

Laboratorul 3.

Comutarea tranzistorului.

1 Scopul lucrării

Lucrarea presupune studiul comutării unui tranzistor bipolar între regiunile de blocare și saturație.

Măsurând timpii de comutație în diverse situații, se vor trage concluzii privind influența circuitului de comandă, respectiv a sarcinii de pe ieșire, asupra vitezei de comutație. Se vor studia câteva moduri în care se poate accelera comutarea tranzistorului, notându-se eventualele dezavantaje ale acestora.

Un scop secundar este familiarizarea cu unele funcționalități avansate ale softului de simulare, cum ar fi realizarea de măsurători integrale și simulările cu variația parametrilor.

2 Noțiuni teoretice

2.1 Introducere

Schemele cu tranzistoare se proiectează în general având în vedere regimul de amplificator (numit și regim linear), specific circuitelor analogice, respectiv regimul de comutator, specific circuitelor digitale. Pentru tranzistorul bipolar, regimul de amplificator implică funcționarea în regiunea activă normală (RAN), unde în general o variație a intrării cauzează o variație proporțională a ieșirii. În regimul de comutator, tranzistorul trece relativ rapid între două puncte de funcționare (comută), aflate de obicei în regiuni diferite. Spre exemplu, putem vorbi de comutarea din blocare în saturație, cu o trecere rapidă prin regiunea activă normală.

Tranzistoarele utilizate în regim de comutație au numeroase aplicații practice:

- în realizarea de porți logice: formează cele două nivele de tensiune pe ieșire corespunzând celor două stări logice;
- în realizarea de circuite de adaptare (repetoare de stare logică¹, adaptoare de nivel logic²);
- în realizarea de multiplexoare: elemente de comutație ce selectează un semnal analogic sau digital din mai multe disponibile;
- în realizarea de circuite de putere³.

¹en. - buffers

²en. - level shifters

³en. - drivers

În ceea ce privește aplicațiile digitale, un aspect important este viteza de comutație, întrucât un timp mai redus de comutație implică posibilitatea prelucrării sau transferului unei cantități mai mari de date într-un timp dat.

Lucrarea are în vedere comutarea unui tranzistor având emitorul la masă, comanda pe bază și o sarcină rezistivă în colector, pornind de la Figura 1a:

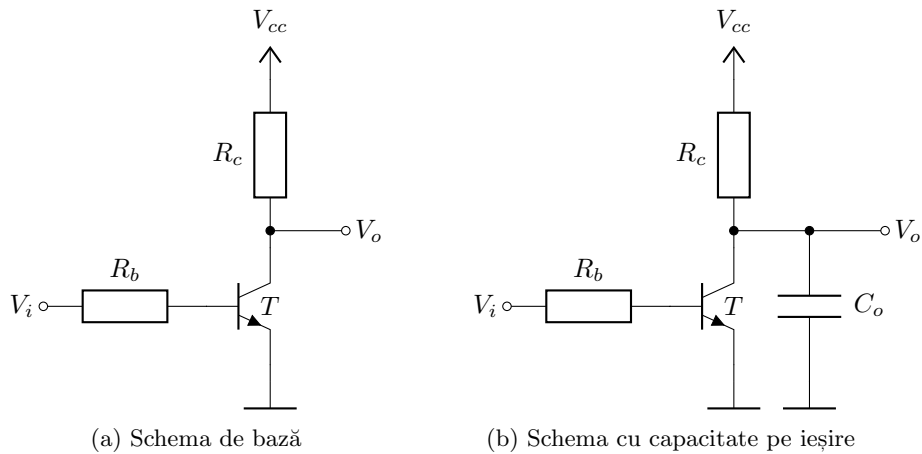


Figura 1: Scheme pentru studiul comutării tranzistorului

Privind schema ca pe o poartă logică, cele două stări logice trebuie reprezentate pe ieșire printr-o valoare mică, respectiv o valoare mare a tensiunii de ieșire. Acestea se realizează conform cu Figura 2: când tranzistorul este blocat, ieșirea ”vede” tensiunea de alimentare prin rezistența de colector, putând în principiu furniza curent; când tranzistorul este saturat, acesta ”trage” ieșirea spre masă, putând în principiu absorbi curent. Spunem că rezistența ”trage” ieșirea în sus (pull-up) iar tranzistorul în jos (pull-down).

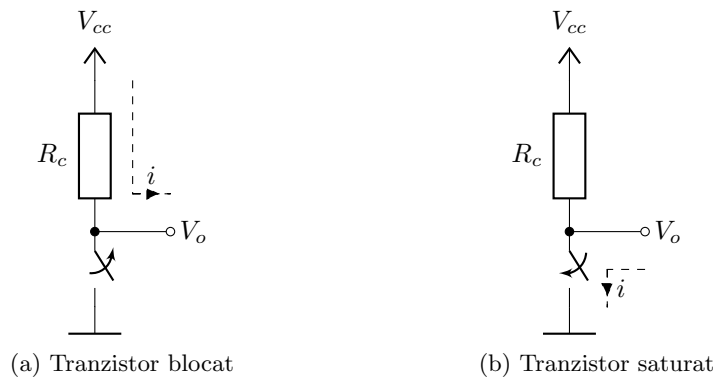


Figura 2: Aproximație simplă a comportării tranzistorului în regim de comutator

În practică ieșirea se măsoară cu un osciloscop, a cărui intrare manifestă o rezistență de valoare mare ($1M\Omega$) față de masă, având un efect neglijabil în această aplicație. Pe lângă aceasta, osciloscopul (ca dealtfel orice instrument)

are și o capacitate de intrare. Această capacitate formează un circuit R-C împreună cu rezistența din colector, încetinind comutația. De asemenea, dacă ieșirea circuitului este conectată la intrările în alte dispozitive (în cadrul unui sistem mai mare), aceste intrări vor avea un caracter capacitiv. Traseele sau cablurile de legătură au de asemenea o capacitate specifică. Aceste capacități au valori relativ mici (zeci...sute de pF), astfel că efectul lor va fi vizibil doar la frecvențe mari sau în regim de comutație. Ele sunt modelate în Figura 1b prin condensatorul C_o montat pe ieșire.

Figura 3 reprezintă procesul de încărcare (Figura 3a) respectiv descărcare (Figura 3b) a capacității prezente pe ieșire.

