CAPITOLUL 4

Comutatoare, relee și Semiconductori cu control al puterii

OBIECTIVELE

După studierea acestui capitol, ar trebui să puteți să:

- Înțelegeți tipurile, configurațiile și termenii comutatoarelor mecanice.
- Descrieți tipurile și funcționarea releelor electromecanice.
- Înțelegeți caracteristicile releelor compacte, avantajele și dezavantajele releelor compacte în comparație cu releele electromecanice.
- Înțelegeți funcționarea tranzistoarelor de putere și a amplificatoarelor de putere, calculul curenților circuitului tranzistorului și selectarea unui tranzistor de putere.
- Înțelegeți caracteristicile și aplicațiile de bază ale tranzistoarelor JFET și MOSFET de putere.
- Înțelegeți caracteristicile și funcționarea redresoarelor cu siliciu și a circuitelor de bază ale redresoarelor cu siliciu.
- Înțelegeți cum funcționează un triac și câteva aplicații ale acestuia.
- Explicați utilizarea unor circuite de declanșare pentru redresoarele și triacurile cu siliciu, în special cele care utilizează tranzistorul unijoncțiune, tranzistorul de unijoncțiune programabil sau diac.

INTRODUCERE

O capacitate importantă a aproape tuturor sistemelor de control este de a regla fluxul de energie electrică, deoarece electricitatea este, de obicei, legătura dintre controler și actuator (care este de obicei un motor electric). Problema este că ieșirea semnalului mic al controlerului nu este de obicei suficient de mare pentru a conduce sarcina direct și trebuie să fie amplificată într-un fel.

Trei clasificări ale componentelor sunt utilizate pentru a controla puterea electrică: (1) dispozitive electromecanice, cum ar fi comutatoare și relee, (2) tranzistoare de putere efect de câmp

tranzistori efect de câmp
și (3) un grup de dispozitive semiconductoare numite tiristoare, care includ redresoarele și triac cu siliciu controlat. Toate aceste dispozitive de control al puterii fac obiectul acestui capitol.

4.1 SWITCH-URI

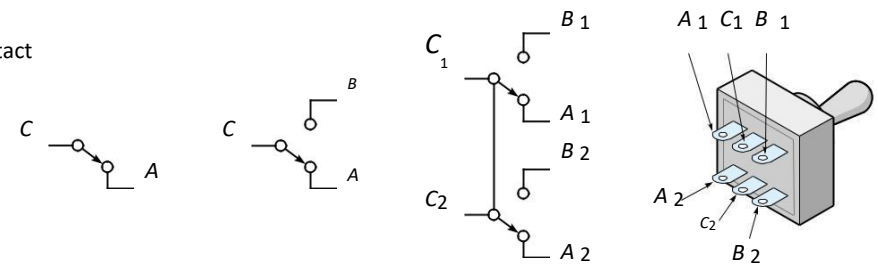
Un *comutator mecanic* este un dispozitiv care se poate deschide sau închide, permițând astfel unui curent să curgă sau nu. După cum ați observat fără îndoială, comutatoarele vin în multe forme, dimensiuni și configurații diferite.

Comutare switch-uri

Probabil cel mai comun tip de comutator este **comutatorul,** care este disponibil în configurații variate de contact . *Fiecare comutator este format din unul sau mai mulți* ***poli****, unde fiecare pol este de fapt un comutator separat*. Modul de contact pentru **comutatorul cu un singur pol** (SPST), care este cel mai simplu comutator, este ilustrat în figura 4.1 litera (a). Observați că are un singur set de contacte care se pot deschide sau închide. Apoi, pe linia de comunicație, este comutatorul **cu un singur pol/dublu-aruncare** (SPDT) ilustrat în Figura 4.1(b). Observați că "brațul" mobil numit *comun* (C) se poate conecta fie cu contactul **A,** fie cu **B.** Figura 4.1 (c) ilustrează un comutator **dublu-pol /dublu-aruncare** (DPDT), care constă în două comutatoare SPDT separate electric într-o carcasă care funcționează împreună. În figura 4.1 litera (d), observați modul în care terminalele sunt aranjate pe partea din spate a carcasei comutatorului DPDT. Deși nu sunt la fel de comune, comutatoarele cu până la șase poli sunt disponibile.

Până în prezent, discuția **s-a** axat pe comutatorul cu două poziții, care vine în două configurații: simplul *on-off* [Figura 4.1 litera (a)] și *on-on* [Figura 4.1(b)]. Un **comutator cu trei poziții,** numit *on-off-on*, are o poziție stabilă în mijloc, unde con-tactul C nu este conectat nici la A, nici la B, așa cum este ilustrat în figura 4.2. Un astfel de comutator ar putea fi folosit pentru a controla un motor, unde cele trei poziții ar putea corespunde cu "înainte", "oprit" și "invers".

Figura 4.1
Comutarea între persoane de contact
Aranjamente.



(a) SPST (b) SPDT (c) DPDT (d) Comutator cu comutare DPDT

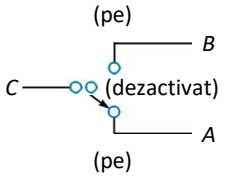


Figura 4.2
Un comutator cu trei poziții: on-off–on.

O altă variantă a comutatorului de comutare este ca una sau mai multe dintre poziții să fie acționate cu arcuri, ceea ce înseamnă că presiunea fizică trebuie menținută pe mâner pentru a-l menține în poziție. Acestea se numesc **comutatoare de contact de moment,** un exemplu care este comutatorul de aprindere al unei mașini, unde trebuie să mențineți presiunea continuă asupra tastei pentru a angaja motorul de pornire. Tabelul 4.1 prezintă unele dintre variațiile posibile pentru un stil particular de comutare. De exemplu, al treilea comutator (1SFX191), este un comutator în trei poziții, una dintre pozițiile pornite fiind momentană.

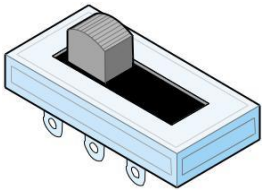
TABELUL 4.1

Comutatoare tipice de comutare*

Tip	Numărul de poli	Circuit
1SBX191	1	On-Off-On
1SCY191	1	On On
1SFX191	1	On-Off-On†
1SGX191	1	On On†
1SHX191	1	On†-Off-On†
2SBX191	2	On-Off-On
2SCY191	2	On On
2SFX191	2	On-Off-On†
2SGX191	2	On On†
2SHX191	2	On†-Off-On†
3SBX191	3	On-Off-On
3SCY191	3	On On
3SFX191	3	On-Off-On†
3SCX191	3	On On†
3SHX191	3	On†-Off-On†
4SGX191	4	On-Off-On
4SCY191	4	On On
4SFX191	4	On-Off-On†
4SGX191	4	On On†
4SHX191	4	On†-Off-On†

*Evaluat la 5 A la 125 Vac; 5 A la 28 Vdc.
† contact momentan.

Figura 4.3
Un comutator de diapozitiv.



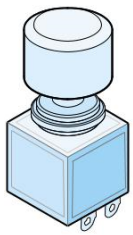
Contactele comutatorului de comutare au evaluări maxime de tensiune și curent pentru funcționarea în curent alternativ și în curent continuu. Un comutator tipic de comutare poate suporta mai puțină tensiune DC decât tensiunea de curent alternativ la curentul nominal; de exemplu, un comutator poate fi evaluat la 5 A pentru 125 Vac sau 5 A pentru 28 Vdc. Motivul diferenței este că atunci când contactele sunt doar de deschidere, curentul va continua (pentru scurt timp) cu un arc electric, fenomen care tinde să ardă și facă o ”groapă” în suprafața de contact. La AC arcul electric apare mai puțin decât la DC pentru aceeași tensiune, deoarece AC tensiunea este sinusoidală și trece prin 0 V de două ori fiecare ciclu. De asemenea, cele mai multe comutatoare de comutare au o acțiune "snap" care trage contactele în afară rapid pentru a minimiza arcuirea electrică.

Strâns legat de comutatorul de comutare este **slide switch** ilustrat în Figura 4.3. Deși mecanic diferit intern, acest comutatorul îndeplinește aceleași funcții ca și comutatorul de comutare și este disponibil în aceleași configurații. Comutatoarele **slide switch** tind să fie mai puțin costisitoare, dar nu sunt disponibile pentru un curent mare ca al comutatoarelor de comutare.

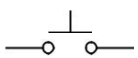
Switch-uri cu butoane

Comutatoarele prin apăsare de buton (Push-button switches) [Figura 4.4(a)] sunt aproape întotdeauna legate de moment - pentru că trebuie menținută o presiune pentru a avea comutatorul activat. Figura 4.4(b-d) prezintă simbolul comutatorului prin apăsare de buton. Observați că există două configurații posibile: **în mod normal, deschise**

Figura 4.4
Comutatoare cu butoane.

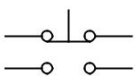


(a) Buton comutator



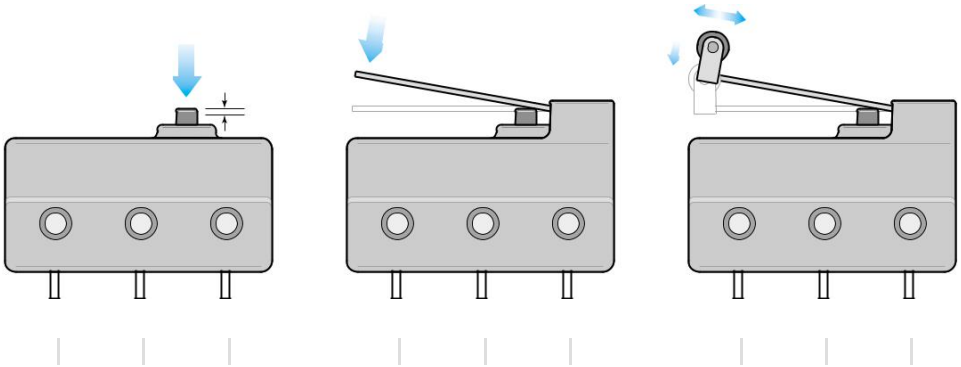
(b) Deschis în mod normal (NU) comutator

(c) Închis în mod normal (NC) comutator



(d) NC și NO comutator

Figura 4.5
Limitați comutatoarele (utilizând un tip de microswitch).



(a) Apăsați butonul (b) Împingeți pe flexibil (c) Role

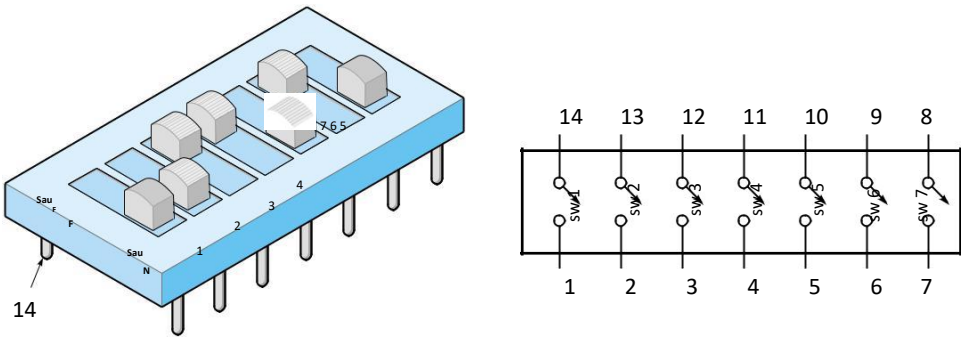
(NU) și **în mod normal închis** (NC). Pentru comutatorul NO [Figura 4.4(b)], contactele sunt deschise până la apăsarea butonului; iar pentru comutatorul NC [Figura 4.4 litera (c)], contactele sunt închise atunci când comutatorul este "în repaus" și se deschid atunci când butonul este apăsat.

Alte tipuri de comutatoare

Un **comutator de limită (limit switch)** este un comutator cu buton montat într-o astfel de poziție încât este activat prin contact fizic cu un obiect mobil. Un exemplu este un comutator de ușă auto, care simte dacă ușa este sau nu închisă. Comutatoarele limită sunt disponibile cu diferite tipuri de hardware de acționare. Adesea, acestea sunt montate pe un corp mic comutator de dimensiuni standard numit **microswitch** (dezvoltat de Compania MicroSwitch). Un microswitch necesită o apăsare foarte mică. Figura 4.5 ilustrează câteva exemple de comutatoare de limită. (Comutatoarele limită și alți senzori de proximitate sunt discutați în capitolul 6.)

Un **comutator DIP** este un set de comutatoare SPST mici încorporate într-o unitate în formă de circuit integrat (IC) (DIP standard pentru pachet dual în linie). Comutatorul DIP poate fi conectat la o priză IC sau lipit într-o placă de circuit. După cum se arată în figura 4.6,

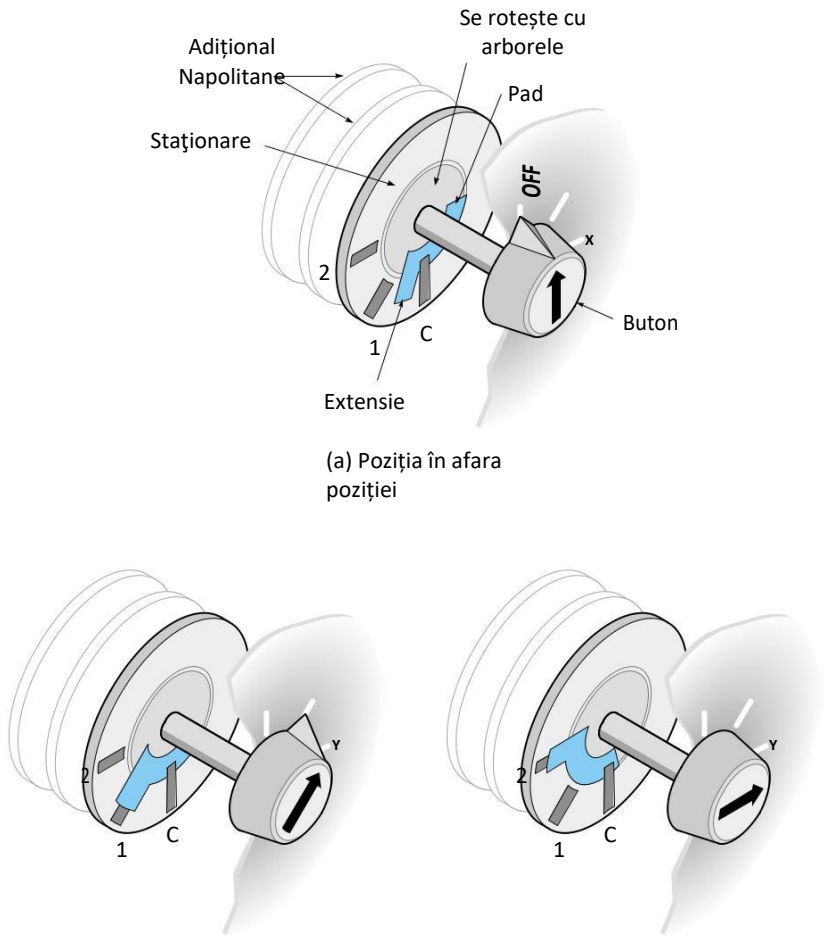
Figura 4.6
Un comutator DIP.



fiecare comutator individual utilizează doi pini direct unul peste celălalt; adică comutatorul 1 folosește pinii 1 și 14, comutatorul 2 folosește pinii 2 și 13 și așa mai departe.

Un **comutator rotativ,** considerabil diferit de comutatoarele discutate până acum, poate forma mai multe operații complicate de comutare. După cum se arată în figura 4.7, comutatorul rotativ este construit din plăcuțe de comutare **montate** de-a lungul unui singur arbore. Partea interioară a fiecărei plăcuțe se rotește în trepte cu arborele, iar partea exterioară rămâne staționară. Pentru a înțelege modul în care funcționează comutatorul, se ia în considerare figura 4.7 (a), care arată comutatorul în poziția de oprire. În această poziție, terminalul C intră în contact cu pad-ul, dar pad-ul nu atinge nici terminalele 1 sau 2. În figura 4.7 (b), arborele a fost rotit la poziția *X*. Observați că terminalul C este încă conectat la pad, dar acum mica extensie a pad-ului intră în contact cu terminalul 1. În figura 4.7 litera (c), arborele

Figura 4.7
Funcționarea comutatorului rotativ.

