysvětlíme mechanismus přechodu tyristorové struktury do vodivého stavu?
5. Které dva předpoklady musí být splněny, aby mohl tyristor sepnout?

1.14. Funkce jednotlivých přechodů tyristorové struktury

Spínací pochod, probíhající při přechodu tyristoru z blokovacího stavu do propustného stavu, jsme právě probrali. Nyní se opět vrátíme ke struktuře tyristoru tak, jak jsme ji poznali na počátku kapitoly (obr. 176) a udáme úkoly, které plní jednotlivé přechody PN J1 až J3.



Obr. 176 Přechody tyristoru J₁, J₂, J₃

Začneme s přechodem J3. Jeho funkci jste objevili při studiu spínacího pochodu (článek 13); tento přechod působí jako řídicí přechod editor - báze tranzistoru (článek 12). Je silně dotován, a proto vykazuje značnou elektrickou vodivost.

Přechod J2 určuje blokovací schopnost tyristoru (článek 9). Přechod J1 určuje závěrné vlastnosti tyristoru (článek 8). Uváděli jsme již, že oba přechody J3 a J1 jsou v závěrném stavu polarizovány stejně, přechod J3 však vlivem silné dotace a tím malého odporu ke zvětšení maximálního přípustného závěrného napětí nepřispívá; celé závěrné napětí zachytí přechod J1.

Kontrolní otázka: Jednotlivé přechody J1, J2, J3 umožňují dosažení těchto stavů tyristoru; sepnutí (přechod z blokovacího do propustného stavu), blokovací a závěrný stav. Udejte, který přechod umožňuje dosažení každého stavu.

1.15. Maximální závěrné a blokovací napětí tyristoru

Zabývejme se nyní závěrným a blokovacím napětím tyristoru. Jistě se pamatujete na látku, probíranou v kapitole I. V ní jsme zjistili, že ani na nejkvalitnější přechod PN nemůžeme přivést závěrné napětí libovolné velikosti. Vzdělá-li závěrné napětí přechodu PN, vzdělá i intenzita elektrického pole, působícího v oblasti přechodu. Dosáhne-li intenzita kritické hodnoty, nastává elektrický průraz přechodu a závěrný proud lavinovitě vzdělá.

To, co jsme nyní zopakovali o vlastnostech přechodu PN a co jsme poznali při vyšetřování vlastností diod, můžeme bez jakékoliv změny uplatnit v případě přechodu J.

TJ druhého přechodu J2 je situace jiná. Jistě i zde vzdělá intenzita elektrického pole se vzdělávajícím blokovacím napětím až do kritické hodnoty, kdy nastává průraz a proud přechodem rychle vzdělá. Proud, procházející přechodem J2, však působí stejně jako řídicí proud tyristoru, což znamená, že po překročení blokovacího napětí tyristor spíná a napětí na přechodu J2 se zhroutí.

Kontrolní otázka: Tyristor může přejít do vodivého stavu (sepnout) i bez účinku řídicího proudu. Tento případ nastane, jestliže

- a) blokovací napětí přestoupí hodnotu průrazného napětí,
- b) závěrné napětí přestoupí hodnotu průrazného napětí.

1.16. Vypínání tyristoru

V předchozích člancích jsme osvětlili pochody, jež probíhají při spínání tyristoru. Nyní obrátíme svoji pozornost k opačnému ději: k přechodu tyristoru z vodivého do nevodivého stavu.

Chceme-li, aby propustný proud tyristoru klesl na nulu, musíme odstranit značné množství nosičů nábojů, zaplavujících jeho vnitřní strukturu. Teprve potom se může na tyristoru objevit mezi anodou a katodou větší napětí než pouhý úbytek v propustném směru (budeme o něm mluvit později).

Nevodivý stav tyristoru nastane buď tím, že

1. tyristorem neprochází proud, nebo
2. na tyristor připojíme závěrné napětí.