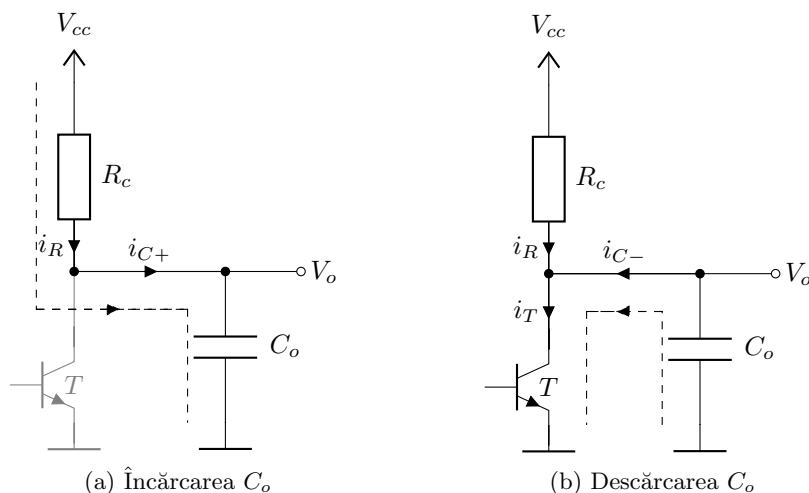


Figura 3: Încărcarea și descărcarea capacității de pe ieșire

Când tranzistorul comută în starea de blocare, condensatorul se încarcă prin rezistența de colector. Acest proces se desfășoară în mod pasiv, întrucât tranzistorul nu participă la încărcarea condensatorului (fiind blocat).

Când tranzistorul se deschide, acesta descarcă în mod activ condensatorul, pe calea reprezentată cu linie punctată în Figura 3b. Ținând cont de faptul că tensiunea de ieșire este identică cu tensiunea la bornele condensatorului și totodată cu tensiunea colector-emitor a tranzistorului, se observă că atâta vreme cât condensatorul nu s-a terminat de descărcat, tranzistorul este în RAN (având tensiune pozitivă între colector și emitor), urmând să intre în saturație abia când condensatorul s-a terminat de descărcat (rezultând o tensiune mică între colector și emitor).

În saturație, curentul prin tranzistor este același cu cel prin rezistență. Curentul prin condensatorul descărcat este zero. Astfel, avem $i_T = i_R = V_{cc}/R_c$. Pentru a putea intra în saturație, tranzistorul primește pe bază o "supracomandă", astfel încât $\beta i_B > V_{cc}/R_c$. La saturație, curentul prin colectorul tranzistorului este limitat la valoarea V_{cc}/R_c , nemaiputând să urmărească curentul de bază (cum o face în RAN, unde $i_T = \beta i_B$). Concluzionăm că, dacă circuitul este proiectat astfel încât tranzistorul să intre în saturație, vom avea pe durata comutației (când tranzistorul este în RAN) un curent în colector mai mare decât V_{cc}/R_c . Aceasta înseamnă că descărcarea condensatorului se va face la un curent

mai mare decât încărcarea, deci se va produce mai rapid - ilustrând caracterul activ al comutației.

Se constată că la deschiderea tranzistorului spre saturație, comutația este cu atât mai rapidă cu cât acesta primește o supracomandă mai mare, deoarece condensatorul va fi descărcat cu un curent mai mare (mai rapid). Creșterea curentului de bază se poate realiza prin mai multe mijloace: permanent (prin reducerea rezistenței din bază sau prin mărirea tensiunii de comandă) sau temporar (prin plasarea unei capacități de accelerare în paralel cu rezistența din bază).

Conform teoriei circuitelor R-C, mărirea rezistenței din colector sau a capacității de ieșire duce la mărirea timpilor de comutație. Reducerea rezistenței de colector în ideea accelerării comutației are dezavantajul creșterii curentului consumat de la sursa de alimentare. Reducerea capacității se poate realiza în situații practice prin:

- Reducerea fan-out-ului ieșirii (conectarea acestuia la un număr mai mic de intrări).
- Introducerea unui etaj de adaptare (buffer / driver) între ieșire și intrările ce manifestă capacitatea.
- Modificarea soluției tehnice - spre exemplu, la nivel de circuit integrat vorbim de miniaturizare - reducerea dimensiunilor pieselor duce la reducerea capacităților.

Pe lângă întârzierile date de efectele R-C, tranzistorul bipolar manifestă niște întârzieri proprii, cauzate de dinamica sarcinii electrice din interiorul acestuia. Cel mai vizibil se manifestă timpul de stocare, care apare la ieșirea tranzistorului din saturație, fiind asociat cu golirea bazei de sarcina suplimentară stocată în urma supracomenzii primite de tranzistor cât timp a stat în saturație. Pentru a accelera evacuarea sarcinii din bază, se poate utiliza o sursă negativă de tensiune, o rezistență mică în bază, un condensator de accelerare etc. O soluție elegantă o reprezintă introducerea unei diode Schottky între bază și colector. Aceasta se va deschide când tensiunea de ieșire coboară aproape de zero, redirectionând curentul de comandă din bază spre colector, menținând tranzistorul aproape de regiunea de saturație dar fără a permite intrarea efectivă în saturație. Se păstrează astfel beneficiile comutării directe cu supracomandă dar nu mai apare timpul de stocare la comutarea inversă.

În aplicații de comandă a efectorilor (relee, motoare etc.) tranzistorul trebuie să comute curent printr-o sarcină inductivă. Aici apare în mod deosebit problema autoinducției, manifestată prin apariția unui vârf de tensiune la oprirea bruscă a curentului prin inductanță, conform formulei $u_L = L di/dt$. În practică aceste vârfuri trebuie limitate prin intermediul unor diode sau grupuri RC.