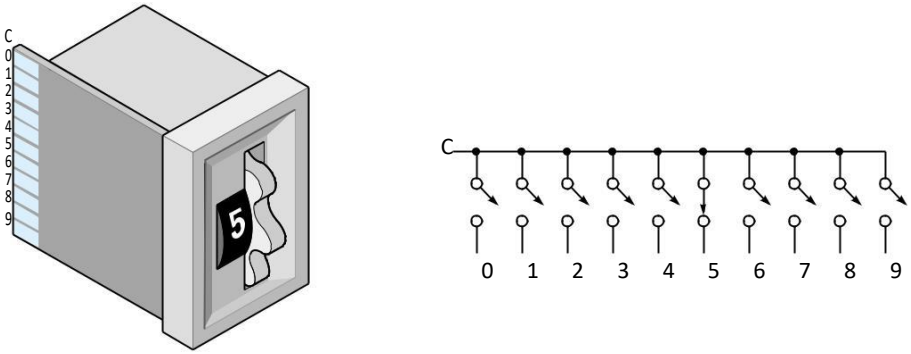


(a) Poziția în afara poziției

(b) Contact C se conectează contact 1

(c) Contact C se conectează la contact 2

Figura 4.8
Un comutator thumbwheel (poziția cu zece zecimale).



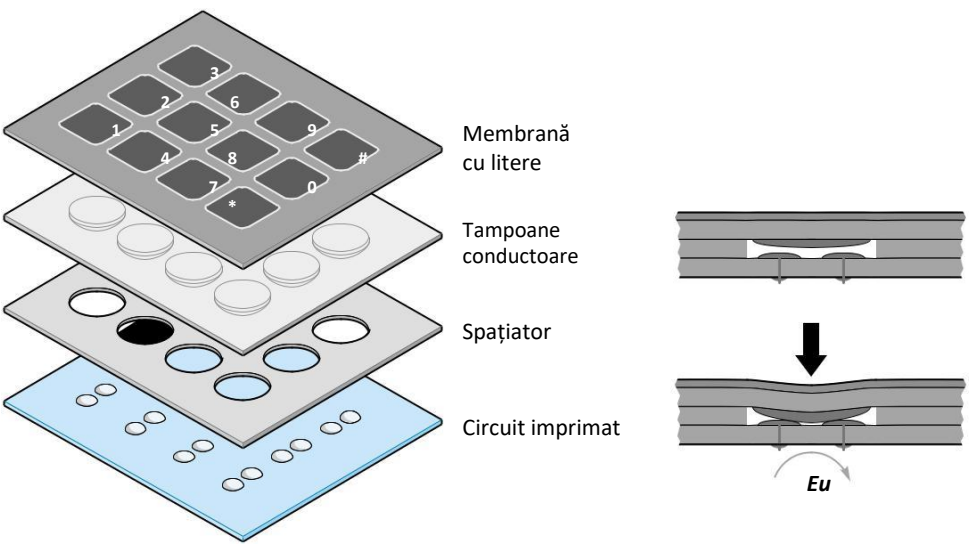
(a) Corpul comutatorului (b) Schema comutatorului

a fost rotit în poziția *Y*, iar acum pad-ul este în contact cu terminalul 2. Observați că ar putea exista trei sau patru astfel de comutatoare pe aceeași plăcuță, precum și mai multe plăcuțe.

Un **comutator thumbwheel,** este un tip special de comutator rotativ, este folosit pentru a introduce date numerice. Operatorul selectează un număr prin rotirea roții numerotate (Figura 4.8), iar fiecare număr corespunde unei setări de comutare diferite. Schema comutatorului din figura 4.8 litera (b) arată că unul dintre cele zece terminale separate este conectat la terminalul C. De asemenea, sunt disponibile switch-uri thumbwheel care ieșire 4-bit BCD (binar codificate zecimale) și alte coduri.

Un alt tip de dispozitiv de introducere a datelor este tastatura **comutatorului cu membrană.** Acest tip de key-pad constă din comutatoare cu butoane construite dintr-un număr de straturi, așa cum se arată în figura 4.9(a). Stratul inferior este de obicei o placă cu circuite imprimate cu două tampoane care nu se conectează

Figura 4.9
Un comutator cu membrană.



(a) Construcția comutatorului (b) Funcționarea

pentru fiecare comutator. Situată deasupra plăcii de circuit este un strat de distanțare cu o gaură peste fiecare poziție de comutare. Al treilea strat este flexibil și are un tampon conductiv peste fiecare comutator. Totul este acoperit cu o membrană flexibilă impermeabilă, imprimată cu litere sau cifre. Atunci când o tastă este apăsată, pad-ul conductiv este forțat să intre în contact cu placa de circuit și oferă o cale pentru curent, așa cum este ilustrat în figura 4.9 (b). Întrerupătoarele cu membrană sunt potrivite în special în mediile industriale murdare, deoarece membranele împiedică praful să intre în ansamblul comutatorului.

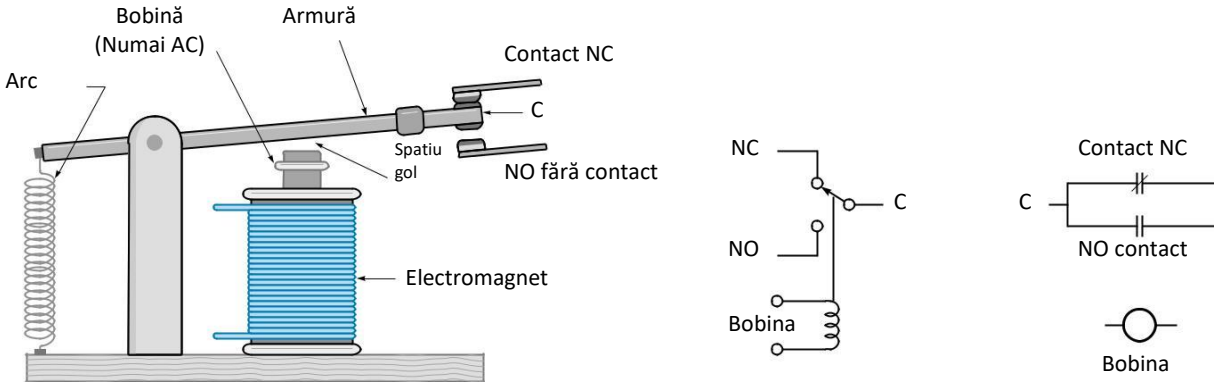
4.2 RELEE

Relee electromecanice

Releul electromecanic (EMR) este un dispozitiv care utilizează un electromagnet pentru a furniza forța de a închide (sau deschide) contactele comutatorului, cu alte cuvinte, un comutator alimentat electric. O diagramă a unui releu simplu este prezentată în figura 4.10 (a). Când electromagnetul, numit *bobina*, este alimentat, se trage în jos *armătura* conectată cu un arc . Contactele releu sunt descrise ca fiind unul dintre cele două tipuri: contacte deschise în mod normal (NU), care sunt deschise în stare ne-energizată și contacte închise în mod normal (NC), care sunt închise în starea energizată. Figura 4.10(b) prezintă un simbol schematic comun pentru releu. Prin convenție, simbolul descrie întotdeauna releul în stare ne-energizată, astfel încât să puteți determina cu ușurință care sunt contactele NC și NO din schemă. O altă reprezentare schematică pentru releu este prezentată în figura 4.10 (c). Acest simbol este utilizat într-un tip de desenare numit diagramă *scară*. Într-o diagramă de scară, bobina releului și contactele sale sunt separate pe desen. (Diagramele scărilor sunt discutate în capitolele 9 și 12.)

Specificațiile electrice pentru contacte sunt diferite de cele pentru bobină. Pentru contacte, este specificat curentul și tensiunea maximă pentru funcționarea în curent continuu și curent alternativ. Pentru bobină, tensiunea preconizată și rezistența bobinei sunt de obicei specificate. Puteți vedea aceste numere pe fișa de specificații (spec.) prezentată în tabelul 4.2. Tensiunea și rezistența bobinei pot fi utilizate pentru a calcula curentul bobinei în stare stabilă. De fapt, este nevoie de mai multă tensiune și curent pentru a trage în jos contactele releului decât pentru a le reține acolo, deoarece armătura trebuie trasă peste un spațiu de aer. Prin urmare, aceste cantități se numesc, respectiv, **tensiune de tragere** și curent **de tragere.** De exemplu, contactele unui releu particular 6-V se închid efectiv la 2,1 V și rămân închise până când tensiunea este redusă la 1 V. Valorile tensiunii și curentului necesare pentru a menține releul energizat se numesc **tensiunea minimă de reținere** și **curentul consumat.** Observați că valoarea tensiunii de tragere este mult mai mică decât tensiunea în bobina nominală. Acest lucru precizat este de a garanta că releul va trage rapid și fiabil atunci când funcționează la tensiunea nominală. Tensiunile bobinei sunt specificate ca fiind AC sau DC. Diferența este că bobinele de curent alternativ sunt construite cu **poli** pentru a preveni "oscilația" cu frecvența de 60 de Hz. Un releu cu pol are un inel metalic în jurul feței polului electromagnetului (a se vedea figura 4.10). Fluxul magnetic indus în acest inel menține releul închis atunci când curentul alternativ trece prin 0 V.

Figura 4.10
Un releu electromagnetic.



(a) Părți ale releului

(b) Un comun simbol schematic

(c) Simbol schematic pentru o diagramă scară

TABELUL 4.2

Relee tipice de uz general*

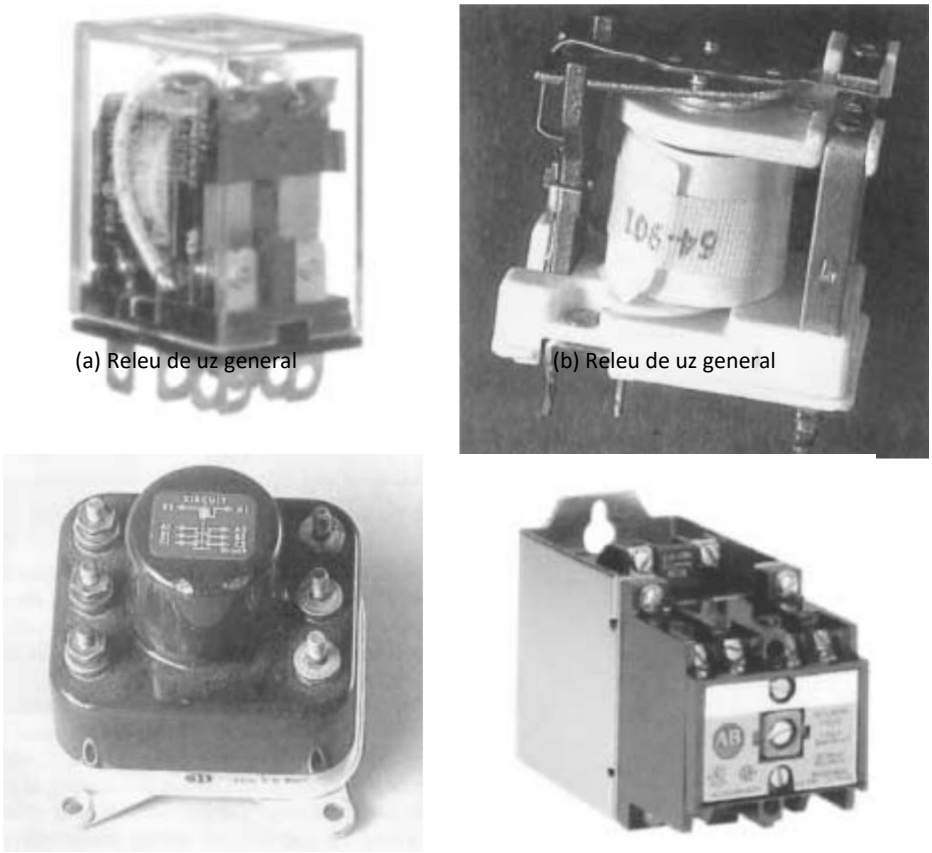
Tip	Bobine Intrare	Bobine Ohm	Acțiune
Y1-SS1.0K	6 DC	1,000	SPDT
Y1-SS220	3 DC	220	SPDT
Y2-V52	6 DC	52	2PDT
Y2-V185	12 DC	185	2PDT
Y2-V700	24 DC	700	2PDT
Y2-Y2.5K	48 DC	2,500	2PDT
Y2.15K	115 DC	15,000	2PDT
Y4. V52	6 DC	52	4PDT
Y4-V185	12 DC	185	4PDT
Y4-V700	24 DC	700	4PDT
Y4-V2.5K	48 DC	2,500	4PDT
Y4-V15K	115 DC	15,000	4PDT
Y6-V25	6 DC	25	6PDT
Y6-V90	12 DC	90	6PDT
Y6-V430	24 DC	430	6PDT
Y6-V1.5K	48 DC	1,500	6PDT
Y5-V9.0K	115 DC	9,000	6PDT

*Contacte: 2 A de obicei, 3 A maxim 125 Vac de 28 Vdc.

Releele sunt disponibile într-o varietate de dimensiuni, configurații de contact și capacități controlul puterii. Unele relee miniaturale se pot conecta la o priză IC și pot fi alimentate direct de la o poartă logică digitală. La celălalt capăt al spectrului, un releu de putere, adesea numit **contactor,** este folosit pentru a comuta curentul direct la mașini mai mari și poate manipula 50 A. Figura 4.11 prezintă o selecție de relee diferite.

Este bine să ne amintim că, din două motive, releele au o viață finită. În primul rând, deoarece releul este un dispozitiv mecanic, piesele în mișcare în cele din urmă uzează, și în al doilea rând, contactele electrice pot deveni ineficiente din cauza arcuirii electrice. Uzura de contact este foarte

Figura 4.11
O selecție de relee.



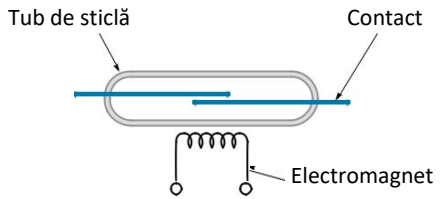


Figura 4.12
Un releu de reed.

depinde de curentul electric care este comutat. De exemplu, un anumit releu este evaluat pentru 9 milioane de operațiuni la 1,5 amperi, dar numai 2 milioane de operațiuni la 3 amperi. Două milioane de operațiuni sună foarte mult, dar dacă acest releu ar fi într-o fabrică de 24 de ore fiind folosit într-o operație repetitivă la fiecare 10 secunde, ar trebui înlocuit la fiecare 8 luni. Durata de viață de contact depinde, de asemenea, de tipul de sarcină controlată. De exemplu, sarcinile inductive, cum ar fi motoarele, provoacă mult mai multe arcuri și deteriorări decât sarcinile rezistive, cum ar fi luminile și elementele de încălzire.

Releul reed este unic, deoarece contactele mici sunt încapsulate într-un tub mic de sticlă sigilată, care este vidat sau umplut cu un gaz inert ca azotul. Contactele sunt activate de un câmp magnetic extern, așa cum se arată în figura 4.12. Contactele sunt fie uscate, fie acoperite cu mercur. Contactele cu mercur au un strat subțire de mercur care umple neregularitățile de suprafață, făcând o zonă de conducție mai mare și reduce deteriorarea lor. În general, releele reed au o durată lungă de viață și tensiune bobină scăzută (frecvent compatibile TTL) și sunt imune la medii murdare; cu toate acestea, ele sunt, în general, de putere scăzută (contacte evaluate la 2 A sau mai puțin) și sensibile la vibrații.

Relee solid-state

Un **releu solid-state** (SSR) este un dispozitiv pur solid care a înlocuit EMR în multe aplicații, în special pentru pornirea și oprirea sarcinilor de curent alternativ, cum ar fi motoarele. Din punct de vedere fizic, SSR este ambalat într-o cutie (de aproximativ aceeași dimensiune ca un EMR), cu patru terminale electrice, așa cum se arată în figura 4.13 litera (a). Cele două terminale de intrare sunt similare

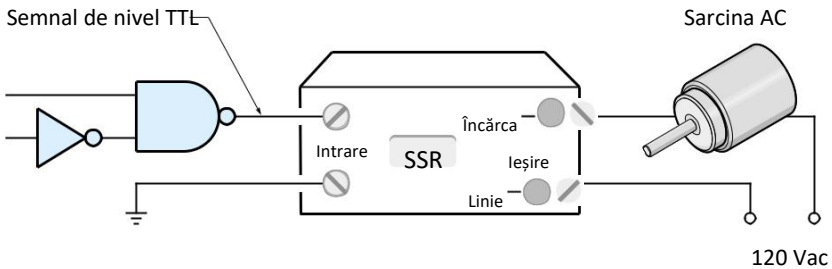
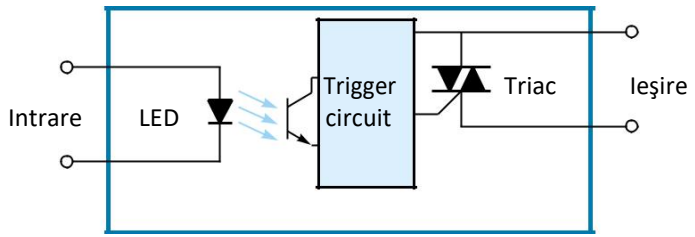


Figura 4.13
Un releu solid-state.