Každá z obou uvedených možností vyžaduje zásah v pracovním obvodu tyristoru. V prvním případě postupujeme např. tak, že pracovní obvod přerušíme, takže propustný proud klesne na nulu. Pohyblivé nosiče nábojů zmizí vlivem rekombinace: vždy dva nosiče opačného znaménka (volný elektron + díra) se spojí, a tím vzájemně zruší svoji schopnost vyvolat elektrický proud.

V druhém případě musíme změnit polaritu napětí v pracovním obvodu; v uspořádání na obr. 175 to znamená přepojení pólů zdroje napětí U tak, aby anoda byla spojena se záporným pólem a katoda přes zatěžovací odpor R_2 s kladným. Největší počet nosičů nábojů je v takovém případě odčerpán vlivem napětí zdroje, zbytek zmizí opět působením rekombinace.

Rozhodně nemůžeme zmenšit na nulovou hodnotu propustný proud tím, že přerušíme řídicí obvod, takže řídicí proud je nulový. Jakmile tyristor sepnul, je další průchod řídicího proudu přes elektrodu G a katodu zpět do zdroje řídicího napětí U_0 zbytečný. U běžných typů tyristorů lze řídicím proudem způsobit jedině sepnutí tyristoru, kdežto jeho přechod do nevodivého stavu lze provést jedině vhodným zásahem v pracovním obvodu.

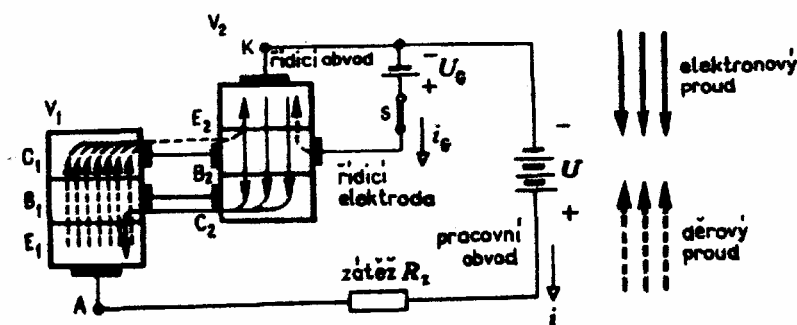
Kontrolní otázka: Jak lze tyristor vypnout ?

- a) Přerušením řídicího obvodu.
- b) Přerušením pracovního obvodu.
- c) Přepólováním vnějšího zdroje napětí v pracovním obvodu.

1.17. Impulsové řízení tyristoru

Přerušením řídicího obvodu nedosáhneme přechodu tyristoru z vodivého do nevodivého stavu. Zjistili jsme dokonce, že již během spínání tyristoru je zbytečné, aby řídicím obvodem procházel proud (Článek 13).

Vraťme se ještě jednou k náhradnímu obvodu tyristoru, naznačenému na obr. 177. Řídicí proud $i_G = i_{B2}$ vyvolává v tranzistoru V_2 kolektorový proud, který otvírá jakožto proud báze $i_{B1} = i_{C2}$ první tranzistor V_1 , jehož kolektorový proud zase otevírá zpětně tranzistor V_2 . Jestliže kolektorové proudy i_{C1} , i_{C2} z obr. 177 dosáhly jisté minimální hodnoty, může



Obr. 177. Impulsové řízení tyristoru

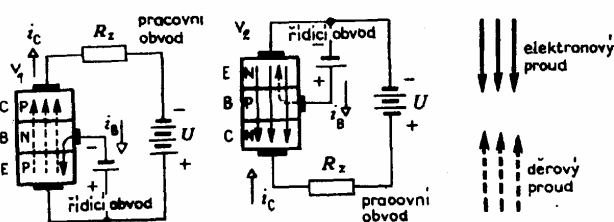
klesnout řídicí proud tyristoru, vstupující do báze aktivního tranzistoru V2 působením zdroje U_0 , na nulu a spínací pochod tyristoru tím nebude nijak dotčen. Tyristor sepne a bude jím procházet propustný proud, určený napětím zdroje a velikostí zatěžovacího odporu R_2 .

Vidíme, že k zapnutí tyristoru je zapotřebí pouze krátkého proudového impulsu i_G , proto mluvíme o tzv. *impulsovém řízení*.