3 Desfășurarea lucrării

3.1 Desenarea schemei de bază

Se realizează în programul de simulare schema:

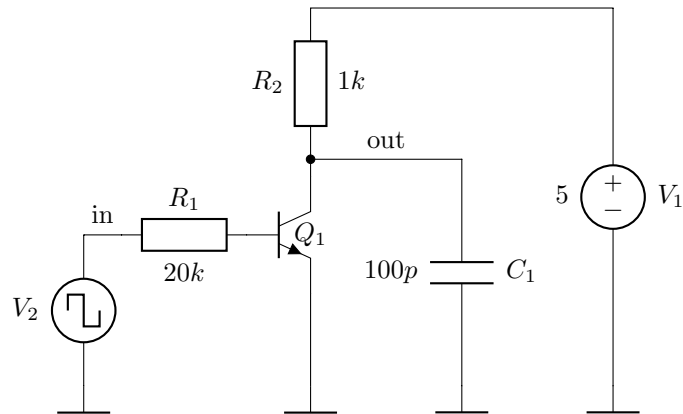


Figura 4: Descărcarea C_o

Pentru a realiza schema, puteți folosi următoarele scurtături:

Keyboard shortcuts	Role
F2	Add component
F3	Add wire
F4	Add label
F9	Undo
G	Add GND connection
R	Add resistor
C	Add capacitor
L	Add inductor
Ctrl+R	Rotate
Ctrl+E	Mirror

Pentru Q_1 alegeți un model matematic detaliat, cum ar fi cel pentru **BC547B**. Modelul generic ("NPN") neglijează multe aspecte ale comportării unui tranzistor real.

Pentru V_2 folosiți o sursă de semnal (în fereastra de "Add Component" căutați componenta de tip "signal"). Configurați sursa de semnal să genereze pulsuri dreptunghiulare, cu următorii parametri:

- V initial: 0
- V on: 5
- T delay: 0
- T rise: 10ns
- T fall: 10ns
- T on: 2u
- T period: 4u

Observație: Programul de simulare interpretează corect valorile parametrilor fizici, chiar dacă aceștia sunt dați într-o notație prescurtată.

Exemple:

- 20k în loc de 20000;
- 4k7 în loc de 4700;
- 10u în loc de 10^{-8} .

Porniți o simulare de regim tranzitoriu, cu durata simulată de 10 microsecunde (**.tran 10u**).

Duratele impulsurilor vor fi ajustate astfel încât pe graficul ieșirii să se observe desfășurarea fenomenelor tranzitorii și acestea să aibă timp să se stabilizeze, ca în Figura 5.

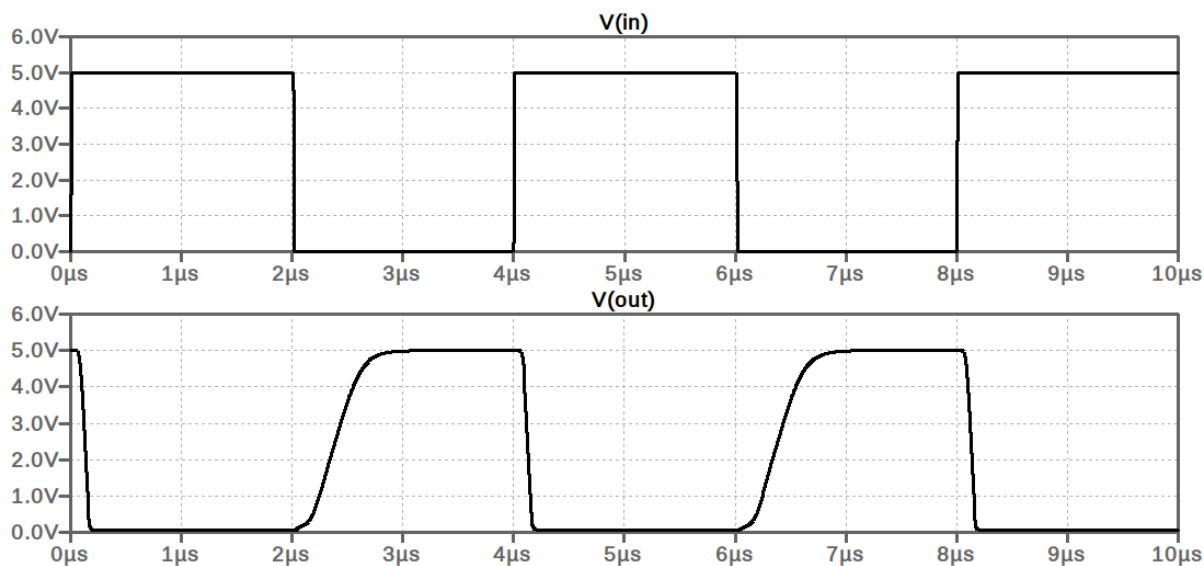


Figura 5

3.2 Parametrii semnalului de ieșire

Măsurati timpul de creștere (t_{cr}) și timpul de cădere (t_{cd}) pentru semnalul de ieșire.

Timpii de creștere și de cădere se măsoară între momentele când tensiunea de ieșire trece prin reperele de 10%, respectiv 90% din amplitudinea comutației. Veți vedea Figura 6 și Figura 7.