(a) Utilizarea unui SSR pentru a acționa un motor

Figura 4.13
(cont.)



(b) Circuit SSR

la bobina unui EMR, iar cele două terminale de ieșire sunt similare cu contactele EMR (de obicei SPST, în mod normal deschise).

Tensiunea de intrare sau de *control* a SSR este de obicei 5 Vdc, 24 Vdc, sau 120 Vac. Modelele 5-Vdc sunt concepute pentru a fi conduse direct din circuitele logice digitale TTL. Întorcându-ne atenția spre partea de ieșire a SSR, vedem că sarcina este plasată în serie cu puterea de 120-Vac sau 240-Vac. Curentul de ieșire poate fi la fel de mare ca 50 A în unele modele. Multe SSRs încorporează o caracteristică numită comutare de tensiune **zero:** Curentul de linie este pornit exact în momentul în care tensiunea de curent alternativ traversează 0 V. Acest lucru elimină timpii de creștere a tensiunii de ieșire și astfel minimizează zgomotul de interferență electromagnetică (EMI).

Figura 4.13 litera (b) prezintă o diagramă bloc a interiorului unei SSR. Tensiunea de intrare conduce un LED, iar lumina de la LED pornește un foto-tranzistor, care, la rândul său, pornește triacul (un dispozitiv de comutare discutat mai târziu în acest capitol). LED-ul izolează electric secțiunile de intrare și ieșire ale SSR. Acest lucru este important din două motive: În primul rând, permite electronicii de control să aibă o conectare separată de liniile electrice; în al doilea rând, împiedică vârfurile de înaltă tensiune din circuitul de alimentare să-și croiască drum înapoi în amonte la electronica de control mai delicată.

Releele solid-state au o serie de avantaje importante față de releele electromecanice. Neavând piese în mișcare înseamnă că (teoretic) nu se vor uza niciodată și le face practic imune la șocuri și vibrații. De asemenea, datorită electronicii încorporate, acestea pot fi acționate cu o sursă de joasă tensiune (cum ar fi TTL), indiferent de capacitatea de ieșire în curent. Principalele dezavantaje ale SSR sunt următoarele: (1) Ele pot fi "false declanșate" de zgomotul electric; (2) chiar și atunci când este pornit, rezistența la ieșire nu este exact 0 ohmi, astfel încât există unele căderi de tensiune mică și pierderi de putere în consecință în releu, și atunci când este în off acestea pot avea un curent de scurgere; (3) deși sunt de lungă durată, spre deosebire de un EMR, acestea nu dau greș în mod previzibil; (4) aranjamentele de contact sunt limitate, astfel încât acestea nu pot funcționa pentru toate aplicațiile unde se folosesc relee electromecanice.

Releul **hybrid solid-state relay** este similar cu SSR, dar utilizează un releu de reed de joasă tensiune, cu acțiune rapidă, în loc de un LED pentru a porni triacul de ieșire. Folosind releu de reed se furnizează o izolare electrică bună și poate funcționa mai bine decât SSR în unele situații.

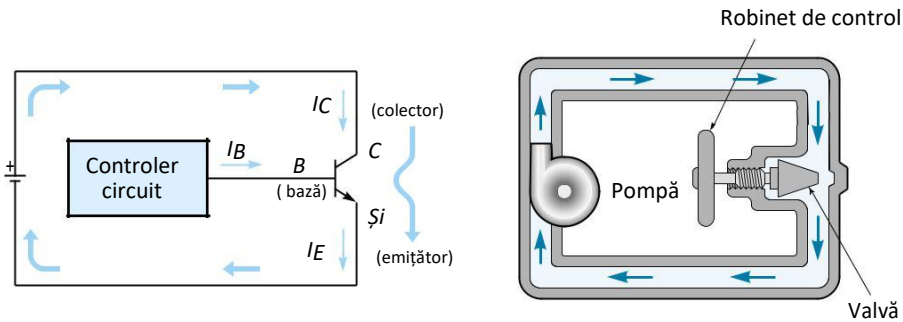
4.3 TRANZISTOARE DE PUTERE

Tranzistoarele de putere sunt utilizate pe scară largă în circuitele de control atât ca comutatoare, cât și ca amplificatoare de putere. Tranzistorii de putere sunt fundamental la fel ca tranzistorii de semnal mic, dar sunt concepute pentru a transporta mai mult curent. Mulți cititori ai acestui curs vor fi studiat deja funcționarea tranzistorului, dar pentru cei care nu au (și poate ca o recenzie pentru cei care au) este prezentat următorul material de bază privind tranzistorii. De asemenea, cititorului i se reamintește că acest curs utilizează fluxul de curent *convențional*, ceea ce înseamnă că se presupune că curentul curge de la terminalul pozitiv al bateriei la negativ. Dacă sunteți familiarizați cu *fluxul de electroni*, amintiți-vă că teoria și "numerele" sunt aceleași, numai direcția indicată a curentului este opusă față de ceea ce sunteți obișnuiți.

Tranzistori bipolari joncțiune

Tranzistorul cu joncțiune bipolară (BJT), denumit *tranzistor*, este un dispozitiv solid-state cu trei terminale care funcționează în curent electric la fel ca o supapă de apă într-o conductă. Acest concept este ilustrat în Figura 4.14. Figura 4.14 litera (a) arată că tranzistorul are trei terminale; **baza, emițătorul** și **colectorul** și că este conectat într-un circuit de serie simplu cu curentul (convențional) care intră în colector (C) și pleacă prin emițător (E). Din punct de vedere funcțional, acest lucru este analog cu sistemul ilustrat în figura 4.14 litera (b), unde apa este pompată printr-o supapă parțial deschisă. Fluxul de apă poate fi reglat prin deschiderea sau închiderea supapei. În circuitul tranzistorului, debitul de curent (I_C) poate fi reglat prin ajustarea unui mic curent de control în bază (I_B); mai mult I_B, cu atât mai mult I_C. De fapt, I_C ar putea fi de 100 de ori (sau mai mult) mai mare decât I_B.

Există două tipuri de bază de tranzistori: **NPN** și **PNP,** ambele realizate din trei straturi de material semiconductor. După cum se arată în figura 4.15, singura diferență funcțională dintre cele două tipuri este direcția fluxului curent. Vârful de săgeată al emițătorului indică direcția curentă (convențională). Tipul NPN este mai comun și va fi tipul utilizat în următoarele discuții.

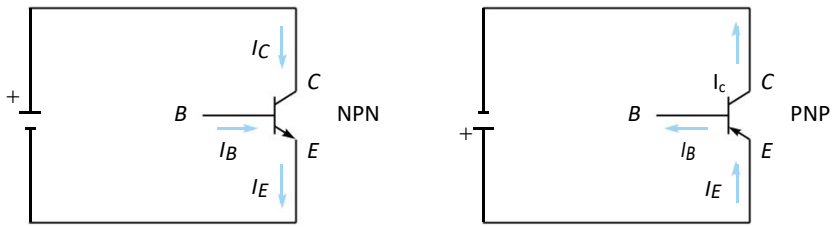


(a) Circuit tranzistor simplu

(b) Analogie cu apă-în-conductă

Figura 4.14
Acțiunea tranzistorului de bază (curent convențional).

Figura 4.15
Tranzistoare NPN și PNP



Funcționarea tranzistorului poate fi rezumată cu următoarele afirmații:

1. În condițiile de funcționare standard, I_C va fi un multiplu al lui I_B; cu alte cuvinte, *tranzistorul este un amplificator de curent*. Câștigul **curentului înainte** (h_{FE} sau β)(variază în funcție de tipul tranzistorului) este exprimat ca

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \tag{4.1}$$

unde
h_{FE} = câștigul curentului înainte
I_C = curent prin colector
I_B = curent prin bază

2. În interiorul tranzistorului, curentul de bază care este de valoare mică se adună cu curentul din colector pentru a deveni curentul din emițător. Acest lucru este exprimat ca

$$I_E = I_C + I_B \tag{4.2}$$

unde
I_E = curent prin emițător
I_C = curent prin colector
I_B = curent de bază

Cu toate acestea, deoarece curentul colector este de obicei mult mai mare decât curentul de bază, o aproximare utilă este de a considera curentul din colector ca fiind aproximativ egal cu curentul din emițător:

$$I_E \approx I_C \tag{4.3}$$

3. Tranzistorul disipează puterea ori de câte ori există un curent care curge prin el *și* o tensiune este peste el, exprimată ca

$$P_D = I_C V_{CE} \tag{4.4}$$

unde
P_D = puterea disipată de tranzistorul
I_C = curent colector
V_{CE} = tensiunea dintre colector și emițător

EXEMPLUL 4.1

Un tranzistor de putere cu un h_{FE} de 50 funcționează cu un curent de sarcină (I_C) de 3 A. Care este curentul de bază?

SOLUȚIE

Amintiți-vă că un tranzistor este în esență un amplificator de curent în cazul în care I_C este h_{FE} ori mai mare decât curentul de bază (I_B). Prin rearanjarea ecuației 4.1, putem rezolva pentru I_B:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{3\text{ A}}{50} = 60\text{ mA}$$

Am stabilit că tranzistorul își va "amplifica" curentul de bază, dar de unde știți care este curentul de bază? Joncțiunea emițătorului de bază acționează ca o diodă ce conduce într-un singur sens, ceea ce înseamnă că trebuie să i se aplice mai întâi o **tensiune de deschidere** (aproximativ 0,7 V pentru tranzistorii de siliciu, 0,3 V pentru germaniu) înainte de orice flux de curent de bază semnificativ. Odată ce baza a fost ridicată la tensiunea de deschidere, orice creștere suplimentară a tensiunii de bază va face ca sa apară un curent de bază . Acest lucru este prezentat sub formă de grafic în figura 4.16. Circuitul de deschidere tranzistor stabilește o tensiune DC de deschidere. Semnalul care urmează să fie amplificat este apoi suprapus pe această tensiune de deschidere. O metodă comună de creare a tensiunii de deschidere este cu un circuit de divizor de tensiune de tip rezistiv, așa cum se arată în figura 4.17. Observați că rezistențele R_1 și R_2 creează o tensiune de deschidere de bază de 0,8 V. Consultând curba de intrare din figura 4.16, vedem că 0,8 V ar provoca un curent de bază I_B de 2 mA.

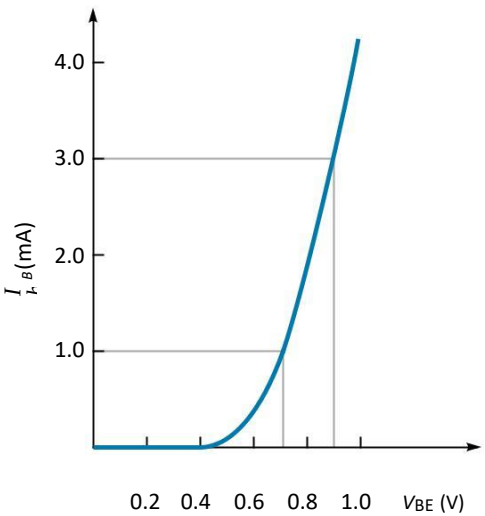


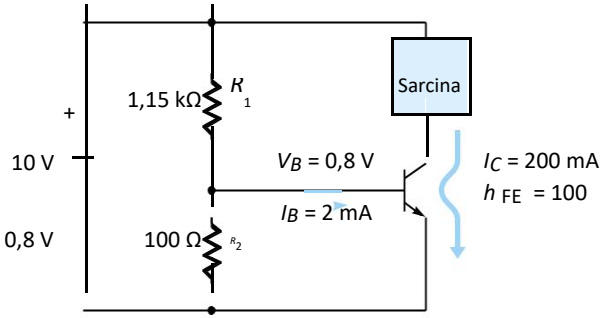
Figura 4.16
O curba de intrare (bază) a tranzistorului de siliciu.

Figura 4.17
Utilizarea divizorului de tensiune pentru polarizarea tranzistorului

.

$$V_B = \frac{V_{DC} R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_B = \frac{10\ \text{V} \times 100\ \Omega}{(100\Omega + 1{,}15\ \text{k}\Omega)} = 0{,}8\ \text{V}$$



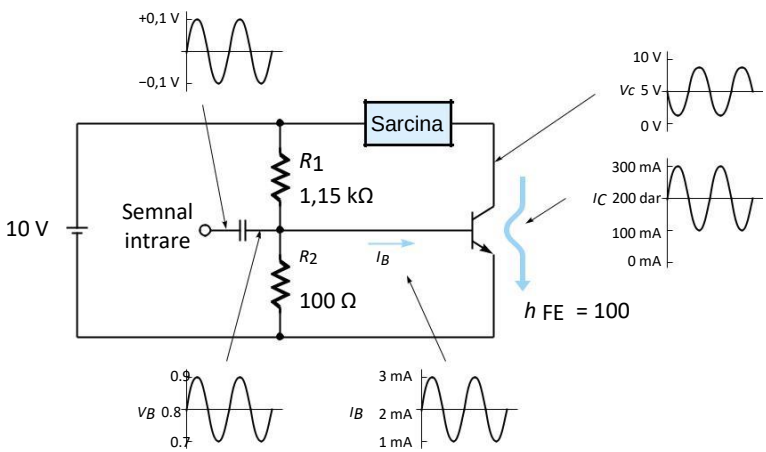
h_{FE} a tranzistorului este dat ca având valoarea de 100, astfel încât prin rearanjarea ecuației 4.1 putem calcula curent colector I_C:

$$I_C = h_{FE} I_B = 100 \times 2\ \text{mA} = 200\ \text{mA}$$

Observați că sarcina este în serie cu colectorul, astfel încât toți cei 200 mA vor trece prin tranzistor și sarcina.

Acum suntem gata să discutăm despre funcționarea amplificatorului de putere al tranzistorului simplu prezentat în Figura 4.18. Condițiile de polarizare DC au fost deja discutate în paragraful de precedent. Acum, se ia în considerare o tensiune de semnal de intrare de ±0.1 V, care este aplicat pe bază printr-un condensator. Cu alte cuvinte, intrarea este adăugată la tensiunea de polarizare de 0,8 Vdc pentru a forma o tensiune de bază AC care trece de la 0,7 la 0,9 V, așa cum se arată în figura 4.18. Referindu-ne din nou la curba de bază (Figura 4.16), vedem că o tensiune de bază de 0,7-0,9 V se traduce într-un curent de bază de 1-3 mA, pe care tranzistorul îl înmulțește într-un curent colector de 100-300 mA și tot acest curent trece prin sarcină. Observați că tensiunea de ieșire V_C este în afara fazei cu curentul de ieșire I_C. Acest lucru se întâmplă deoarece tranzistorul trebuie să-și reducă rezistența pentru a crește curentul, iar o rezistență mai mică creează o cădere de tensiune mai mică.

Figura 4.18
Un amplificator uzual cu tranzistor.



Circuitul din Figura 4.18 este un amplificator de clasă A. Mai exact, **amplificatorul de clasă A** este atunci când punctul de polarizare este setat undeva în mijlocul intervalului de operare, iar curentul real de ieșire este deasupra și sub această valoare. Cu alte cuvinte, tranzistorul este polarizat pentru a fi "pe jumătate", astfel încât semnalul de intrare poate porni "mai mult pe" sau "mai puțin pe" din acel punct de mijloc. Funcționarea în clasă A permite amplificarea atât a valorilor de intrare pozitive, cât și a celor negative, dar are dezavantajul că puterea este disipată în orice moment, chiar și atunci când nu este prezent niciun semnal de intrare (deoarece I_C curge întotdeauna).

EXEMPLUL 4.2

Găsiți curentul de sarcină în circuitul tranzistorului prezentat în figura 4.19. Utilizați curbele de intrare din figura 4.16 și presupuneți că h_{FE} a tranzistorului este 70.