Kontrolní otázka: Jak lze dosáhnout sepnutí tyristoru kromě toho, že mezi jeho řídicí elektrodu G a katodu K zapneme zdroj pomocného stejnosměrného napětí U_G ?

1.18. Spojité a nespojité řízení proudu v pracovním obvodu tranzistoru a tyristoru

Na tomto místě již můžeme uvést zásadní rozdíl mezi řízením tranzistoru a tyristoru. Vraťme se zpět k obsahu článku 12, tzn. k obr. 178.



Obr. 178. Řízení tranzistoru

Zavedeme-li proud do báze tranzistoru, zvětší se vlivem tranzistorového jevu i kolektorový proud. Zvětšování řídicího proudu způsobuje zvětšování výstupního proudu tranzistoru, zmenšování řídicího proudu přivodí pokles výstupního proudu. Je-li řídicí proud nulový, je (přibližně) nulový i výstupní proud tranzistoru. Vidíme, že tranzistor lze řídit spojitě; můžeme nastavit libovolnou požadovanou hodnotu kolektorového proudu změnou proudu báze.

Naproti tomu nemůžeme u tyristoru nastavit jistou hodnotu propustného proudu tím, že bychom měnili velikost řídicího proudu i_G . Přivodíme sice sepnutí tyristoru třeba krátkým impulsem proudu i_G , pak se však v pracovním obvodu tyristoru objeví propustný proud hodnoty, určené napájecím napětím a zátěží.

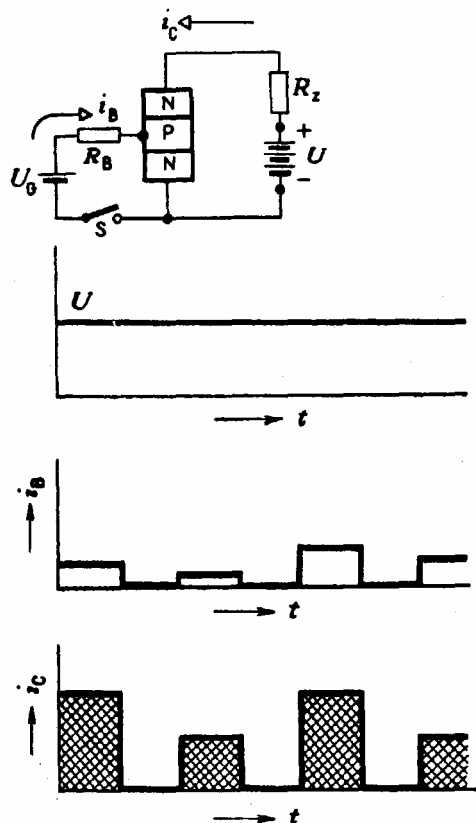
Kontrolní otázka: U které z následujících polovodičových součástek můžeme spojitě měnit vodivost ve výstupním obvodu?

- U tyristoru.
- U tranzistoru,

1.19. Tranzistor jako spínač stejnosměrného napětí

Možnost spojitého řízení tranzistoru předurčuje i jeho jednu důležitou technickou aplikaci: tranzistor se hodí velmi dobře k řízení stejnosměrného proudu. Kromě toho jej ovšem můžeme použít i jako stejnosměrného spínače, jak jsme poznali v kapitole VIII.

Vliv změny hodnoty řídicího proudu na výstupní proud ukazuje diagram na obr. 179. Napětí ve výstupním obvodu je sice stále ($U = \text{konst.}$),



