

Transistor

Il transistor è un componente elettronico a semiconduttore usato per controllare una corrente elettrica mediante un segnale di comando. Non crea energia: permette di comandare la corrente in un ramo del circuito usando un segnale applicato a un altro terminale.

Nei circuiti di base il transistor viene studiato soprattutto in due impieghi pratici: come interruttore e come amplificatore. Questa distinzione riguarda l'uso del componente. Un'altra distinzione, diversa, riguarda invece la zona di funzionamento. Nel caso del BJT le tre zone principali sono interdizione, zona attiva e saturazione.

Quando il transistor viene usato come interruttore, il segnale di comando serve ad accendere o spegnere un carico. Il carico non viene alimentato direttamente dal segnale di comando: il segnale serve a portare il transistor nello stato corretto. Nel BJT usato come interruttore, lo spegnimento corrisponde all'interdizione, mentre l'accensione completa corrisponde alla saturazione.

Quando il transistor viene usato come amplificatore, il segnale di ingresso controlla una corrente o una tensione di uscita. Nel BJT il funzionamento come amplificatore avviene nella zona attiva. In questa zona, una variazione della corrente di base produce una variazione della corrente di collettore.

BJT

BJT significa Bipolar Junction Transistor, cioè transistor bipolare a giunzione. Si chiama bipolare perché il suo funzionamento coinvolge due tipi di portatori di carica: elettroni e lacune.

Un BJT ha tre terminali: base, collettore ed emettitore. La base è il terminale di comando. Il collettore e l'emettitore sono i terminali principali del ramo controllato.

Esistono due tipi principali di BJT: NPN e PNP. Nel BJT NPN il transistor conduce quando la base è portata a una tensione positiva rispetto all'emettitore. Nel BJT PNP il transistor conduce quando la base è portata a una tensione più bassa rispetto all'emettitore.

Nei primi esempi didattici si usa spesso il BJT NPN collegato come interruttore sul lato negativo del carico. In questo collegamento il carico è posto tra il positivo dell'alimentazione e il collettore, l'emettitore è collegato a massa e la base riceve il segnale di comando attraverso una resistenza.

BJT NPN COME INTERRUTTORE

Un BJT NPN può essere usato per comandare un carico, per esempio un LED, un relè, una piccola lampada o un motore. Il segnale applicato alla base non deve mai arrivare direttamente senza limitazione di corrente: normalmente si inserisce una resistenza di base.

Quando non arriva corrente sufficiente nella base, il transistor è in interdizione. In questa condizione il transistor si comporta, in modo approssimato, come un interruttore aperto: la corrente nel carico è nulla o trascurabile e il carico resta spento.

Quando arriva una corrente sufficiente nella base, il transistor va in saturazione. In questa condizione il transistor si comporta, in modo approssimato, come un interruttore chiuso: il carico viene alimentato e la corrente è determinata soprattutto dal carico e dalla tensione di alimentazione.

Il transistor non sostituisce la sorgente di energia del carico. Il carico viene alimentato dall'alimentazione principale; il transistor permette o impedisce il passaggio della corrente.

ZONE DI FUNZIONAMENTO DEL BJT

Le tre zone principali di funzionamento del BJT sono interdizione, zona attiva e saturazione.

In interdizione il transistor è spento: la corrente di base è nulla o insufficiente e la corrente di collettore è praticamente nulla.

In zona attiva il transistor lavora come amplificatore: la corrente di collettore dipende dalla corrente di base e dal guadagno del transistor.

In saturazione il transistor è completamente acceso: aumentando ancora la corrente di base, la corrente nel carico non aumenta in modo proporzionale, perché è limitata dal carico e dall'alimentazione.

Per usare un BJT come interruttore si lavora normalmente tra interdizione e saturazione. Per usarlo come amplificatore si lavora invece nella zona attiva.

GUADAGNO DI CORRENTE

Nel funzionamento in zona attiva, il BJT ha un guadagno di corrente indicato spesso con β oppure h_{FE} .

Formula semplificata:

$$I_c = \beta \cdot I_b$$

dove I_c è la corrente di collettore, misurata in ampere, A; I_b è la corrente di base, misurata in ampere, A; β è il guadagno di corrente del transistor.

Questa formula serve per capire il comportamento del transistor in zona attiva. Per usare il transistor come interruttore, però, non conviene basarsi sul valore nominale di β , perché può variare molto da un componente all'altro. Per questo, nel calcolo della resistenza di base, si usa un guadagno forzato più basso.

RESISTENZA DI BASE

La resistenza di base serve a limitare la corrente che entra nella base del BJT. Senza questa resistenza, la corrente di base potrebbe diventare troppo alta e danneggiare il transistor o il circuito di comando.

Il calcolo parte dalla corrente richiesta dal carico. Questa corrente è la corrente di collettore, indicata con I_c . Poi si sceglie una corrente di base sufficiente a mandare il transistor in saturazione.

Per un calcolo didattico, quando il BJT lavora come interruttore, si può usare:

$$I_b = I_c / 10$$

Questo significa usare un guadagno forzato pari a 10. È una scelta prudente, perché aiuta a mandare il transistor in saturazione anche se il guadagno reale del componente è più basso del valore nominale.