SOLUȚIE

Vrem să găsim curentul de ieșire și, pentru că știm că câștigul actual este de 70, problema se reduce la a afla care este curentul de bază. În cele mai multe cazuri, cum ar fi aceasta, este tensiunea de bază pe care o putem calcula (sau măsura), așa că vom folosi curbele de intrare pentru a găsi curentul de bază corespunzător. Mai întâi, calculați tensiunea de polarizare de bază de la R_1 și R_2 utilizând regula divizorului de tensiune:

$$V_{BE} = \frac{V_C R_2}{(R_1 + R_2)} = \frac{10\ \text{V} \times 100\ \Omega}{1.2\ \text{k}\Omega + 100\ \Omega}) = 0.77\ \text{V}$$

Acum, știind că tensiunea de bază este de 0,77 V, folosim curba de intrare din Figura 4.16 pentru a determina că I_B care este de aproximativ 1,7 mA. Curentul de sarcină I_C poate fi acum calculată prin rearanjarea Ecuația 4.1:

$$I_C = h_{FE} I_B = 70 \times 1{,}7\ \text{mA} = 119\ \text{mA}$$

Notă: Scopul acestui exemplu a fost de a vă oferi o perspectivă asupra modului în care funcționează efectiv tranzistorul de clasă A. Din păcate, în cele mai multe cazuri, curbele de intrare nu sunt prezentate în fișele de specificații, astfel încât designerii de amplificatoare tranzistoare folosesc feed-back-ul și diverse relații empirice, care sunt prezentate în orice curs bun de proiectare cu tranzistori.

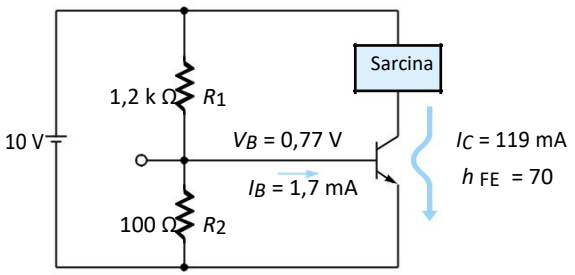


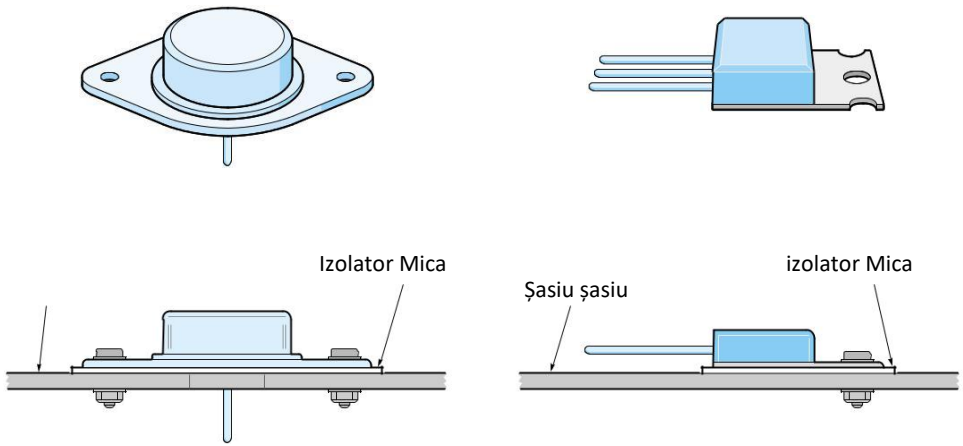
Figura 4.19
Un circuit tranzistor (Exemplul 4.2).

Există și alte posibilități de polarizare în afară de clasa A. În **funcționarea clasei B a tranzistorului,** tensiunea de polarizare de bază este setată puțin sub 0,7 V (pentru siliciu), care este punctul în care tranzistorul este la un pas de pornire. Avantajul acestui sistem este că nici o putere nu este disipată atunci când nu există nici un semnal de intrare (deoarece tranzistorul este oprit). Dezavantajul este că poate amplifica numai tensiunile de bază pozitive pentru tranzistorii NPN (sau tensiunile de bază negative pentru PNP).

A treia posibilitate de polarizare este **funcționarea de clasă C** în care tranzistorul este acționat ca un comutator, fie full-on, fie full-off. Tensiunea de bază va fi fie de 0 V, ceea ce o va opri complet, fie suficient de mare (să zicem, 1 V) pentru a porni atât tranzistorul să acționeze ca un scurtcircuit. Avantajul acestui sistem este că este foarte eficient din punct de vedere energetic (pentru acele aplicații care pot utiliza tipul de pornire a puterii). Aplicațiile amplificatoarelor de clasă C sunt discutate în capitolul 7.

Tranzistorii de putere sunt fizic mai mari decât tranzistorii de semnal și sunt concepuți pentru a transporta curenți mari. În sistemele de control, acestea sunt utilizate pentru a furniza curentul de acționare pentru motoare și alte dispozitive electromecanice. Atunci când un tranzistor are un curent și o tensiune mare în același timp, puterea rezultată (V_{CI_C}) trebuie disipată sub formă de căldură. Un tranzistor de putere tipic este proiectat să funcționeze până la 200 ° C (360 ° F) peste temperatura ambientală. Cu toate acestea, capacitatea sa de putere este evaluată proporțional pentru temperaturi de peste 25 °C (așa cum este notat în fișa de specificații). Carcasa tranzistorului de putere are o suprafață metalică plană pentru a oferi o cale de evacuare termică pentru căldură. Prin urmare, pentru a funcționa oriunde în apropierea puterii nominale, tranzistorul trebuie montat ferm pe șasiu sau pe un radiator **metalic,** o bucată de metal cu aripioare de răcire pentru a disipa căldura în aer. Figura 4.20 ilustrează două tipuri standard de tranzistoare de putere și modul în care acestea urmează să fie montate. De multe ori cazul în sine este terminalul colector. Dacă colectorul trebuie păstrat izolat electric de șasiul de montare, se utilizează un izolator special de mică, împreună cu o unsoare albă conductoare termic.

Figura 4.20
Stiluri și montarea tranzistoarelor de putere.



(a) "Top hat design" Stil TO-3, TO-66

(b) Stil TO-220

EXEMPLUL 4.3

Un tranzistor de 100 de wați (W) nu funcționează, aparent din cauza supraîncălzirii. Tranzistorul a fost înlocuit, iar măsurătorile au arătat că curentul de sarcină (I_C) a fost de 2 A, V_{CE} a fost de 35 V, iar temperatura carcasei a crescut la 125 ° C. Care este problema?

SOLUȚIE

Mai întâi, calculați puterea disipată de tranzistor (utilizând ecuația 4.4):

$$P_D = I_C I_{CE} = 2\ \text{A} \times 35\ \text{V} = 70\ \text{W}$$

Șaptezeci de wați este cu siguranță mai mică decât specificația producătorului de 100 W. Cu toate acestea, capacitatea reală de putere va fi mai mică în această situație, deoarece cazul este de 100 ° C peste temperatura ambiantă (mediul ambiant este luat la 25 ° C). Consultând o fișă de specificații, constatăm că puterea trebuie să fie evaluată la 0,57 W / ° C (peste 25 °). Acum calculăm capacitatea reală redusă de putere:

$$P_D = 100\ \text{W} - (0{,}57\ \text{W/°C} \times 100\text{°C}) = 43\ \text{W}$$

În mod clar, problema este că 70 W depășește capacitatea de putere nominală de 43 W. Aparent, tranzistorul nu este "răcit" suficient de bine; adică căldura nu se poate disipa suficient de repede de pe tranzistor.

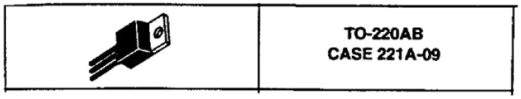
Figura 4.21 prezintă un exemplu de specificația a parametrilor pentru unele tranzistoare de putere. Pentru exemplu, luați în considerare TIP29C (primul tip NPN de pe listă). Acest dispozitiv poate avea un curent de sarcină continuu (I_C) de1 A și un MAXIM V_{CE} de 100 V. Observați gama largă dată pentru h_{FE} (15-75). Este uzual ca tranzistorii de același tip să aibă valori foarte diferite ale h_{FE}, astfel încât majoritatea circuitelor tranzistoare sunt concepute pentru a se potrivi cu acest lucru. S-ar putea să observați că unele tranzistoare din Figura 4.21 au valori mult mai mari ale h_{FE} decât restul. De exemplu, TIP112 (al patrulea din listă) are o valoare h_{FE} de minim 500. Aceștia sunt tranzistori în configurație **Darlington**. După cum se arată în micul desen din partea de sus a figurii 4.21, un **Darlington** are de fapt două tranzistoare conectate în așa fel încât să mai existe doar trei terminale prezentate lumii exterioare. Funcționează astfel: Curentul de bază de intrare este amplificat de primul tranzistor, iar apoi *întreaga sa* ieșire devine *curentul de bază al celui de-al doilea tranzistor,* astfel încât semnalul se amplifică a doua oară. Dacă h_{FE} a fiecărui tranzistor individual ar fi de 20, h_{FE} combinat ar fi de 20 × 20 = 400.

De asemenea, câștigul oricărui tranzistor scade în cele din urmă dacă frecvența devine suficient de mare. **Produsul amplificare x lățime de bandă** (f_T) este o constantă care este produsul frecvenței și câștigul la acea frecvență. Prin urmare, produsul amplificare-bandă reprezintă frecvența care este suficient de mare pentru a determina câștigul (h_{FE}) să fie 1.

Figura 4.21
O foaie de selecție pentru tranzistoarele de putere.

ON Semiconductor Selector Guide – Discrete Devices

BIPOLAR POWER TRANSISTORS SELECTOR GUIDE



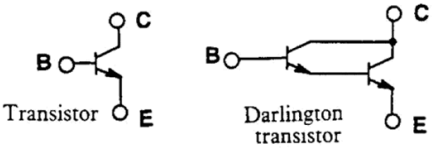


Table 1. PLASTIC TO–220AB — CASE 221A–09, Style 1

I_C Cont Amps Max	$V_{CEO(sus)}$ Volts Min	Device Type NPN	Device Type PNP	h_{FE} Min/Max	@ I_C Amp	Resistive Switching t_s µs Max	Resistive Switching t_f µs Max	Resistive Switching @ I_C Amp	f_T MHz Min	P_D (Case) Watts @ 25°C
1	100	TIP29C	TIP30C	15/75	1	0.6 typ	0.3 typ	1	3	30
	250	TIP47		30/150	0.3	2 typ	0.18 typ	0.3	10	40
	400	***TIP50***	***MJE5731A***	30/150	0.3	2 typ	0.18 typ	0.3	10	40
2	100	***TIP112***(2)	***TIP117***(2)	500 min	2	1.7 typ	1.3 typ	2	25(1)	50
	450/1000	***BUX85***		30	0.1	3.5	1.4	1	4	50
	450/1000	***MJE18002***		14/34	0.2	3	0.17	1	12 typ	40
3	100	***TIP31C***	***TIP32C***	25 min	1	0.6 typ	0.3 typ	1	3	40
4	80	***D44C12***	***D45C12***	40/120	0.2			1	40 typ	30
	400/700	***MJE13005***		6/30	3	3	0.7	3	4	60
5	100	***TIP122***(2)	***TIP127***(2)	1k min	3	1.5 typ	1.5 typ	4	4(1)	75
	400/700	***BUL45***		14/34	0.3	1.7	0.15	1	12 typ	75
	450/1000	MJE16002		5 min	5	3	0.3	3		80
	550/1200	***MJE18204***		18/35	0.5	2.75	0.2	2	12	75
6	100	***TIP41C***	***TIP42C***	15/75	3	0.4 typ	0.15 typ	3	3	65
	400/700	***BUL146***		14/34	0.5	1.75	0.15	3	14 typ	100
7	70	***2N6292***	***2N6107***	30/150	2	0.4 typ	0.15 typ	3	4	40
	150	BU407		30 min	1.5		0.75	5	10	60
8	100	***BDX53C***(2)	***BDX54C***(2)	750 min	3					
		TIP102(2)	***TIP107***(2)	1k/20k	3	1.5 typ	1.5 typ	3	4(1)	80
	150	***MJE15030***	***MJE15031***	20 min	4				30	50
	250	***MJE15032***	***MJE15033***	50 min	1				30	50
	350	***MJE13007***		5/30	5	3	0.7	5		80
			MJE5852	15 min	2	2	0.5	4		80
	400/700	***BUL147***		14/34	1	2.5	0.18	2	14 typ	125
10	60	***MJE3055T***	***MJE2955T***	20/70	4					75
	80	***2N6388***(2)	***2N6668***(2)	1k/20k	5				20(1)	65
		D44H11	***D45H11***	40 min	4	0.5 typ	0.14 typ	5	50 typ	50
	100	***BDX33C***(2)	***BDX34C***(2)	750 min	3				3	70
12	400/700	***MJE13009***		6/30	8	3	0.7	8	4	100
15	80	***D44VH10***	***D45VH10***	20 min	4	0.5	0.09	8	50 typ	83
	100	***BDW42***(2)	***BDW47***(2)	1k min	5	1 typ	1.5 typ	5	4	85

(1) $|h_{FE}|$ @ 1 MHz
(2) Darlington

Devices listed in bold, italic are ON Semiconductor preferred devices.

EXEMPLUL 4.4

Un tranzistor dintr-un echipament a mers prost și trebuie înlocuit cu unul dintre cele enumerate în figura 4.21. Specificațiile pentru tranzistorul original (defect) sunt următoarele:

Tip: NPN

Curent maxim de încărcare: 8 A

Tensiune maxima pe tranzistor: 150 V

Disiparea maxima a puterii: 50 W

$h_{FE:}$30

SOLUȚIE

Mai întâi luați în considerare curentul de încărcare de 8 A. Privind în jos lista tranzistoarelor NPN cu 8 amperi, vedem MJE15030, care îndeplinește cerința V_{CEO} (150 V), dar nu și h_{FE}. Astfel, va trebui să mergem cu MJE15032 (h_{FE} = 50 min), care îndeplinește toate cerințele.

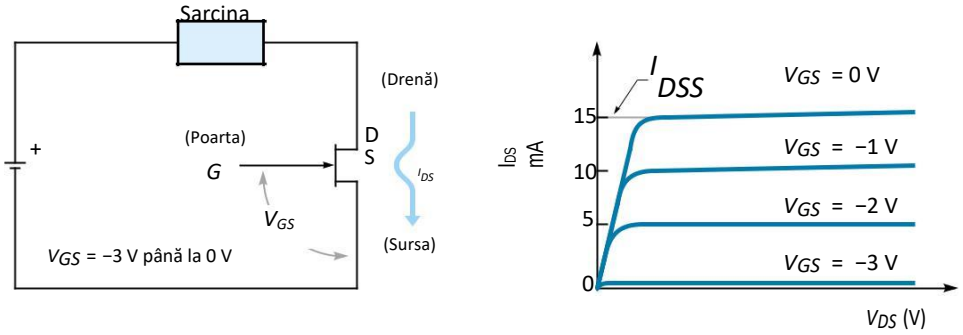
Tranzistori cu efect de câmp (FET)

Tranzistorul cu efect de câmp (FET) este un alt dispozitiv de amplificare compact cu trei terminale. FET-urile sunt similare cu BJT-urile din secțiunea anterioară, dar din cauza unor avantaje devin din ce în ce mai frecvente în aplicații de putere. Aceste avantaje includ impedanța ridicată la intrare, vitezele mari de comutare și sensibilitatea la temperatură mai mică. Există două tipuri de FET-uri, **joncțiunea FET** (JFET) și **semiconductorul de oxid metalic FET** (MOSFET). Ambele tipuri au trei terminale; **Drena** (D), **sursa** (S) și **poarta** (G). De asemenea, FET-urile sunt făcute să fie N-canal sau P-canal; tipul determină direcția curentului prin dispozitiv. FET-urile discutate în această secțiune sunt toate N-canal.

Circuitul JFET simplu este prezentat în Figura 4.22 (a). Curentul de încărcare I_{DS} trece prin drenă (D) la sursa (S). Cantitatea de curent de scurgere este controlată de tensiunea dintre poartă și sursă (V_{GS}) (în contrast cu BJT, unde curentul colector este controlat de curentul de bază). Caracteristicile JFET sunt descrise prin curbele caracteristice prezentate în figura 4.22 litera (b). Observați că curentul de sarcină (I_{DS}) este pe axa verticală, iar tensiunea peste FET (V_{DS}) este pe axa orizontală. Fiecare curbă reprezintă ceea ce se întâmplă pentru o tensiune diferită a porții. De exemplu, atunci când tensiunea porții (V_{GS}) este de -3 V, I_{DS} va fi de 0 mA. Această tensiune a porții este cunoscut sub numele de $\mathbf{V_{GS(off)}}$.