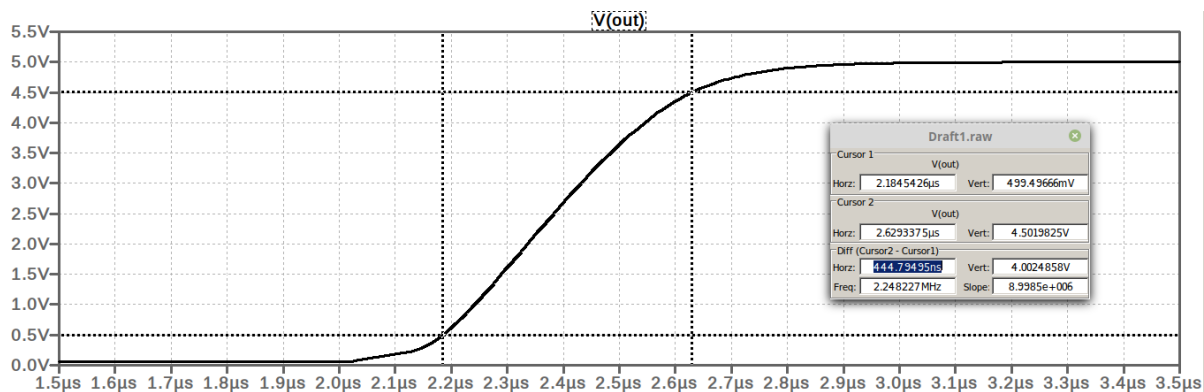


Figura 6

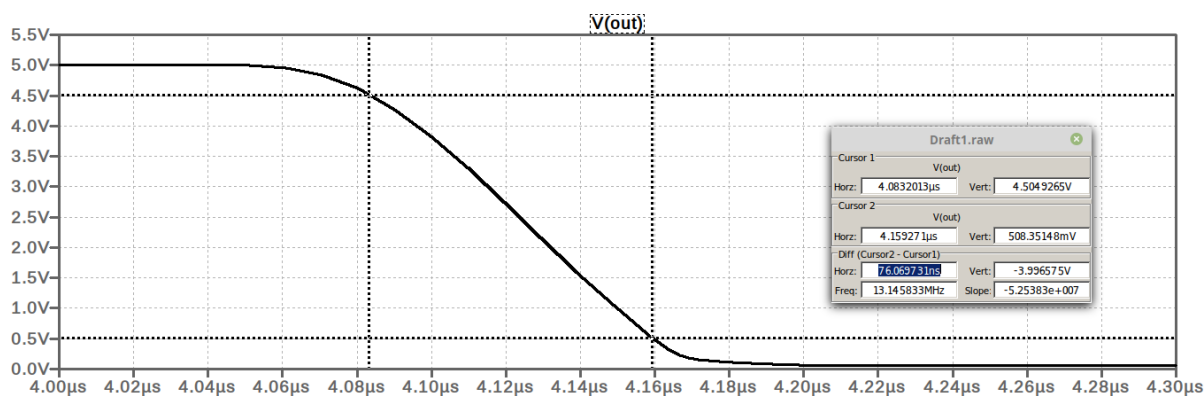


Figura 7

3.3 Măsurarea timpului de stocare

Se măsoară timpul de stocare al tranzistorului (t_s). În acest sens, se vor observa formele de undă pentru tensiunea de pe baza tranzistorului, curentul de bază și curentul de colector, ca în Figura 8.

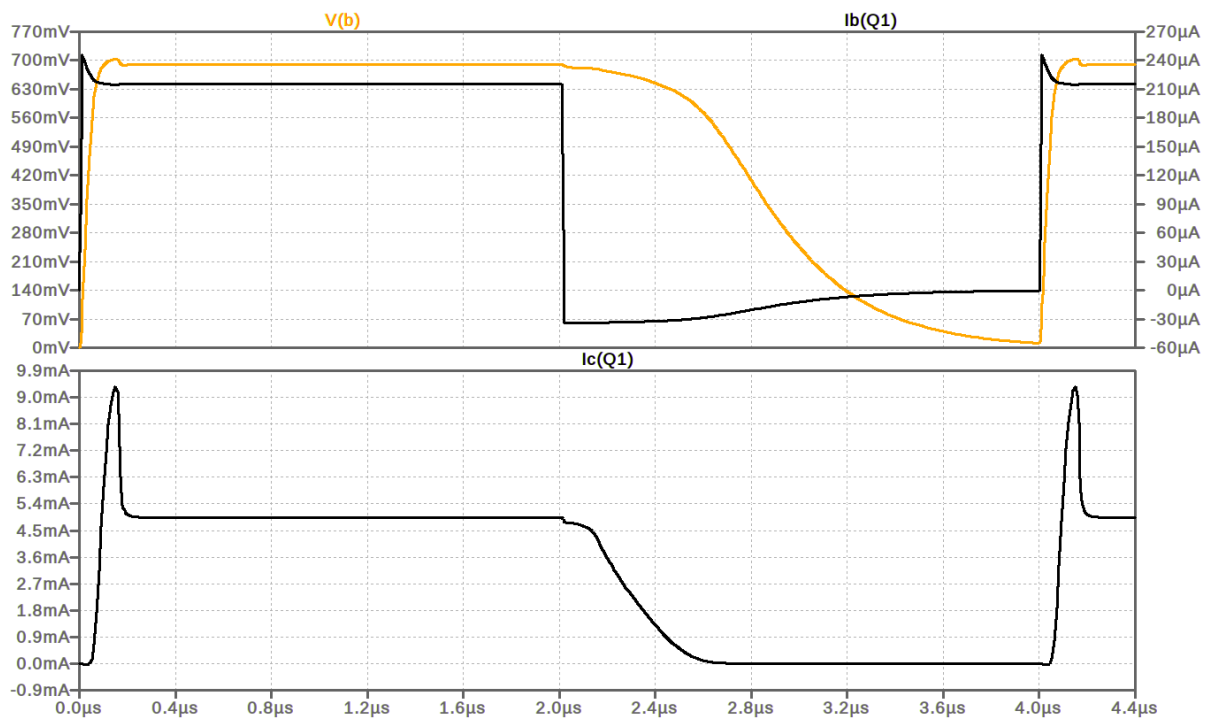


Figura 8

Se constată că, la momentul $2\mu\text{s}$ al simulării, generatorul de semnal comandă blocarea tranzistorului prin căderea tensiunii de intrare la zero. Cu toate acestea, tensiunea de pe bază nu coboară imediat la zero, datorită stocării de sarcină electrică. Se observă că, atât timp cât tensiunea pe bază este încă mare, nici curentul de colector nu scade semnificativ. Mai mult, curentul de bază are o valoare negativă, întrucât sarcina din bază se descarcă prin generatorul de semnal. Timpul de stocare se poate măsura din momentul când intrarea comută în zero până când ieșirea începe să crească cu o pantă semnificativă, ca în Figura 9.