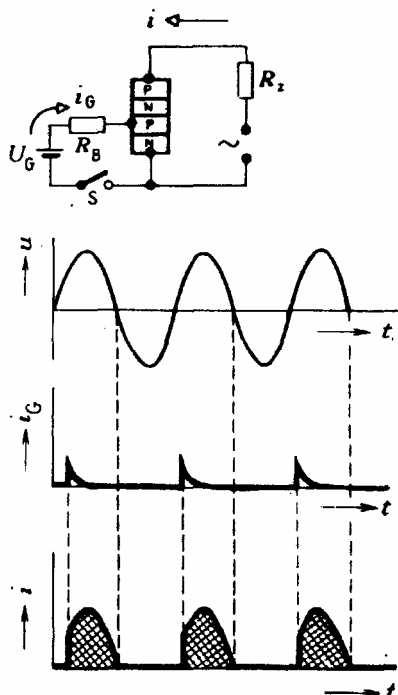
Obr. 179. Tranzistor spínající stejnosměrné napětí

ale proud, procházející zatěžovacím odporem R_z , se mění podle okamžité velikosti řídicího proudu, tj. proudu báze. (Proud B můžeme měnit např. tak, že při stálém pomocném napětí U spojujeme a rozpojujeme kontakty pomocného mechanického spínače S .)

Kontrolní otázka: Jak bude pracovat tranzistor z obvodu, uvedeného na obr. 170, jestliže zvolíme odpor R tak velký, aby tranzistor po sepnutí kontaktu S přešel do nasyceného stavu?

1.20. Tyristor jako spínač střídavého napětí

Teď se zase vrátíme k možnosti použití tyristoru. Víme, že tyristor lze řídit pomocí impulsů proudu i_0 (Článek 17). Abychom dosáhli nevodivého stavu tyristoru, nesmí jím po jistou dobu procházet propustný proud. V obvodech, v nichž působí střídavé napětí, se tohoto požadavku dosáhne



Obr. 180. Tyristor spínající střídavé napětí

automaticky v době, kdy se mění polarita střídavého napětí. Pozorujte zapojení, uvedené na obr. 180: jestliže kontakt S sepneme vždy po začátku každé periody střídavého napětí $u(t)$ kmitočtu 50 Hz, dojde k přechodu tyristoru z vodivého do nevodivého stavu 50krát za vteřinu bez jakýchkoliv dalších opatření

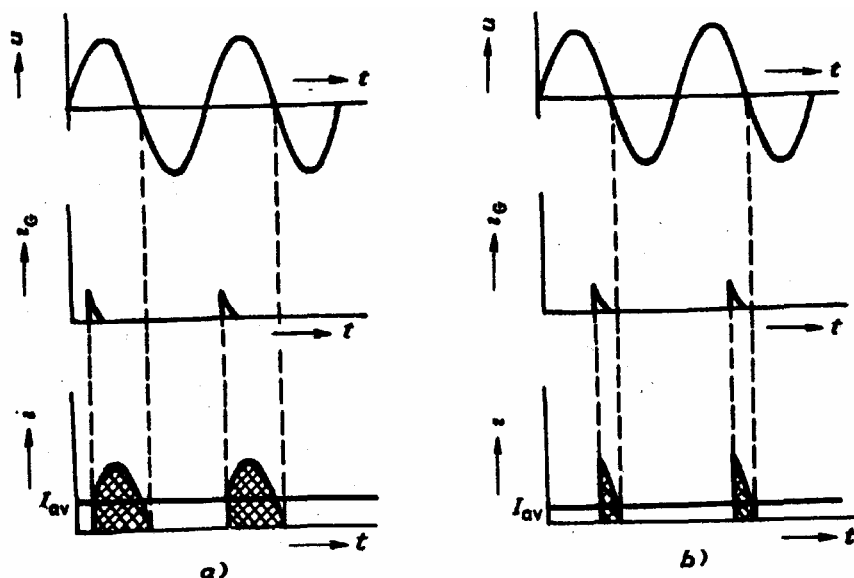
Kontrolní otázka: Jak můžete označit funkci tyristoru v obvodu z obr. 180?

KONTROLNÍ TEST C

1. Lze dosáhnout sepnutí tyristoru jinak než pomocí řídicího proudu!
2. Je nutné, aby procházel řídicí proud, jestliže již tyristor přešel do propustného stavu?
3. Jakým způsobem lze tyristor převést z vodivého do nevodivého stavu?
4. Tyristor a tranzistor se mimo jiné liší způsobem jejich řízení. Vysvětlete.