Când tensiunea porții este de -2 V, I_{DS} va fi de 5 mA și așa mai departe, până când tensiunea porții este de 0 V, făcând ca I_{DS} să fie de 15 mA. Deoarece tensiunea porții nu poate fi pozitivă într-un N-canal JFET, 15 mA este cel mai mare I_{DS} pentru acest FET special și se numește $\mathbf{I_{DSS}}$ (curent sursă de scurgere cu poarta scurtcircuitată).

Figura 4.22
tranzistor cu efect de câmp de joncțiune (JFET) caracteristici.



(a) Circuit JFET simplu (b) curbe caracteristice FET (eșantion)

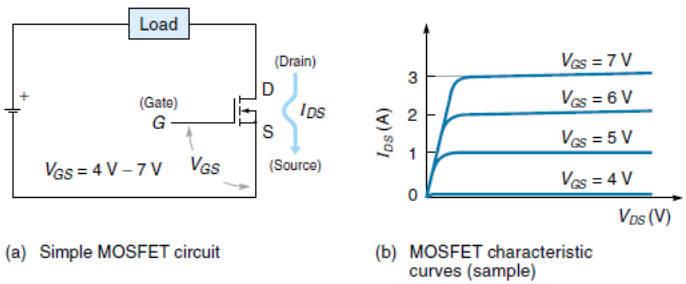
Al doilea tip de FET este MOSFET. MOSFET-urile sunt deosebit de importante în acest curs, deoarece *MOSFET-urile de putere*, pot funcționa cu mulți amperi, și au devenit din ce în ce mai populare. În figura 4.23 litera (a), observați că în simbolul FET poarta este afișată ca neavând legătură cu restul dispozitivului. Acest lucru înseamnă că poarta este cuplată capacitiv, determinând o rezistență foarte mare la intrare DC și care să permită ceea ce se numește **modul de îmbunătățire** a funcționării. În modul de îmbunătățire, toate tensiunile porții sunt pozitive. Luați în considerare curbele caracteristice eșantionului unui MOSFET de putere prezentat în figura 4.23 (b).
Când V_{GS} este de 4 V, I_{DS} este 0 A. Când V_{GS} este de 5 V, I_{DS} este de 1 A; când V_{GS} este de 6 V, I_{DS} este de 2 A (și așa mai departe, până la curentul maxim permis de dispozitiv).

Atât pentru JFET, cât și pentru MOSFET, intrarea este tensiunea porții, iar ieșirea este curentul sursă de scurgere. Câștigul acestui dispozitiv se numește **transconductanță** (g_m) și este exprimat în ecuația 4.5:

$$\text{Gain} = \frac{\Delta \text{ output current}}{\Delta \text{ input voltage}} = g_m = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} S \text{ (or mho)} \tag{4.5}$$

unde

g_m= câștig FET, numit transconductanță



(a) Simple MOSFET circuit (b) MOSFET characteristic curves (sample)

Figura 4.23.
Tanzistorul MOSFET

I_{DS} = curent de încărcare (de la drenă la sursă)
V_{GS} = tensiune de control la poarta

Observați că unitatea de măsură este $g_m = 1/R$, cunoscută sub numele *de siemens* (S). Un termen mai vechi pentru conductanță (încă în uz) este *mho,* care este *ohm* scris invers.

EXEMPLUL 4.5

Pentru MOSFET-ul de putere ale cărui curbe caracteristice sunt prezentate în figura 4.23 (b), găsiți câștigul g_m.

SOLUȚIE

Din ecuația 4.5, vedem că câștigul g_m este dată de modificarea curentului *de ieșire datorită modificării corespunzătoare a tensiunii porții de intrare*. Astfel, alegem două tensiuni de poartă convenabile - să zicem, 5 V și 6 V (care reprezintă o schimbare de 1 V) - și le împărțim folosind modificarea corespunzătoare a curentului de sarcină I_{DS}:

$$\text{Gain} = g_m = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} = \frac{(2\text{ A} - 1\text{ A})}{(6\text{ V} - 5\text{ V})} = \frac{1\text{ A}}{1\text{ V}} = 1\text{ S (or 1 mho)}$$

Specificațiile pentru MOSFET-ul de putere Motorola MTW24N40E sunt prezentate în Figura 4.24. Unele caracteristici importante ale acestui MOSFET sunt după cum urmează:

1. Curentul maxim de încărcare (I_{DS}) este de 24 A.
2. Tensiunea pragului porții ($V_{GS(th)}$), tensiunea porții care determină FET-ul să conducă, este între 2 și 4 V.
3. Câștigul minim FET, numit transconductanță înainte (g_{FS}), este de 11 mho. (Notă: g_{FS} este la fel ca g_m.)
4. Disiparea totală a puterii pentru FET (P_D) este mai mică de 250 W.

EXEMPLUL 4.6

Un anumit FET de putere (MTW24N40E) a fost găsit pentru a intra în conducție atunci când V_{GS} = 2.5 V . De asemenea, când V_{GS} = 3 V, curentul de sarcină (I_D) a fost măsurat pentru a fi 6 A. Este acest FET de operare în cadrul specificațiilor?

SOLUȚIE

Fișa de specificații arată că tensiunea pragului de poartă $V_{GS\,(th)}$ poate fi între 2 V și 4 V. Astfel, dacă acest FET începe să conducă cu o tensiune de poartă de 2,5 V, acesta îndeplinește această specificație.

Figura 4.24
Specificație pentru MOSFET-ul de alimentare MTW24N40E. (Drepturi de autor © Semiconductor Components Industries, LLC. Folosit cu permisiune.)

Designer's™ Data Sheet

TMOS E-FET™
Power Field Effect Transistor
TO-247 with Isolated Mounting Hole
N–Channel Enhancement–Mode Silicon Gate

MTW24N40E

Motorola Preferred Device

TMOS POWER FET
24 AMPERES
400 VOLTS
$R_{DS(on)}$ = 0.16 OHM

This high voltage MOSFET uses an advanced termination scheme to provide enhanced voltage–blocking capability without degrading performance over time. In addition, this advanced TMOS E–FET is designed to withstand high energy in the avalanche and commutation modes. The new energy efficient design also offers a drain–to–source diode with a fast recovery time. Designed for high voltage, high speed switching applications in power supplies, converters and PWM motor controls, these devices are particularly well suited for bridge circuits where diode speed and commutating safe operating areas are critical and offer additional safety margin against unexpected voltage transients.

- Robust High Voltage Termination
- Avalanche Energy Specified
- Source–to–Drain Diode Recovery Time Comparable to a Discrete Fast Recovery Diode
- Diode is Characterized for Use in Bridge Circuits

TMOS®

D
G
S

CASE 340K–01, Style 1
TO–247AE

MAXIMUM RATINGS (T_C = 25°C unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain–Source Voltage	V_{DSS}	400	Vdc
Drain–Gate Voltage (R_{GS} = 1.0 MΩ)	V_{DGR}	400	Vdc
Gate–Source Voltage — Continuous — Non–Repetitive ($t_p \le 10$ ms)	V_{GS} V_{GSM}	± 20 ± 40	Vdc Vpk
Drain Current — Continuous — Continuous @ 100°C — Single Pulse ($t_p \le 10$ µs)	I_D I_D I_{DM}	24 17.7 72	Adc Apk
Total Power Dissipation Derate above 25°C	P_D	250 2.0	Watts W/°C

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Drain–Source Breakdown Voltage (V_{GS} = 0 Vdc, I_D = 250 µAdc) Temperature Coefficient (Positive)	$V_{(BR)DSS}$	400 —	— 360	— —	Vdc mV/°C
Zero Gate Voltage Drain Current (V_{DS} = 400 Vdc, V_{GS} = 0 Vdc) (V_{DS} = 400 Vdc, V_{GS} = 0 Vdc, T_J = 125°C)	I_{DSS}	— —	— —	10 100	µAdc
Gate–Body Leakage Current (V_{GS} = ± 20 Vdc, V_{DS} = 0)	I_{GSS}	—	—	100	nAdc
ON CHARACTERISTICS (1)					
Gate Threshold Voltage (V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250 µAdc) Temperature Coefficient (Negative)	$V_{GS(th)}$	2.0 —	— 7.0	4.0 —	Vdc mV/°C
Static Drain–Source On–Resistance (V_{GS} = 10 Vdc, I_D = 12 Adc)	$R_{DS(on)}$	—	0.13	0.16	Ohm
Drain–Source On–Voltage (V_{GS} = 10 Vdc) (I_D = 24 Adc) (I_D = 12 Adc, T_J =125°C)	$V_{DS(on)}$	— —	— —	4.5 4.3	Vdc
Forward Transconductance (V_{DS} = 15 Vdc, I_D = 12 Adc)	g_{FS}	11	17	—	mhos

Al doilea set de date oferă un punct de operare. Mai exact, ni se spune că o tensiune de intrare (V_{GS} = 3 V) dă un curent de ieșire corespunzător (I_D = 6 A). Aceste valori ne permit să calculăm câștigul (transconductanța)

$$\text{Gain} = g_m = g_{FS} = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{6\text{ A} - 0\text{ A}}{3\text{ V} - 2.5\text{ V}} = \frac{6\text{ A}}{0.5\text{ V}} = 12$$

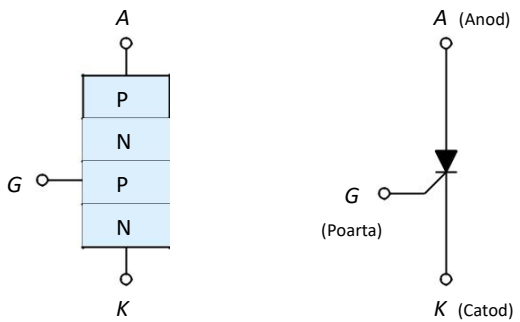
Valoarea de funcționare a g_{FS} = 12 este mai mare decât valoarea minimă a foii de specificație de 11, astfel încât FET-ul este OK.

4.4 REDRESOARE CONTROLATE CU SILICIU

Redresorul controlat cu siliciu (SCR) este un dispozitiv de control al puterii cu trei terminale care face parte dintr-un grup de semiconductori cunoscut sub numele de **tirisoare.** Tirisoarele sunt dispozitive semiconductoare cu patru straturi care se comportă ca un comutator; adică sunt fie conductoare, fie neconductoare (pornite sau oprite). Construit din patru straturi de material semiconductor (PNPN), așa cum se arată în figura 4.25 litera (a), SCR are trei terminale: **anodul** (A), **catodul** (K) și **poarta** (G), așa cum se arată în simbolul schematic [Figura 4.25 litera (b)].

SCR este de obicei conectat în serie cu sarcina, așa cum se arată în figura 4.26. Observați că acest circuit este similar cu un tranzistor sau un circuit FET. În acest caz, curentul de sarcină intră în anod și pleacă prin catod. Poarta este utilizată pentru a comuta SCR de la starea sa de ne-conducție (oprită) la starea de conducție (pornită). Din *păcate, poarta nu poate fi utilizată pentru a opri SCR,* așa cum va fi abordată mai târziu în această secțiune. De asemenea, curentul poate trece într-o singură direcție prin SCR (așa cum se întâmplă într-o diodă).

Cel mai bun mod de a explica funcționarea SCR este folosind curba caracteristică, care este prezentată în figura 4.27. Mai întâi determinăm care este tensiunea SCR-ului pe axa orizontală, iar curentul prin SCR este pe axa verticală. Partea stângă a graficului corespunde SCR fiind inversată,



(a) SCR construcție (b) SIMBOL SCHEMATIC SCR

Figura 4.25
Un redresor controlat cu siliciu.

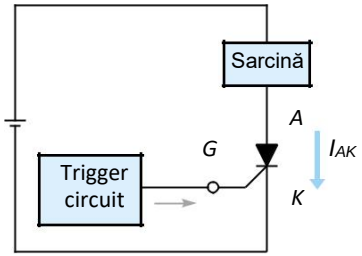


Figura 4.26
Circuitul SCR de bază.

ceea ce explică de ce nu există nici un flux de curent (până când are loc la o tensiune negativă ridicată). Acțiunea interesantă are loc pe jumătatea dreaptă a graficului, unde *linia ingroșată arată acțiunea SCR atunci când nu există tensiune de poartă*. Pe măsură ce tensiunea de peste SCR devine mai pozitivă, curentul este oprit până când tensiunea atinge o valoare cunoscută sub numele de tensiune de **întrerupere-înainte,** moment în care SCR intră în conducție și curentul începe să treacă (iar tensiunea de blocare se micșorează înapoi). SCR se află acum în regiunea de conducție **înainte** și acționează ca un comutator închis cu rezistență scăzută. Dacă curentul este acum redus sub valoarea cunoscută sub numele de **curentul de deținere** (I_H), SCR va reveni imediat la starea sa de neconductoare de înaltă rezistență.

Acum ne îndreptăm atenția către modul în care tensiunea porții afectează funcționarea SCR. Când tensiunea porții este V_{G1} (în Figura 4.27), tensiunea de rupere înainte este redusă semnificativ, adică SCR se va porni la o tensiune anodică mai mică (indicată de linia punctată). Dacă tensiunea porții este suficient de mare (numită V_{GT}), SCR începe să conducă imediat și nu necesită aproape nici un fel de tensiune de rupere înainte. Acesta este modul de activare pe care îl folosesc cele mai multe circuite practice SCR. Odată ce SCR începe să conducă, tensiunea porții poate fi îndepărtată, iar SCR va rămâne în stare de conducție. Prin urmare, în multe circuite SCR, semnalul porții este de fapt un puls scurt de "declanșare", suficient de lung pentru a se asigura că a avut loc comutarea.

Pornirea SCR cu poarta este relativ ușoară, dar oprirea acesteia este o altă problemă. ***Nu există nicio modalitate de a comanda SCR să se dezactiveze;*** singura modalitate de a-l dezactiva este

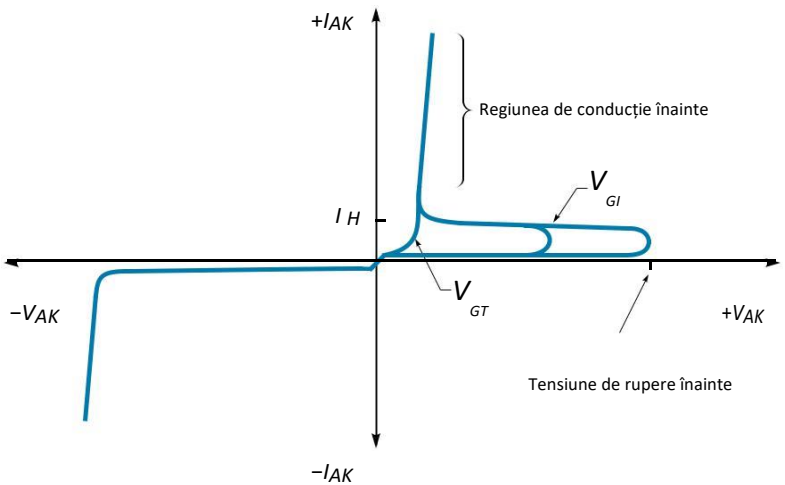


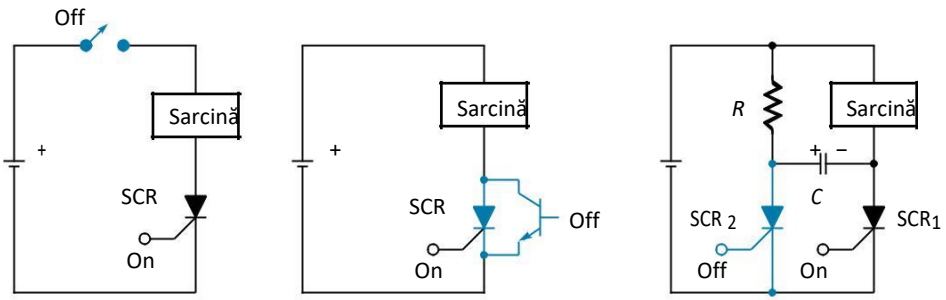
Figura 4.27
O curbă caracteristică SCR (probă).

de a reduce curentul de sarcină sub valoarea curentului de reținere (I_H). Pentru circuitele de curent continuu, acest lucru se poate face în mai multe moduri. Prima metodă, ilustrată în figura 4.28 litera (a), este de a deschide circuitul de încărcare cu un alt dispozitiv - să zicem, un comutator. A doua metodă, numită **comutare forțată,** implică forțarea momentană a tensiunii peste SCR (V_{AK}) la zero (sau mai jos), oprind astfel curentul. O modalitate de a face acest lucru este ilustrată în figura 4.28 (b), unde un "tranzistor de scurtcircuitare" redirecționează momentan curentul în jurul SCR. O altă modalitate este prezentată în Figura 4.28 (c) și utilizează un al doilea SCR_2 pentru a dezactiva SCR 1 principal. Circuitul funcționează după cum urmează: Când SCR principal 1 este pornit, tensiunea în volti pe anod este practic de 0 V; prin urmare, condensatorul *C* se poate încărca prin rezistor *R*. Pentru a opri SCR 1 principal, SCR_2 este declanșat în conducție care "trage în jos" tensiunea la capătul pozitiv (+) al *C* la 0 V, determinând temporar capătul negativ (–) al lui *C* să scadă, de asemenea. Tensiunea negativă de pe anodul SCR_1 o oprește. În cele din urmă, atunci când curentul de descărcare al condensatorului scade, SCR_2 se oprește de la sine.