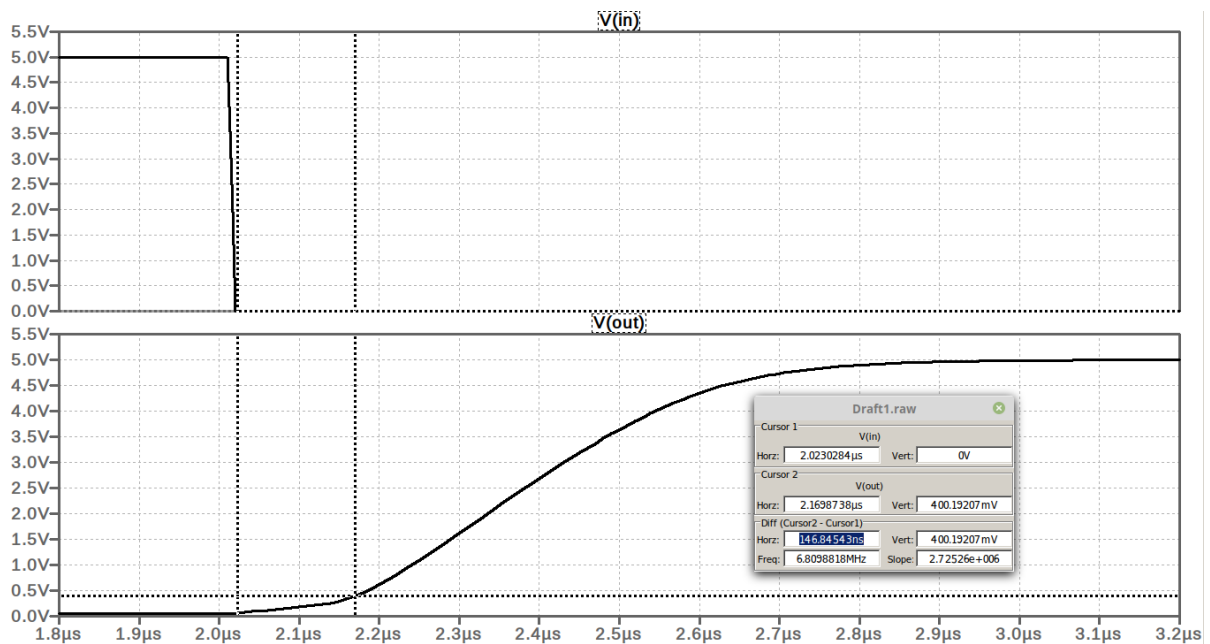


Figura 9

Observație: Timpul de stocare se poate măsura la fel de bine și pe graficul curentului de colector din figura de mai sus. Pe același grafic se observă cum la comutarea directă tranzistorul furnizează un vârf de curent în condensator, determinând o comutare mai rapidă decât cea inversă.

3.4 Influența rezistenței de bază

Se studiază influența rezistenței de bază asupra timpilor de comutație. În acest scop se va utiliza facilitatea de simulare parametrizată. Se va introduce o directivă de simulare pas-cu-pas, cu variația unui parametru (`.step param`).

Aceasta are sintaxa:

```
.step param denumire_parametru list valoare1 valoare2 ...
```

Pentru a asocia parametrul variat cu valoarea unei piese, această valoare va fi specificată ca numele parametrului între acolade, sub forma `{denumire_parametru}`.

Sugestie:

```
.step param Rb list 1k 2k 5k 10k 20k 50k 100k
```

Circuitul simulat va arăta ca în Figura 10.

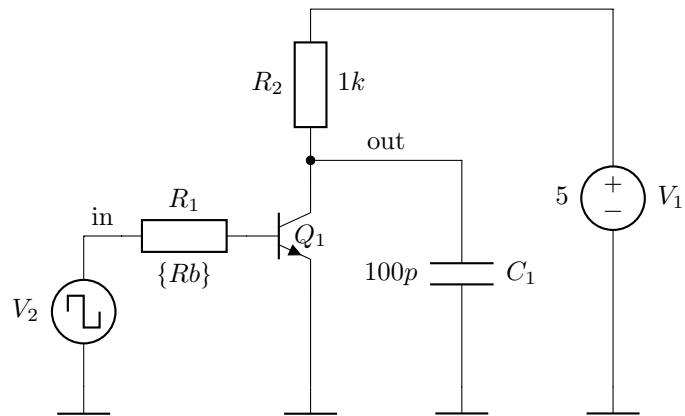


Figura 10

Se reține graficul rezultat, notând cum variază timpii cu valoarea rezistenței (cresc, scad, rămân aproximativ constanți?). Exemplu:

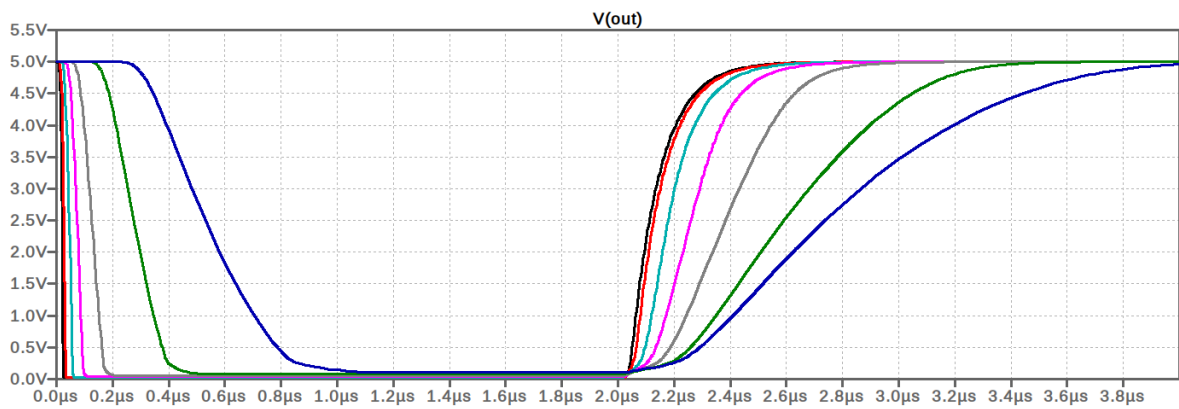


Figura 11

Se observă o comportare diferită la valori mici, respectiv mari ale rezistenței?

3.5 Influența rezistenței de colector asupra V_{out}

Se studiază influența rezistenței de colector asupra timpilor de comutație.

Sugestie listă valori: 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k.

Atenție: față de simularea anterioară, vor trebui ajustați parametrii generatorului de semnal pentru a surprinde în întregime fenomenele tranzitorii.