1.21. Princip řízení elektrického výkonu tyristory

S výkladem základních vlastností tyristoru jsme již u konce, Přesto bychom měli alespoň naznačit (podrobněji si této otázky všimnete v kapitole XI) jeho výhodné použití při řízení elektrického výkonu, dodávaného zdrojem střídavého napětí. V obvodu z obr. 180 (vraťte se zpět k článku 20) můžeme ovládat spínač V řídicím obvodu tyristoru tak, že řídicí impulsy se fázově posouvají po časové ose, tzn. že je z polohy, naznačené na obr. 181a posuneme do polohy, uvedené na obr. 181b. V každé periodě tedy dojde k jejich zpoždění a stejně dojde i ke zpoždění okamžiku, v němž tyristor spíná. Proud v pracovním obvodu tyristoru ovšem dosahuje nuly



Obr. 181. Řízení elektrického výkonu tyristorem

vždy ve stejném okamžiku, tj. tehdy, když mění napájecí napětí svoji polaritu, na začátku záporné půlperrody napětí $u(t)$. Změnou fáze řídicích impulsů tedy měníme efektivní i stejnosměrnou hodnotu zatěžovacího proudu, procházejícího odporem R_Z .

ZÁVĚREČNÝ TEST KE KAPITOLE

1. Tyristor má mnoho podobného s polovodičovou diodou. Jak bychom jej mohli označit? Jako

- a) spínací tranzistor,
- b) říditelnou polovodičovou diodu,
- c) diodu typu P ν N, P π N.

2. Je-li anoda tyristoru kladná oproti katodě, mohou nastat dva provozní stavy, a to

- a) závěrný a propustný,
- b) závěrný a blokovací,
- o) propustný a blokovací?

3. Tyristorová struktura sestává z polovodičových oblastí typu P či N. Kolik má těchto oblastí?

- a) Tři.
- b) Čtyři.

4. Připojíme-li tyristor na napětí, dochází k posuvu volných nosičů nábojů v jeho vnitřní struktuře. Pohybují se

- a) díry ke kladné elektrodě,
- b) díry k záporné elektrodě,
- o) elektrony ke kladné elektrodě,
- d) elektrony k záporné elektrodě?

5. Které nosiče nábojů se podílí na vytvoření propustného proudu?

- a) Elektrony nebo díry.
- b) Elektrony a díry.

6. Tyristor může sepnout pouze tehdy, nacházel-li se předtím ve stavu

- a) závěrném,
- b) blokovacím,
- o) v obou případech?

7. Aby přešel tyristor z blokovacího do propustného stavu, musí sepnout. Sepnutí tyristoru dosáhneme tehdy, jestliže řídicí proud prochází řídicí elektrodou

- a) po celou dobu spínacího děje a průchodu propustného proudu tyristorem,
 - b) pouze po zlomek celkové doby průchodu propustného proudu tyristorem.
8. Vzhledem k jisté charakteristické vlastnosti tyristoru nazýváme jeho řízení
- a) spojitě,
 - b) impulsové?
9. Velikostí řídicího proudu můžeme měnit velikost propustného proudu
- a) vůbec ne,
 - b) pouze částečně?
10. Přechod tyristoru do nevodivého stavu nastává
- a) odpojením napájecího napětí, působícího v pracovním obvodu,
 - b) převedením tyristoru do závěrného stavu,
 - c) odpojením řídicího napětí.
11. Tyristor se hodí zvláště k tomu, aby pracoval jako spínač
- a) střídavého napětí,
 - b) stejnosměrného napětí.
12. Hodnota propustného proudu se dá tyristorem řídit pouze
- a) časovým posuvem řídicích impulsů oproti počátku kladné půlperrody napájecího střídavého napětí,
 - b) změnou amplitudy řídicích impulsů,
 - c) změnou šířky řídicích impulsů.

Další polovodičové součástky

Termistor

Termistor (také negativní termistor nebo termistor NTC) je nelineární odporový symetrický jednobran, jehož odpor se výrazně zmenšuje se zvyšující se teplotou. Teplotou, která mění odpor termistoru, je jednak teplota okolí, jednak teplota, vyvolaná Jouleovým teplem proudu, procházejícího termistorem. Některé termistory se ohřívají nad teplotu okolí nepřímo pomocným topným článkem. Normalizovaná značka termistoru je na obr. 132a. Termistory se vyrábějí z kysličníků a siričků kovů.