Oprirea SCR pentru circuitele de curent alternativ nu este o problemă, deoarece se va opri în mod natural la fiecare jumătate de ciclu negativ (amintiți-vă, SCR poate comuta doar într-o singură direcție). Deci, pentru aplicațiile AC, SCR trebuie să fie declanșat o dată pentru fiecare jumătate de ciclu pozitiv, și apoi se va opri la sfârșitul ciclului pozitiv .

Deoarece SCR-urile funcționează atât de bine cu curentul alternativ, acestea sunt adesea folosite ca redresoare într-un convertor AC-to-DC - de exemplu, pentru a controla viteza unui motor de curent continuu. Un circuit simplu de control al vitezei este prezentat în figura 4.29 (a). După cum puteți vedea, tensiunea porții este asigurată printr-un potențiometru *R* și diodă *D*. Când nivelul tensiunii porții devine suficient de ridicat, SCR se aprinde și rămâne pornit pentru restul acelei jumătăți de ciclu pozitive. Prin creșterea rezistenței *lui R*, timpul în care SCR devine activ poate fi întârziat, provocând astfel o perioadă de conducție mai scurtă. Aceste pulsuri de putere sunt acoperite de o sarcină (cum ar fi un motor) într-o tensiune DC efectivă.

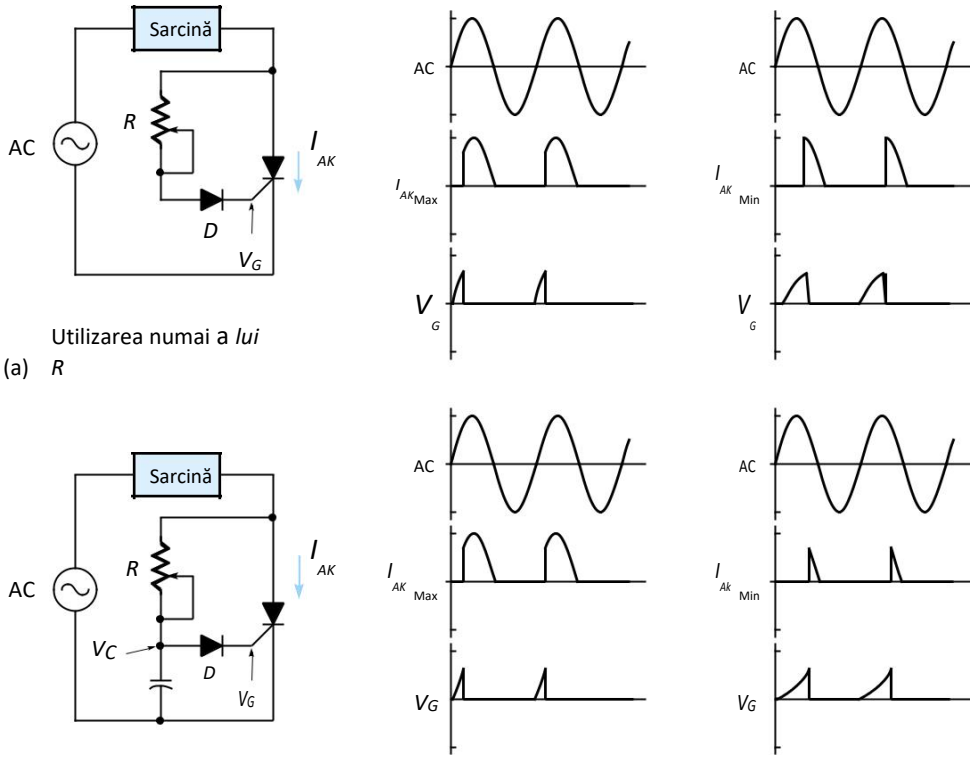
Circuitul descris mai sus poate controla doar timpul de declanșare de la 0 la 90° al undei sinusoidale. Pentru a întârzia punctul de declanșare peste 90°, un condensator poate fi adăugat la poarta circuitului așa cum se arată în figura 4.29 (b). Pe măsură ce condensatorul *C* se încarcă prin *R*, V_C rămâne în urmă (amintiți-vă, acest lucru se întâmplă pentru fiecare ciclu). Folosind acest circuit, cunoscut sub numele de circuit de control al fazei cu jumătate de *undă,* conducția SCR poate fi întârziată până la aproximativ 170°, rezultând un "la timp" atât de îngust încât echivalentul DC este practic de 0 V.



(a) Utilizarea unui comutator (b) Utilizarea unui tranzistor (c)Utilizarea unui al doilea SCR

Figura 4.28
Dezactivarea unui SCR pentru o sarcină DC.

Figura 4.29
Activarea unui SCR pentru o sarcină de curent alternativ. (a) Circuitul de declanșare utilizează doar un rezistor și (b) circuitul de declanșare utilizează un rezistor și un condensator.



(a) Utilizarea numai a *lui* *R*

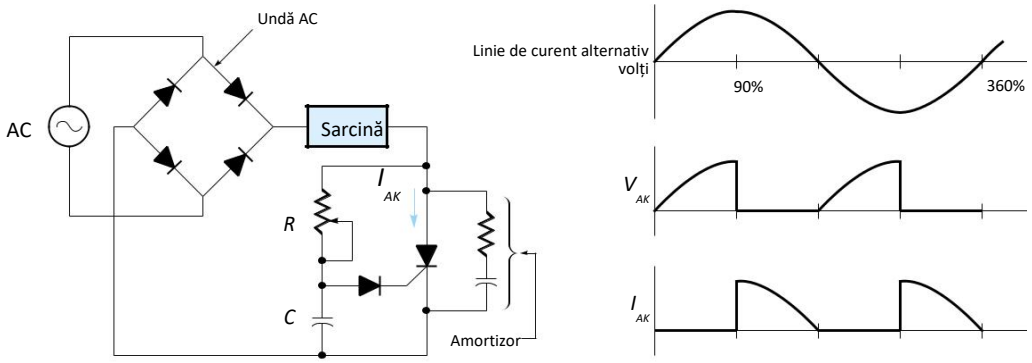
(b) Utilizarea *R* și *C*

Circuitele convertorului AC-DC descrise în ultimele două paragrafe sunt redresoare cu jumătate de undă, ceea ce înseamnă că se utilizează doar jumătate din puterea potențială de curent alternativ. SCR poate fi utilizat împreună cu un redresor cu undă completă pentru a utiliza mai mult din puterea de curent alternativ, oferind două impulsuri de putere pe ciclu. Un astfel de circuit este prezentat în Figura 4.30 și este cunoscut ca un *circuit de control al fazei cu undă completă*. Forma de undă (Figura 4.30) pentru curentul SCR (I_{AK}) descriu situația în care conducția începe la aproximativ 90°. Pe sistemele reale, tensiunea este mai ușor de măsurat decât curentul, deci este important să știți cum arată formele de undă de tensiune. Observați că în timpul conducerii tensiunea SCR (V_{AK}) este practic zero, iar atunci când SCR este oprit, se aplică întreaga tensiune a liniei.

Unele alte condiții (în afară de cele deja menționate) ar putea determina SCR să pornească:

1. Dacă tensiunea peste SCR (V_{AK}) se ridică prea repede, SCR se poate activa, chiar dacă tensiunea este sub tensiunea de întrerupere înainte. Acesta se numește **efectul dv/dt.** Pentru a elimina această posibilitate, circuitele **de amortizare** R_C sunt conectate peste SCR pentru a preveni creșterea prea rapidă a tensiunii (a se vedea figura 4.30).
2. După oprire, V_{AK} și I_H trebuie să fie ținute scăzute pentru o anumită perioadă de timp sau SCR se va activa din nou.
3. Pe măsură ce temperatura SCR crește, tensiunea de rupere necesară scade, determinând astfel ca SCR să pornească.

Figura 4.30
Un SCR redresor



4. Un alt tip de SCR, cunoscut sub numele de LASCR (SCR activat de lumină), utilizează energia luminoasă pentru a declanșa starea de conducție. Aceste dispozitive au o fereastră mică care permite luminii să ilumineze joncțiunea PN.

SCR-urile sunt disponibile într-o gamă largă de dimensiuni, cu capacități actuale de la 0,5 la peste 1000 A. O foaie de specificații a unor RST Motorola este prezentată în Figura 4.31. O explicație a parametrilor utilizați este după cum urmează:

V_{DRM}:tensiune de blocare a vârfului înainte
V_{RRM}:tensiune de blocare inversă de vârf
I_{TSM}: curent de supra tensiune de vârf
I_{GT}: curent de declanșare a porții, în DC
V_{GT}: tensiunede declanșare a porții, în DC

De exemplu, un 2N6401 (Figura 4.31, a șaptea coloană, al doilea rând) poate transporta 16 A curent de sarcina, trebuie utilizat cu tensiuni de alimentare sub 100 V_{varf} (+ sau –), poate avea curenți de sarcina la supratensiune scurta de pana la 160 A si necesita 30 mA de curent de poarta pentru a comuta în stare deschis, care poate fi realizat aplicând 1,5 V pe poarta.

EXEMPLUL 4.7

Un motor 15-A 120-Vdc trebuie să fie alimentat de pe un circuit SCR similar cu cel prezentat în Figura 4.30. Sursa de energie este de 120 Vac. Selectați un SCR din lista de la figura 4.31 pentru a alimenta motorul sus-arătat.

SOLUȚIE

Deși motorul este DC, acesta primește putere sub formă de impulsuri de ac stabilizat.
Putem calcula tensiunea de vârf după cum urmează:

$$V_{\text{peak}} = \frac{120\ \text{V}}{0.707} = 170\ \text{V}$$

15 amperi DC este echivalent cu 15 A_{RMS}, și deci având în vedere opțiunile disponibile, selectăm o unitate 16-A care poate duce 400 V. Un 2N6403 ar fi o alegere bună.

Figura 4.31
Fisa de specificatii pentru SCRs. (Copyright © Semiconductor Components Industries, LLC. Folosit cu permisiune.)

ON Semiconductor Selector Guide – Discrete Devices

Table 1. SCRs — General Purpose Plastic Packages (continued)

	On–State (RMS) Current									
	10 AMPS	12 AMPS				16 AMPS		25 AMPS		
	T_C = 75°C	T_C = 90°C	T_C = 75°C	T_C = 90°C	T_C = 80°C		T_C = 90°C	T_C = 80°C	T_C = 85°C	
	Sensitive Gate		Sensitive Gate		High Performance			High Performance		
V_{DRM} V_{RRM} (Volts)	Case 221A–07 TO–220AB Style 3	DPAK Case 369A–13 Style 4		Case 221A–07 TO–220AB Style 3	Case 221A–09 TO–220AB Style 3		Case 221A–07 TO–220AB Style 3	Case 221A–09 TO–220AB Style 3	Case 221A–07 TO–220AB Style 3	
50	—	—	—	*2N6394*	—	—	*2N6400*	—	*2N6504*	*MCR69–2*
100	—	—	—	*2N6395*	—	—	*2N6401*	—	*2N6505*	*MCR69–3*
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
400	*MCR12LD*(2)	—	—	*2N6397*	*MCR12D*(2)	—	*2N6403*	*MCR25D*(2)	*2N6507*	—
600	*MCR12LM*(2)	*MCR12DCM*(4)	*MCR12DSM*(4)	*2N6398*	*MCR12M*(2)	—	*2N6404*	*MCR25M*(2)	*2N6508*	—
800	*MCR12LN*(2)	*MCR12DCN*(4)	*MCR12DSN*(4)	*2N6399*	*MCR12N*(2)	*MCR16N*(2)	*2N6405*	*MCR25N*(2)	*2N6509*	—
Maximum Electrical Characteristics										
I_{TSM} (Amps) 60 Hz	100					150	160	300		750(7)
I_{GT} (mA)	8	20		30	20		30	30	40	30
I_{GT} (μA)			200							
V_{GT} (V)	1.5	1		1.5	2.2	1.7	1.5	1	1.5	
	Min.	Min. Typical	Min. Typical		Min.	Min.		Min.		
DV/DT V/μsec	50	50 200	2 10		50	50		50		
T_J Op Range (°C)	−40 to +100	−40 to +125	−40 to +110	−40 to +125						

(2) No Suffix: Shipped in rails
(4) T4 Suffix: 2500/reel
(5) Add –001 suffix for straight lead DPAK
(7) Peak capacitor discharge current for t_w = 1 ms. t_w is defined as five time constants of an exponentially decaying current pulse (crowbar applications).

4.5 TRIACUL

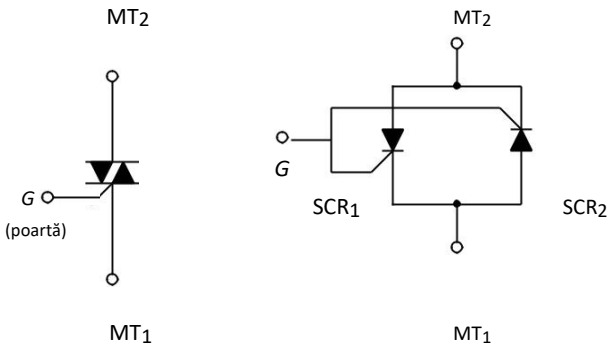
Triacul este un dispozitiv cu trei terminale care este similar cu SCR, cu excepția faptului că **triacul poate conduce curent în ambele direcții**. Utilizarea sa principală este de a controla puterea sarcinilor de curent alternativ, cum ar fi pornirea și oprirea motoarelor de curent alternativ sau crescând puterea pentru sistemele de iluminat și încălzire. După cum se indică pe simbolul schematic [Figura 4.32(a)], cele trei terminale sunt **MT_1,MT_2*** (terminale principale) și **poarta.** După cum sugerează și numele, curentul de sarcină trece prin terminalele principale, iar poarta controlează fluxul. Figura 4.32 litera (b) prezintă circuitul echivalent al triacului, care constă din două SCR back-to-back cu o poartă comună. Când MT_2 este mai pozitiv, curentul curge prin SCR_1; când MT_1 este mai pozitiv, curentul curge prin SCR_2.

Caracteristicile de funcționare ale triacului sunt cel mai bine explicate folosind curba caracteristică prezentată în figura 4.33. Observați că jumătatea dreaptă a curbei (în cadranul 1) arată la fel ca curba SCR; nu curge curent până când nu se atinge tensiunea de rupere sau se declanșează poarta (indicată prin linie punctată). Același model se repetă în Cadranul III (pentru tensiunea și curentul în direcția opusă). De asemenea, la fel ca SCR, odată ce triacul este declanșat, acesta va rămâne pornit până când curentul de încărcare scade sub valoarea curentă de reținere (I_H).

Un singur ciclu de AC are o jumătate pozitivă și o jumătate de ciclu negativă. *Triacul necesită un puls de declanșare la poartă pentru fiecare jumătate de ciclu* și funcționează cel mai bine în cazul în care este declanșat pozitiv pentru jumătate de ciclu pozitiv și negativ pentru jumătate de ciclu negativ (deși, în cele mai multe cazuri, triacul va declanșa, de asemenea, în cazul în care poarta merge negativ în jumătate de ciclu pozitiv și în cazul în care merge pozitiv în jumătate de ciclu negativ.).