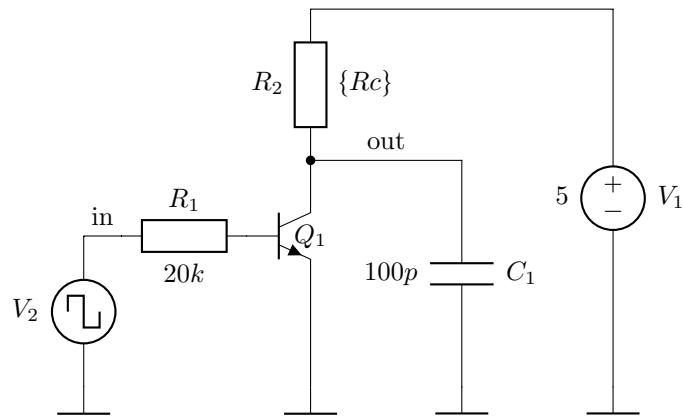


Figura 12

Exemplu de grafic rezultat:

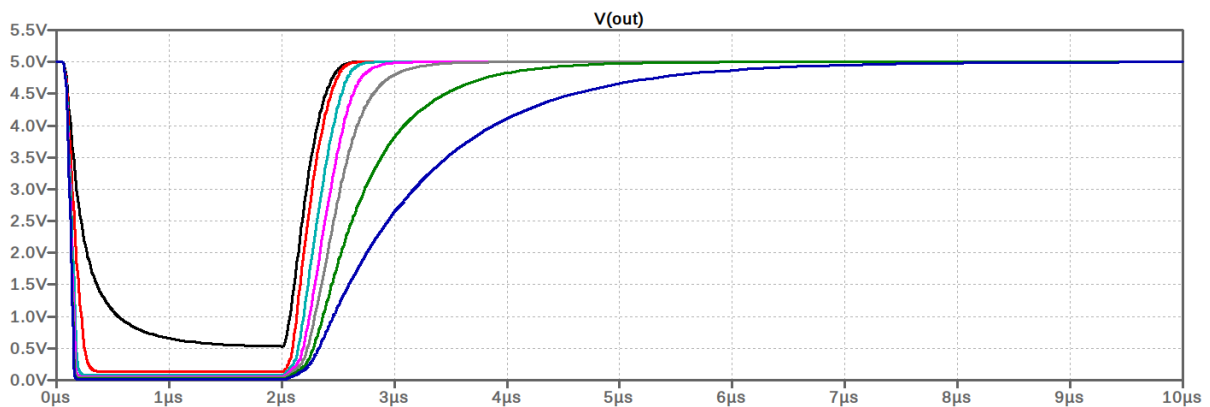


Figura 13

3.6 Influența rezistenței de colector curentului consumat

Se studiază influența rezistenței de colector asupra curentului consumat de la sursa de alimentare. În acest sens, se va utiliza facilitatea de măsurare integrală a LTSpice. Pe graficul curentului, se face Ctrl-click pe eticheta mărimii reprezentate. Se reține valoarea medie a curentului. Întrucât programul nu poate realiza această măsurătoare pe simularea pas-cu-pas, se va efectua o simulare normală pentru 1k și una pentru 5k.

3.7 Influența capacității de sarcină asupra timpilor de comutație

Pentru a studia efectul capacității de sarcină asupra timpilor de comutație se va folosi directiva de variație liniară a parametrului:

```
.step param denumire_parametru valoare_minimă valoare_maximă pas
```

Sugestie: de la 100pF la 1nF cu pas 100pF.

Exemplu de grafic rezultat:

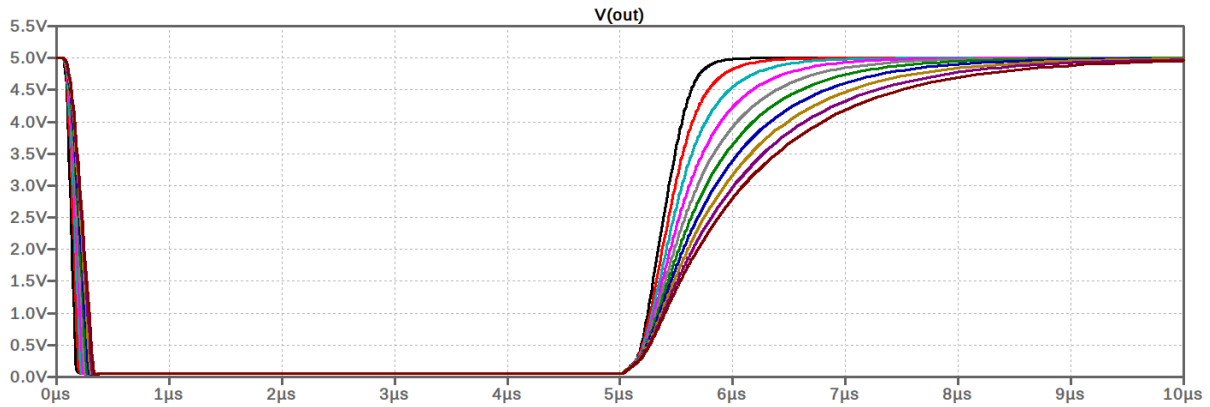


Figura 14

Cum sunt influențați timpii de creștere și de cădere? Dar timpul de stocare?

3.8 Influența condensatorului de accelerare

Pentru a studia efectul introducerii unui condensator de accelerare se va realiza o copie a montajului de bază în aceeași schemă, pentru a putea compara ușor comportarea schemei inițiale cu a celei modificate. Modificarea constă în adăugarea unui condensator de 100pF în paralel cu rezistența de bază.

Atenție: Când duplicați o porțiune de schemă, aveți grijă să nu duplicați și eventualele directive de simulare, respectiv etichete ale nodurilor. Spre exemplu, dacă în figura de mai jos uitam să redenumesc ieșirea copiei în `out_acc`, aș fi avut un scurt-circuit între cele două ieșiri:

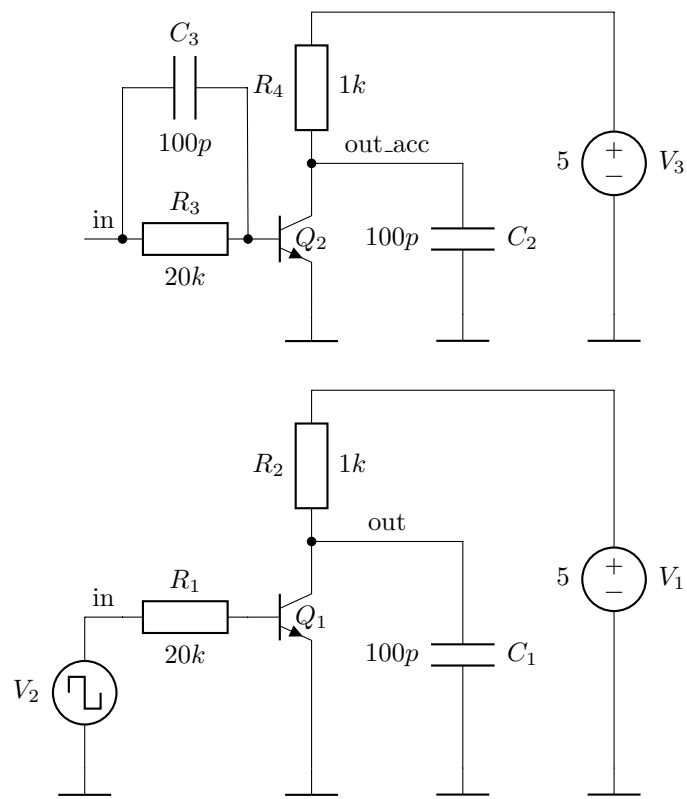


Figura 15

Exemplu de grafic obținut, în care compar circuitul inițial cu cel modificat:

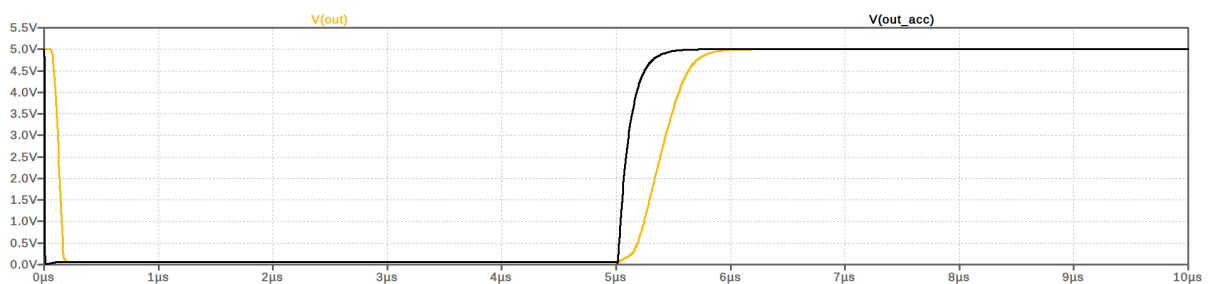


Figura 16

Vizualizați curentul de intrare în circuit. Ce se observă în cazul cu condensator de accelerare?

3.9 Efectul diodei Schottky

Vom a studia efectul introducerii unei diode Schottky dinspre baza spre colectorul tranzistorului. Se recomandă alegerea unui model de diodă de semnal și nu o diodă de putere, care poate avea o capacitate proprie mare.

Exemplu:

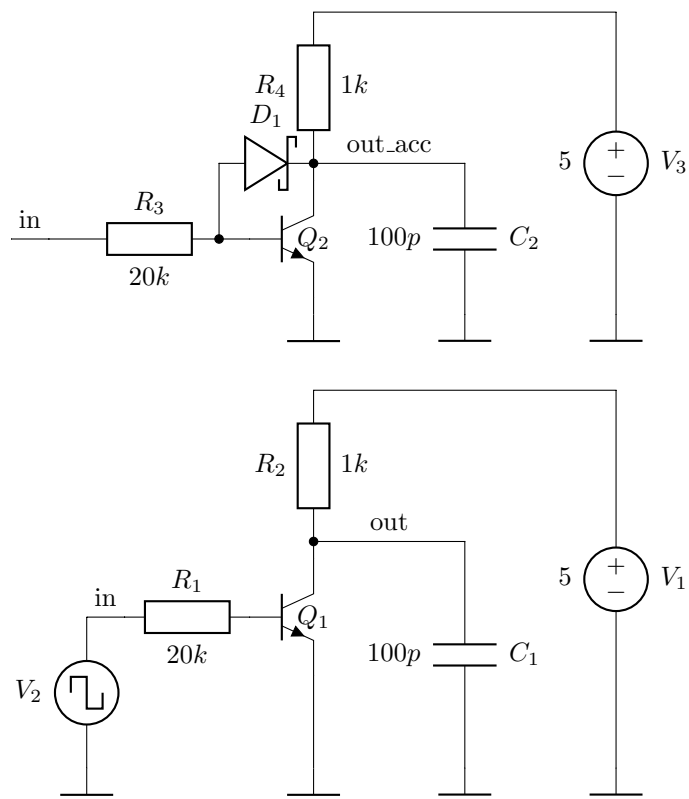


Figura 17

Cu dioda **BAT54**, se observă eliminarea timpului de stocare (ieșirea începe să crească imediat):

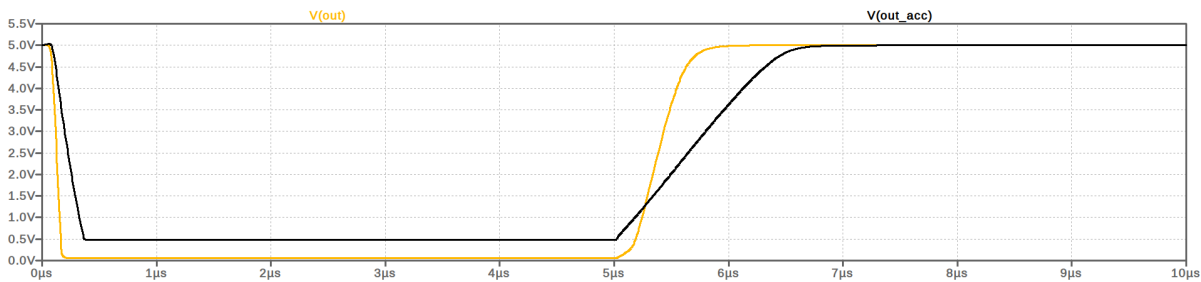


Figura 18

Cu toate acestea, comutarea per total este mai lentă, deoarece dioda are o capacitate proprie care încetinește comutația. Sortând modelele disponibile după curentul maxim (în general un semiconductor proiectat pentru un curent mai mic va avea o arie a joncțiunii mai mică, deci și o capacitate mai mică) se poate găsi o diodă care dă o comutație mai rapidă (ex. **RB705D**):