Voltampérová charakteristika termistoru se měří při stálé teplotě okolí. Tím se vyloučí změny teploty okolí a charakteristika pak respektuje jen vliv oteplení procházejícím proudem. Pro různé teploty okolí tak dostaneme soustavu křivek s parametrem $\vartheta_a = \text{konst}$ (obr. 132b).

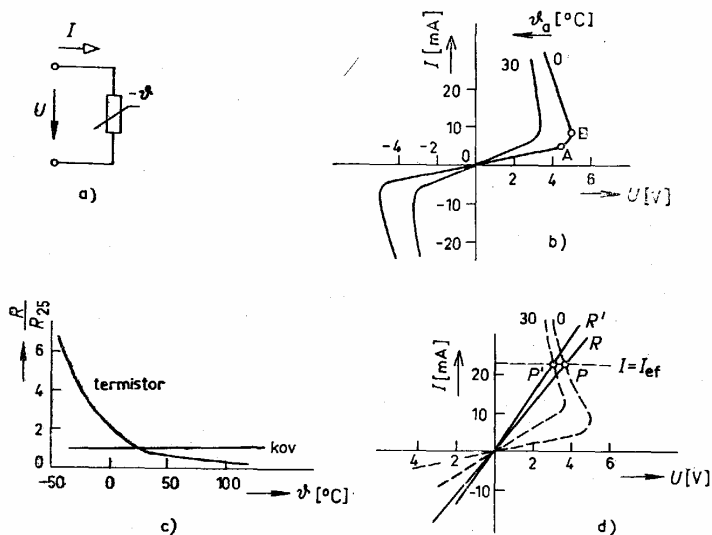
Na voltampérové charakteristice termistoru rozeznáváme tyto význačné úseky

1. Úsek mezi počátkem a bodem A je téměř lineární, neboť teplota termistoru a tím i jeho odpor jsou přibližně stálé. Oteplení procházejícím proudem je v této oblasti zanedbatelné, a proto je teplota termistoru určena pouze teplotou okolí $\vartheta_a = \text{konst}$. Termistor se chová, jako činný odpor, jehož velikost je při určité teplotě určena převrácenou hodnotou směrnice příslušného přímkového úseku charakteristiky.

2. V úseku od bodu A výše se rostoucí měrou uplatňuje ohřev termistoru procházejícím proudem. Termistor se ohřívá nad teplotu okolí, odpor termistoru se zmenšuje, charakteristika se zakřivuje a nad bodem B má oblast záporného diferenciálního odporu.

Závislost odporu termistoru na teplotě lze přibližně vyjádřit vztahem

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta_0} e^{B(1/\vartheta - 1/\vartheta_0)}$$



Obr. 132. Termistor; a) normalizovaná značka, b) voltampérové charakteristiky termistoru, c) závislost poměrné velikosti odporu termistoru na teplotě, d) chování termistoru při rychlých změnách proudu

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta_0} e^{B(1/\vartheta - 1/\vartheta_0)}$$

v němž ϑ je daná teplota a ϑ_0 vztažná teplota (absolutní [K]),

R_{ϑ} a R_{ϑ_0} jsou odpory při dané a vztažné teplotě, B je materiálová konstanta, tzv. teplotní citlivost termistoru, obvykle v rozmezí 10^3 až $5 \cdot 10^3$ K.

Tato závislost je na obr. 132c. Z průběhu je patrné, že teplotní součinitel odporu je:

a) záporný (odpor termistoru se zvyšující se teplotou klesá),

b) závislý na teplotě - při nízkých teplotách se odpor mění s teplotou výrazně, při vyšších teplotách se odpor termistoru ustálí. Pro teplotní součinitel platí: $\alpha = -B/€32$. Teplotní součinitel termistoru při pokojové teplotě je asi desetkrát větší než u kovových rezistorů.