Un triac poate fi folosit ca un comutator de compact on-off pentru sarcini de curent alternativ sau pentru a regla puterea la o sarcină de curent alternativ, cum ar fi un comutator de reglare (dimmer). Un circuit tipic de comutare dimmer este prezentat în figura 4.34. Acțiunea acestui circuit este similară cu cea a circuitului SCR din figura 4.29 (b). Pentru fiecare jumătate de ciclu, condensatorul C începe să se încarce prin rezistor R. Când tensiunea V_C devine suficient de mare, triacul se declanșează în conducție și rămâne așa pentru

Figura 4.32
Triac



(a) Simbolul triac (b) Circuit echivalent triac

---

*Uneori numit *anod 1* și *anod 2.*

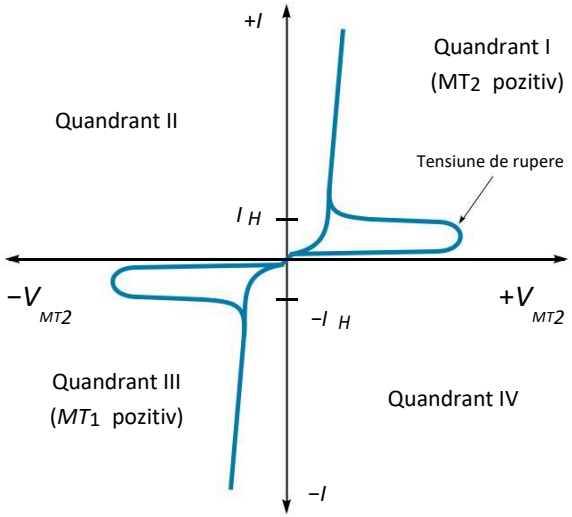


Figura 4.33
O curbă caracteristică triac.

restul ciclului. Prin schimbarea rezistenței în *R*, punctul de declanșare poate fi întârziat, reducând astfel puterea la sarcină.

Triacii sunt disponibili în diferite pachete, dintre care unele pot manipula curenți de până la 50 A (ceea ce este considerabil mai mic decât la SCR). Figura 4.35 prezintă o selecție eșantion de triaci. Urmează o explicație a specificațiilor.

V_{DRM}: tensiune maximă în afara stării permisă
I_{TSM}:curent maxim de supratensiune
I_{GT} și V_{GT}:curentul și tensiunea porții necesare pentru a declanșa triac în conducție

Cele mai frecvente două condiții de declanșare sunt MT2(+)G(+) și MT2(–)G(–), așa cum sunt utilizate în circuitul din figura 4.34.

Calcularea perioadelor de întârziere și de conducție

Figura 4.34
Un circuit de control al fazei folosind un triac (așa cum ar putea fi folosit pentru un comutator dimmer).

După cum am văzut în secțiunile precedente, circuitele de control al fazelor (folosind SCR-uri și triace) reglează puterea la sarcină prin pornirea pentru o parte a perioadei de ciclu. După cum se arată

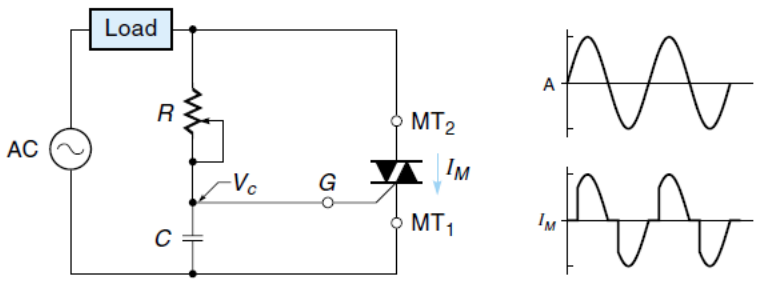
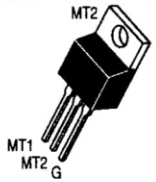


Figura 4.35
O selecție de triacs.

ON Semiconductor Selector Guide – Discrete Devices

Table 2. TRIACs (continued)

V_{DRM} (Volts)	On–State (RMS) Current		
	10 AMPS	12 AMPS	
	T_C = 70°C	T_C = 80°C	T_C = 85°C
			
	Case 221A–07 TO–220AB Style 4		
400	—	*MAC12HCD*(2)	—
600	*MAC210A8*	*MAC12HCM*(2)	*MAC212A8*
800	—	*MAC12HCN*(2)	*MAC212A10*
Maximum Electrical Characteristics			
I_{TSM} (Amps)	100		
I_{GT} @ 25°C (mA) MT2(+)G(+) MT2(+)G(–) MT2(–)G(–) MT2(–)G(+)	 50 50 50 75	 50 50 50 —	 50 50 50 75
V_{GT} @ 25°C (V) MT2(+)G(+) MT2(+)G(–) MT2(–)G(–) MT2(–)G(+)	 2 2 2 2.5	 1.5 1.5 1.5 —	 2 2 2 2.5
T_J Operating Range (°C)	–40 to +125		

(2) No Suffix: Shipped in rails

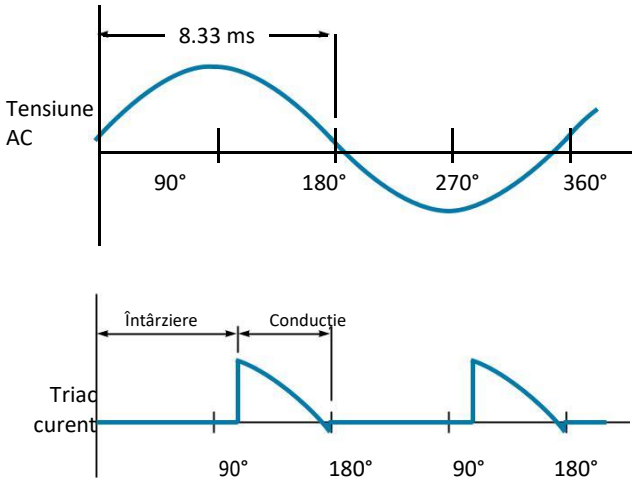


Figura 4.36
Întârziere și perioadele de conducție în SCR și triac

Undă.

în figura 4.36, pentru fiecare jumătate de ciclu, SCR (sau triac) întârzie pentru o perioadă de timp și apoi trece la conducție pentru restul ciclului. Perioada de întârziere și de conducție este exprimată în mod obișnuit în unități de timp sau ca unghi. Este util să puteți face conversii între aceste două măsurători.

În America de Nord, curentul alternativ are o frecvență de 60 Hz. Prin urmare, timpul pentru fiecare jumătate de ciclu este

$$0.5 \times \frac{1}{60\ \text{Hz}} = 8.33\ \text{ms}$$

Deci

$$\text{Timp de întârziere + timp de conducție = 8,33 ms} \tag{4.6}$$

De exemplu, dacă un SCR ar avea un timp de conducție de 3 ms, timpul de întârziere ar fi calculat după cum urmează: 8.33 ms – 3 ms = 5.33 ms.

Atunci când vorbim de unghiuri, amintiți-vă că fiecare jumătate de ciclu este de 180 °. Deci

$$\text{Unghi de întârziere + unghi de conducție = 180°} \tag{4.7}$$

De exemplu, dacă un triac a avut un unghi de întârziere de 30°, atunci

$$\text{Unghiul de conducție = 180° – 30° = 150°}$$

Conversia între măsurătorile de timp și unghi necesită cunoașterea relației dintre timp și grade. Pentru un sistem de 60 Hz, există 8,33 ms pe jumătate de ciclu de 180°. Deci

$$\frac{8.33\ \text{ms}}{180°} = 46.3\ \mu\text{s/deg}$$

$$46.3\ \mu\text{s} = 1\ \text{deg (for a 60-Hz system)} \tag{4.8}$$

De exemplu, dacă un triac are un unghi de conducție de 120°, am putea calcula timpul de conducție după cum urmează: 46,3 μs/deg × 120° = 5,56 ms.

EXEMPLUL 4.7

Pentru un sistem de 60 Hz, un anumit SCR întârzie 5 ms înainte de conducție.

(a) Găsiți timpul de conducție pentru acest SCR.

(b) Găsiți unghiul de conducție pentru acest SCR.

SOLUȚIE

(a) Pentru a găsi timpul de conducție, aplicăm ecuația 4.6:

Timp de întârziere + timp de conducție = 8,33 ms

Rearanjarea, obținem: timp de conducție = 8.33 ms - timp de întârziere

Și rezolvând ecuația rezultă că
Timp de conducție = 8.33 ms – 5 ms = 3.33 ms

Prin urmare, timpul de conducție este de 3,33 ms.

(b) Pentru a găsi unghiul de conducție, utilizați relația dintre ecuația 4.8 și timpul de conducție convertit cu unghiul de conducție. Pentru sistemele de 60 Hz,

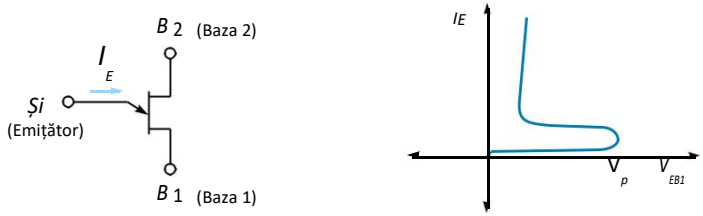
46,3 μs = 1 deg , deci factorul de conversie este 1deg/46,5 ms

Putem folosi acest factor de conversie pentru a converti timpul de conducție în unghiul de conducție.

Unghiul de conducție=3,33 msX1deg/46,3 microsX1000micros/1 ms=71,9 deg

4.6 DISPOZITIVE DE DECLANȘARE

Dispozitivele SCR și triac discutate în secțiunile anterioare necesită **circuite de declanșare** pentru a furniza semnalul de activare a porții. În mod ideal, acest semnal este un puls puternic livrat la momentul potrivit. Diverse dispozitive semiconductoare sunt deosebit de potrivite pentru a rezolva această problemă. Această secțiune oferă o scurtă introducere privind unele dintre cele mai comune dispozitive de declanșare. Pentru mai multe informații, consultați un curs de dispozitive semiconductoare.



(a) Simbolul UJT (b) curba caracteristică UJT (probă)

Figura 4.37
Tranzistor unijoncțiune (UJT).

Tranzistori unijoncțiune

Simbolul tranzistorului unijoncțiune (UJT) și curba caracteristică sunt prezentate în figura 4.37. Observați că are trei terminale: *baza 1* (B_1), baza *2* (B_2) și *emițătorul* (E). UJT funcționează după cum urmează: Pentru tensiuni scăzute pe emițătorul (V_{EB1}, nu există curent (I_E)). Odată ce V_{EB1} ajunge la V_P (care este de aproximativ două treimi din tensiunea dintre B_1 și B_2, tranzistorul se declanșează, iar curentul îi permis să treacă prin emițător și B_1. UJT-urile sunt adesea folosite pentru a declanșa SCR-uri, așa cum se arată în circuitul simplificat din figura 4.38. Pentru fiecare jumătate de ciclu pozitiv al ciclului, condensatorul C se încarcă prin R_1. Când V_C devine suficient de mare, UJT declanșează, iar curentul rezultat prin B_1 dezvoltă o tensiune mare peste R_2 și declanșează SCR.

Tranzistori unijuncțiune programabili

Tranzistorul unijoncțiune programabili (PUT) se comportă ca UJT, cu excepția faptului că tensiunea de declanșare este reglabilă printr-o rețea de rezistențe divizoare. Simbolul și circuitul de declanșare simplificat sunt prezentate în Figura 4.39. Observați că are trei terminale: **anodul** (A), **catodul** (K) și **poarta** (G). Ca și SCR, curentul principal de la A la K este oprit până când tensiunea anodului ajunge la V_P (tensiunea vârfului), moment în care este declanșat în conducție. Tensiunea DC de pe poartă determină ce tensiune va fi pe V_P. În circuitul prezentat în figura 4.39 (b), R_3 și R_4 formează un divizor rezistor care stabilește tensiunea în volți a porții și, prin urmare, punctul de declanșare. Restul circuitului este similar cu alte circuite de declanșare deja discutate.

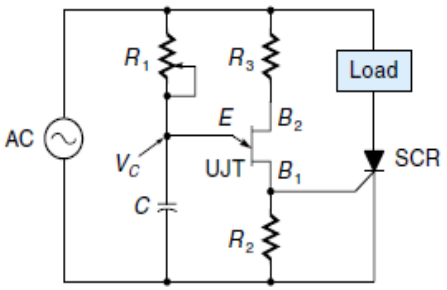
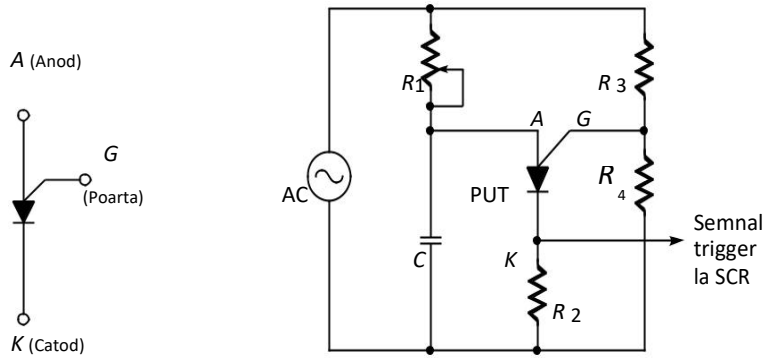


Figura 4.38
Utilizarea unui UJT pentru a declanșa un SCR.

Figura 4.39
Tranzistorul de unijoncțiune programabil (PUT).



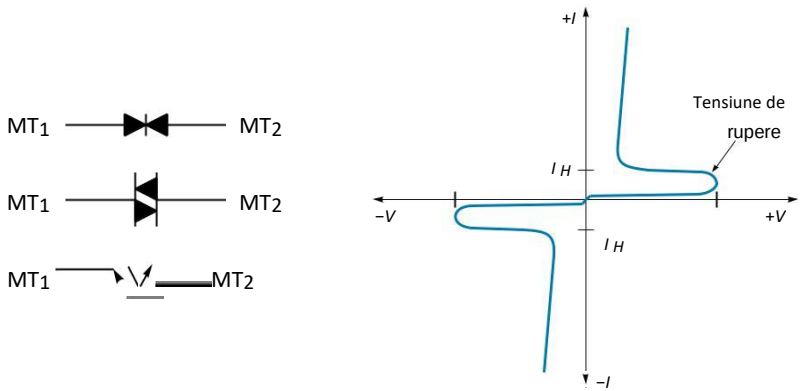
(a) Simbolul PUT

(b) Utilizarea unui PUT pentru a crea un semnal de declanșare

Diacul

Simbolul **diac** și curba caracteristică sunt prezentate în Figura 4.40 Este un dispozitiv bidirecțional cu două terminale și se comportă în esență ca un triac fără poartă. După cum indică curba, dacă tensiunea de peste diac depășește tensiunea de rupere (în oricare dintre direcții), aceasta se declanșează în modul de conducție și rămâne acolo până când curentul de sarcină scade sub curentul de reținere. Diacii sunt frecvent utilizați pentru a declanșa triaci în aplicațiile AC, așa cum se arată în circuitul simplificat din figura 4.41. Pe ciclul pozitiv al AC, condensatorul se va încărca prin *R*.. Când tensiunea V_C se ridică la tensiunea pozitivă de rupere a diacului, aceasta (diac-ul) se va declanșa în conducție, ceea ce va declanșa apoi triacul. Apoi, pe jumătatea de ciclu negativă a AC, condensatorul se va descărca prin *R*, iar când V_C scade la tensiunea negativă de rupere a diacului, diacul se va declanșa din nou în conducție, ceea ce va declanșa triacul. *Comutatorul bidirecțional cu siliciu* (SBS) este similar cu diacul, cu excepția faptului că se declanșează mai rapid și este mai stabil. În plus, SBS are un terminal de poartă care poate fi utilizat sau nu; dacă este utilizat, poate modifica tensiunea de rupere.

Figura 4.40
Diac.



(a) Simboluri diac

(b) Curbă caracteristică diac (eșantion)

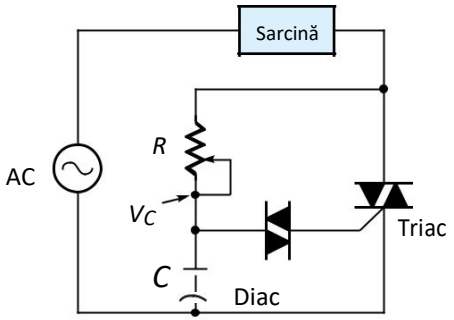


Figura 4.41
Folosind un diac pentru a declanșa un triac.