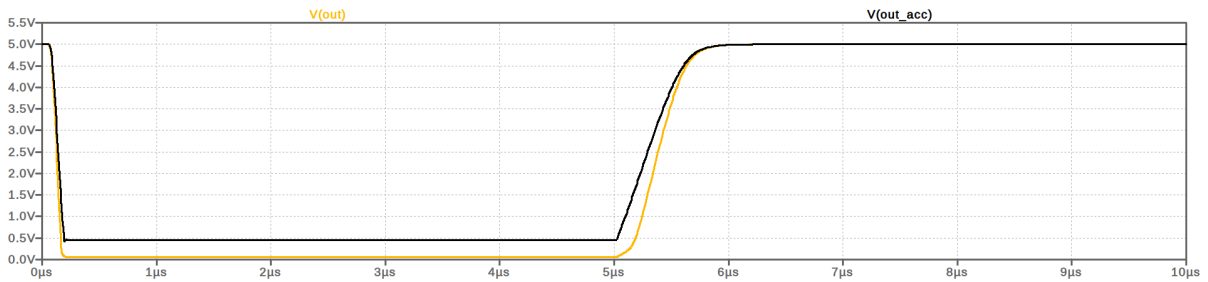


Figura 19

3.10 Comutarea unei sarcini inductive

Se realizează schema de comutare a tranzistorului cu sarcină inductivă:

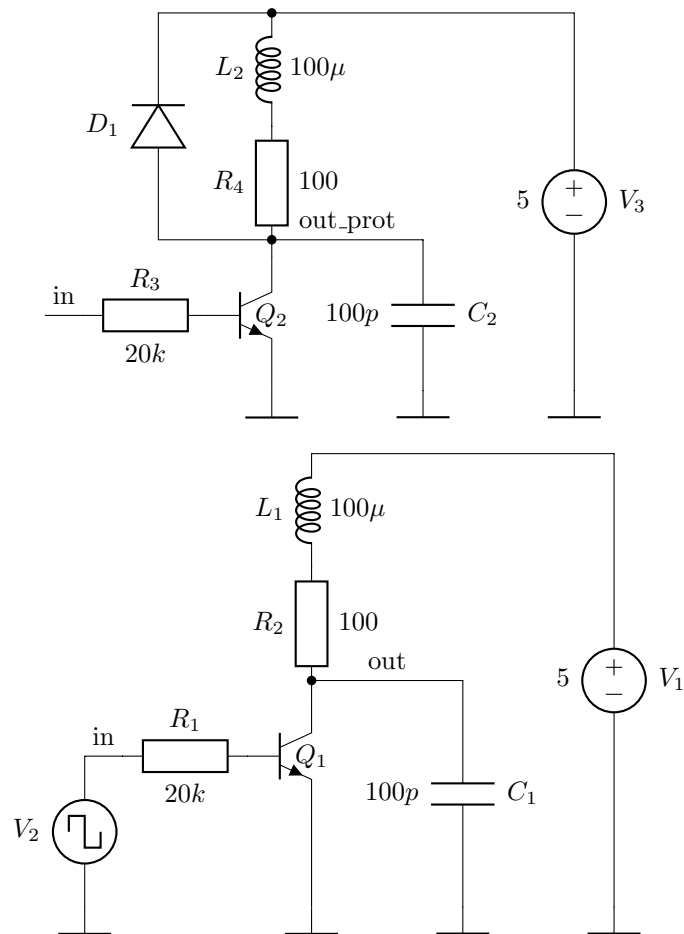


Figura 20

În primul caz bobina (având atât o inductanță cât și o rezistență) este legată direct în colectorul tranzistorului. La oprirea bruscă a curentului, se

constată apariția unei supratensiuni (așa-numitul efect de autoinducție). Astfel de supratensiuni pot avea efect distructiv în practică. În cazul al doilea, circuitul este protejat prin adăugarea unei diode tip **1N4148**. Aceasta crează o cale alternativă pentru curentul prin bobină când tranzistorul se blochează, deci curentul nu mai este forțat să scadă rapid la zero.

Exemplu de grafice:

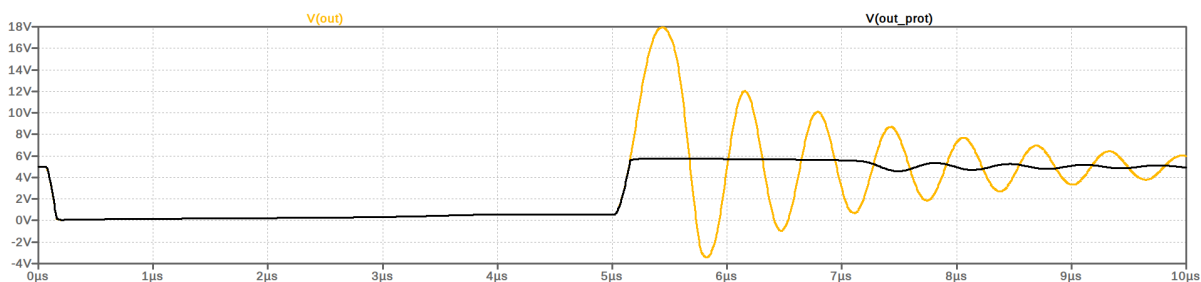


Figura 21

Curentul prin bobină, în primul caz (oprire rapidă), respectiv în al doilea caz (curentul prin tranzistor se oprește rapid, dar curentul prin bobină este preluat de diodă):

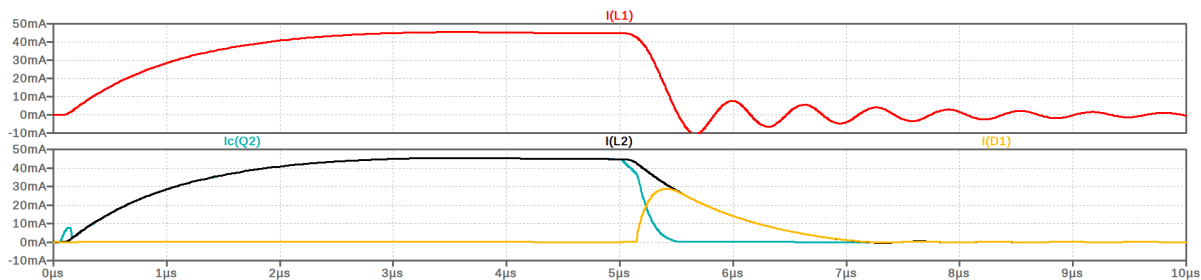


Figura 22