REZUMAT

Comutatoarele sunt contacte operate manual care se deschid și se închid. Sunt disponibile multe dimensiuni și stiluri de întrerupătoare, cele mai frecvente fiind comutarea, apăsarea, dip-ul, rotativul și membrana. Multe dintre aceste stiluri sunt disponibile cu mai multe configurații de contact.

Releul electromecanic tradițional (EMR) utilizează un electromagnet pentru a deschide și închide contactele electrice. Contactele releului sunt fie în mod normal deschise, fie normal închise, ceea ce se referă la starea lor ne-energizată. Ca și în cazul comutatoarelor, releele vin în mai multe dimensiuni și configurații de contact. Releele solid-state (SSRs) sunt circuite de comutare compacte ambalate astfel încât să poată fi utilizate în locul EMR-urilor în unele aplicații.

Tranzistorul bipolar de joncțiune (BJT) este un dispozitiv solid-state cu trei terminale care funcționează ca o supapă pentru a controla fluxul de curent printr-o sarcină (cum ar fi un motor). Tranzistorul este un amplificator de curent, ceea ce înseamnă că, curentul de sarcină va fi un multiplu al curentului de bază de intrare. Un alt tip de tranzistor, numit tranzistor cu efect de câmp (FET), efectuează aceeași sarcină ca și BJT, principala diferență fiind că (pentru FET) curentul de sarcină este o funcție a tensiunii porții de intrare.

Redresorul controlat cu siliciu (SCR) este un dispozitiv cu trei terminale, capabil să comute curenți de curent continuu foarte mari. SCR este ușor pornit cu un puls trigger (la terminalul porții sale); cu toate acestea, singura modalitate de a-l opri este prin reducerea curentului de încărcare la o valoare foarte scăzută. Oprirea SCR necesită circuite suplimentare pentru sarcini de curent continuu, dar nu este o problemă în aplicațiile de curent alternativ.

Un triac este un dispozitiv cu trei terminale, bistabil, solid-state capabil să comută curent AC. Triacul trebuie declanșat în conducție la fiecare jumătate de ciclu cu un circuit de declanșare. Prin întârzierea impulsurilor de declanșare, cantitatea de putere de încărcare poate fi redusă, ca într-un comutator de tip dimmer al unui circuit de iluminare.

Există o serie de dispozitive mai mici, solid-state care găsesc utilizări în declanșarea SCR-urilor și triacurilor. Exemple de astfel de dispozitive sunt tranzistorul de unijoncțiune (UJT), tranzistorul de unijoncțiune programabil (PUT) și diacul.

GLOSAR

anod Unul dintre cele trei terminale ale unui SCR și PUT.

bază Unul dintre cele trei terminale ale unui tranzistor.

circuit de comutare Partea unui circuit tranzistor care generează tensiunea de comutare înainte.

tranzistor cu joncțiune bipolară (BJT) dispozitiv solid-state care poate fi folosit ca un comutator sau amplificator.

BJT *A se vedea* **tranzistor cu joncțiune bipolară.**

catod Unul dintre cele trei terminale ale unui SCR și PUT.

operațiune de clasă A Modul în care un tranzistor este în conducție, astfel încât curentul colector este de aproximativ jumătate din valoarea sa maximă.

operațiune de clasă B Modul în care un tranzistor este în conducție, astfel încât curentul colector este doar pornit.

operațiune de clasă C Modul în care un tranzistor este în conducție și utilizat ca și comutator de pornire.

colector Unul dintre cele trei terminale ale unui tranzistor.

contactor Un releu de mare putere care comută puterea direct la motoare și mașini.

Darlington Un dispozitiv cu trei terminale (realizat din două tranzistoare) care se comportă ca un tranzistor cu o valoare foarte mare h_{FE}.

diac Un dispozitiv bistabil, cu două terminale, solid-state, care este utilizat pentru a declanșa un triac.

Comutator DIP Un set de switch-uri SPST încorporate în forma unui IC (DIP înseamnă pachet dual în linie).

comutator dublu-pol/dublu-aruncare (DPDT) O configurație de contact a comutatorului.

DPDT *A se vedea* **dublu-pol /dublu-aruncare**

comutator. **scurge unul** dintre cele trei terminale

într-un FET.

efect dv/dt Evenimentul când SCR se aprinde dacă tensiunea anod-catod se ridică prea repede.

releu electromecanic (EMR) Un dispozitiv care utilizează un electromagnet pentru a deschide sau închide contactele electrice.

emițător Unul dintre cele trei terminale ale unui tranzistor.

EMR *Vezi* **releu electromecanic.**

modul de îmbunătățire Proprietatea unor MOSFET-uri în cazul în care tensiunea porții poate fi întotdeauna pozitivă (pentru N-canal).

FET *A se vedea* **tranzistorul cu efect de câmp.**

tranzistor cu efect de câmp (FET) Un dispozitiv de amplificare în compacte cu trei terminale care utilizează tensiunea ca semnal de intrare.

comutare forțată Procesul de oprire a unui SCR prin forțarea momentană a tensiunii anod-catod la 0 V (sau mai jos).

tensiune de conducție înainte Tensiunea de bază offset DC necesară pentru a porni tranzistorul în conducție.

tensiune de rupere înainte Tensiunea peste un tiristor care îl determină să treacă în starea sa de conducție.

regiunea de conducție înainte Raza de operare a unui tiristor atunci când acesta conduce.

câștig curent înainte (h_{FE}) Câștigul unui tranzistor; curentul colector împărțit la curentul de bază.

Produs amplificare-lățime de bandă (f_T) O constantă pentru un amplificator care este produsul de câștig în buclă deschisă și frecvența; poate fi citit ca frecvența atunci când câștigul unui tranzistor a fost redus la 1.

poarta Unul dintre cele trei terminale într-o SCR, PUT, FET, și triac.

radiator O bucată de metal, eventual cu aripioare de răcire, folosită pentru a disipa căldura de la un dispozitiv semiconductor în aer.

curent de deținere (I_H) Curentul anod minim necesar pentru a menține tiristorul în stare de conducție.

releu hibrid solid-state Un dispozitiv care utilizează un releu reed pentru a activa un triac.

I_{DSS} Cel mai mare curent de scurgere posibil pentru un anumit JFET; apare atunci când tensiunea pe poartă este de 0 V.

JFET *A se vedea* **joncțiune FET. joncțiune**

FET Un tip de FET.

comutator limită Un comutator utilizat ca senzor de proximitate.

comutator cu membrană De obicei, o tastatură cu o membrană flexibilă deasupra.

semiconductor de oxid de metal FET (MOSFET) Un tip de FET.

microswitch Un mic comutator prin apăsare de buton cu o distanță foarte scurtă de aclanșare.

tensiune minimă de reținere Tensiune minimă necesară pentru a menține un releu activat.

comutator de contact momentan O poziție de comutare care este controlată cu arcuri.

MOSFET *A se vedea* **FET semiconductor de oxid de metal.**

MT_1 Unul dintre cele trei terminale ale unui triac.

MT_2 Unul dintre cele trei terminale ale unei triac.

deschis în mod normal (NU), în mod normal închis (NC) Starea de contact momentan pentru un comutator sau releu atunci când dispozitivul nu este activat.

NPN, PNP Cele două tipuri de bază de tranzistori, diferența fiind direcția de curentului și tensiunii în cadrul dispozitivului.

circuit de control al fazei Un circuit care poate întârzia conducția pentru o parte a ciclului de curent alternativ în scopul reducerii tensiunii medii de ieșire.

tranzistor de putere Un tranzistor conceput pentru a transporta un curent mare și a disipa o cantitate mare de căldură.

tranzistor unijoncțiune programabil (PUT) Un dispozitiv solid-state care îndeplinește aceeași funcție ca un UJT, cu excepția faptului că tensiunea de declanșare este reglabilă.

pull-in curent Curent minim necesar pentru a activa un releu.

tensiune de declanșare Tensiune minimă necesară pentru a activa un releu.

comutator prin apăsare de buton Un comutator momentan activat prin

apăsare.

PUT *A se vedea* **tranzistor unijunction programabil.**

releu reed Un releu mic cu contacte sigilate într-un tub și activate de un câmp magnetic.

comutator rotativ Un buton rotativ care activează diferite contacte de comutare.

SCR *Vezi* **redresor cu siliciu controlat.**

curent sigilat curent necesar pentru a menține un releu energizat.

pol umbrit Un mic inel metalic în jurul capătului polului electromagnetic al unui releu AC, în scopul de a elimina "zumzet-ul" releului la 60 Hz.

redresor controlat cu siliciu (SCR) Un dispozitiv bistabil, cu trei terminale, semiconductor, utilizat pentru a comuta puterea la o sarcină.

comutator cu un singur pol/dublu-aruncare (SPDT) O configurație de contact a

comutatorului.

comutator cu un singur pol/o singură aruncare (SPST) O configurație de contact a

comutatorului.

comutator diapozitiv Similar cu un comutator , cu excepția slide-urilor de ghidaj înainte și

înapoi.

snubber Un circuit care împiedică o creștere rapidă a tensiunii peste o SCR, cu scopul de a-l împiedica să conducă fals.

releu solid-state (SSR) Un dispozitiv de comutare compact utilizat ca releu.

sursă Unul dintre cele trei terminale într-un FET.

SPDT *A se vedea* **comutatorul cu un singur pol/dublu-aruncare.**

SPST *A se vedea* **comutatorul cu un singur pol/o singură aruncare.**

SSR *A se vedea* **releu solid-state.**

plăcuță de comutare Parte a unui comutator rotativ.

comutator în trei poziții Comutați cu o poziție centrală.

comutator thumbwheel Switch care rotește un tambur pentru a selecta datele numerice.

tiristor O clasă de dispozitive semiconductoare cu patru straturi (cum ar fi PNPN) care sunt bistable;.

comutator Un dispozitiv acționat manual care conectează sau deconectează alimentarea.

transconductanță (g_m) Câștigul unui FET, care este schimbarea curentului de scurgere împărțită la schimbarea tensiunii porții.

triac Un dispozitiv bistabil, cu trei terminale, solid-state care comută puterea.

circuit de declanșare Un circuit utilizat pentru a genera pulsul de activare pentru un SCR sau un triac.

comutator în două poziții Comutator de glisare cu două poziții.

UJT *A se vedea* **tranzistorul unijunction.**

tranzistor unijonctiune (UJT) Un dispozitiv bistable, cu trei terminale solid-state care declanșează un SCR.

$V_{GS(off)}$ Tensiunea porții necesară pentru a opri curentul de scurgere (pentru un JFET).

ștergător Centrul și/ sau contactul mobil într-un comutator.

comutare de tensiune zero Ca aplicat la SSRs, întârzie în comutarea până când tensiunea AC traversează punctul zero.

EXERCIŢII

Secțiunea 4.1

1. Desenați simbolul unui comutator dpdt și explicați cum funcționează.
2. Desenați simbolul comutatorului 1SCY191 (tabelul 4.1) și explicați modul în care funcționează.
3. Desenați simbolul comutatorului 2SHX191 (tabelul 4.1) și explicați modul în care funcționează.
4. Pentru un comutator rotativ, desenați o imagine a configurației de contact pentru un comutator cu un singur pol/patru aruncări (terminalul C intră în contact cu unul dintre cele patru terminale).

Secțiunea 4.2

5. Desenați simbolul schematic al unui releu DPDT și explicați cum funcționează.

6. Desenați simbolul schematic pentru releul Y4-V52 (tabelul 4.2).

7. Pentru releu Y4-V52 (Tabelul 4.2), care sunt specificațiile de tensiune și curent pentru bobină și contacte?

8. Pentru releul Y6-V430 (Tabelul 4.2), care sunt specificațiile de tensiune și curent pentru bobină și contacte?

9. Din lista de relee (tabelul 4.2), selectați un model care să fie utilizat pe un automobil pentru a porni un mic motor (1,5 A).

10. Enumerați avantajele și dezavantajele unui SSR versus un EMR.

Secțiunea 4.3

11. Un tranzistor are un câștig curent de 60 și un curent colector de 5 A. Găsiți curentul de bază.

12. Un tranzistor are un câștig curent de 40 și un curent de bază de 25 mA. Găsiți curentul colector.

13. Să se calculează curenții emițători exacți și aproximativi pentru tranzistorul descris în exercițiul 12.

14. Un tranzistor cu un câștig de 35 are o curbă de intrare similară cu cea prezentată în figura 4.16. Tensiunea de bază (V_{BE}) se măsoară la 0,8 V.

a. Găsiți curentul de bază.

b. Găsiți curentul colector.

15. Pentru circuitul tranzistorului prezentat în figura 4.19, se calculează I_C dacă rezistorul R_1 este schimbat la 1,3 kΩ. (Să presupunem că se aplică curba de intrare Figura 4.16.)

16. Pentru circuitul tranzistorului prezentat în figura 4.19, se calculează I_C dacă rezistorul R_2 este schimbat la 120 kΩ. (Să presupunem că se aplică curba de intrare Figura 4.16.)

17. În ceea ce privește amplificatoarele tranzistorului, explicați diferența dintre operațiile de clasă A, clasa B și clasa C.

18. Un tranzistor de putere de 100 W funcționează la o temperatură de 60 °C. Care este capacitatea reală de alimentare? (Să presupunem o rată de 0,57 W/°C peste 25°C.)

19. Selectați un tranzistor non-darlington din lista din Figura 4.21 pentru a îndeplini cel puțin următoarele specificații: Curent de încărcare = 5 A, disipare a puterii = 60 W și câștig minimum = 15.

20. Desenați un circuit de serie simplu în care un FET este utilizat pentru a controla puterea la o sarcină

și să explice cum funcționează. Includeți în explicația dumneavoastră termenii *tensiune poartă*, curent sursă *de scurgere* și g_m.

21. Enumerați diferențele dintre un *JFET* și un *MOSFET*.

22. Pentru circuitul FET prezentat în figura 4.23, găsiți curentul de sarcină dacă tensiunea porții este de 6,5 V.

23. Un circuit utilizează MTW24N40E MOSFET (Figura 4.24) și are o tensiune de poartă (V_{GS}) de 5 V. Găsiți curentul de scurgere minim și maxim care ar putea fi așteptat în acest circuit. (Să presupunem că g_m = 12 mohm.)

Secțiunea 4.4

24. Pentru un SCR, schițați curba caracteristică și utilizați-o pentru a explica modul în care funcționează dispozitivul.

25. Enumerați cele trei moduri de a dezactiva o SCR (pentru un circuit DC).

26. Explicați de ce oprirea SCR nu este o problemă în circuitele de curent alternativ.

27. Pentru un circuit de control al fazei cu jumătate de undă, desenați formele de undă pentru I_{AK} și V_{AK} dacă SCR începe să conducă la 45°.

28. Pentru un circuit de control al fazei cu undă completă, desenați formele de undă pentru I_{AK} și V_{AK} dacă SCR începe să conducă la 135°.

29. Selectați un SCR din lista din Figura 4.31 pentru a îndeplini următoarele specificații: Curent de încărcare = 11 A și tensiune de încărcare = 240 Vac. Care este tensiunea de declanșare necesară pentru SCR-ul selectat?

Secțiunea 4.5

30. Schițați curba caracteristică pentru triac și utilizați-o pentru a explica funcționarea dispozitivului.

31. Desenați forma de undă de ieșire (I_m) pentru un circuit triac care se declanșează la 60°.

32. Selectați un triac din selecția dată în Figura 4.35 pentru a îndeplini următoarele specificații: Curent de încărcare = 8 A și tensiune de încărcare = 120 Vac. Care este tensiunea de declanșare necesară pentru triac selectat?

33. Pentru un sistem de 60 Hz, un triac are un timp de conducție de 2 ms. Găsiți timpul de întârziere.

34. Pentru un sistem de 60 Hz, un triac are un unghi de conducție de 45°. Găsiți unghiul de întârziere.

35. Pentru un sistem de 60 Hz, un triac are un timp de întârziere de 3,52 ms. Găsiți timpul de conducție.

36. Pentru un sistem de 60 Hz, un triac are un unghi de conducție de 85°. Găsiți timpul de conducție.

Secțiunea 4.6

37. Care este funcția R_1 în circuitul UJT din Figura 4.38?

38. Care este scopul R_3 și R_4 în circuitul PUT din figura 4.39?

39. Explicați modul în care diacul declanșează triacul în circuitul din figura 4.41.