La resistenza di base si calcola con:

$$R_b = (V_{\text{comando}} - V_{be}) / I_b$$

dove R_b è la resistenza di base, misurata in ohm, Ω ; V_{comando} è la tensione del segnale che pilota la base, misurata in volt, V; V_{be} è la tensione base-emettitore del transistor, circa 0,7 V per un BJT al silicio; I_b è la corrente di base, misurata in ampere, A.

ESEMPIO DI CALCOLO

Dati del circuito: $V_{\text{comando}} = 5 \text{ V}$; $I_c = 100 \text{ mA}$; $V_{be} = 0,7 \text{ V}$.

Si sceglie una corrente di base pari a un decimo della corrente di collettore:

$$I_b = I_c / 10$$

$$I_b = 100 \text{ mA} / 10 = 10 \text{ mA}$$

Convertendo in ampere:

$$10 \text{ mA} = 0,01 \text{ A}$$

Calcolo della resistenza di base:

$$R_b = (V_{\text{comando}} - V_{be}) / I_b$$

$$R_b = (5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) / 0,01 \text{ A}$$

$$R_b = 4,3 \text{ V} / 0,01 \text{ A}$$

$$R_b = 430 \Omega$$

Il valore calcolato è 430Ω . Poiché le resistenze hanno valori commerciali normalizzati, si può scegliere un valore vicino, per esempio 470Ω .

Con 470Ω la corrente di base diventa:

$$I_b = (5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) / 470 \Omega$$

$$I_b = 4,3 \text{ V} / 470 \Omega$$

$$I_b \approx 0,0091 \text{ A}$$

$$I_b \approx 9,1 \text{ mA}$$

Il valore ottenuto è vicino ai 10 mA calcolati e può essere adatto, se il circuito di comando può fornire quella corrente.

VERIFICA DEL CIRCUITO DI COMANDO

Il calcolo della resistenza di base non basta. Bisogna verificare anche quanta corrente può fornire il circuito che comanda la base.

Per esempio, se la base è comandata da un microcontrollore, bisogna controllare la corrente massima ammessa dal pin di uscita. Se il pin non può fornire la corrente richiesta, bisogna scegliere un'altra soluzione, per esempio un MOSFET, uno stadio di pilotaggio o un modulo già predisposto.

CARICHI INDUTTIVI

Se il carico è induttivo, per esempio un relè, una bobina o un motore, bisogna aggiungere un diodo di protezione in parallelo al carico.

Il diodo serve a proteggere il transistor dalla sovratensione generata quando il carico viene spento. Senza questo diodo, il transistor può danneggiarsi.

POTENZA DISSIPATA DAL TRANSISTOR

Quando il BJT lavora come interruttore in saturazione, tra collettore ed emettitore resta comunque una piccola tensione, indicata come $V_{ce(sat)}$.

La potenza dissipata dal transistor si può stimare con:

$$P = V_{ce(sat)} \cdot I_c$$

dove P è la potenza dissipata, misurata in watt, W; $V_{ce(sat)}$ è la tensione collettore-emettitore in saturazione, misurata in volt, V; I_c è la corrente di collettore, misurata in ampere, A.

Se la corrente del carico è alta, il transistor può scaldarsi. Bisogna quindi controllare la potenza massima ammessa dal componente.

RIASSUNTO

Il transistor è un componente usato per controllare una corrente. Il BJT ha tre terminali: base, collettore ed emettitore. La base è il terminale di comando, mentre collettore ed emettitore appartengono al ramo controllato.

Un BJT può essere usato come interruttore o come amplificatore. Come interruttore lavora tra interdizione e saturazione. Come amplificatore lavora in zona attiva.

Per usare un BJT NPN come interruttore si sceglie una corrente di base sufficiente a mandarlo in saturazione. Per un calcolo didattico si può usare:

$$I_b = I_c / 10$$

Poi si calcola la resistenza di base:

$$R_b = (V_{comando} - V_{be}) / I_b$$

Con un BJT al silicio si usa spesso:

$$V_{be} \approx 0,7 \text{ V}$$

Dopo il calcolo bisogna sempre verificare corrente massima del circuito di comando, corrente del carico, potenza dissipata dal transistor, presenza del diodo di protezione se il carico è induttivo e dati reali del componente usato.

ESEMPIO CON BJT NPN BC337

Si vuole usare un transistor BC337 come interruttore per comandare un relè a 12 V. Il relè assorbe 100 mA. Il comando arriva da un'uscita a 5 V. Il transistor viene collegato come interruttore sul lato negativo del carico: il relè è collegato tra +12 V e collettore, l'emettitore è collegato a massa e la base è comandata tramite una resistenza.

Dati del circuito: transistor BC337 NPN; tensione del comando $V_{comando} = 5 \text{ V}$; tensione base-emettitore assunta $V_{be} = 0,7 \text{ V}$; corrente del carico $I_c = 100 \text{ mA} = 0,1 \text{ A}$; guadagno forzato per saturazione = 10.

Poiché il transistor deve lavorare come interruttore, non si usa il guadagno nominale h_{FE} . Si sceglie invece una corrente di base prudente, pari a circa un decimo della corrente di collettore:

$$I_b = I_c / 10$$

$$I_b = 100 \text{ mA} / 10 = 10 \text{ mA}$$

Convertendo in ampere:

$$I_b = 0,01 \text{ A}$$

La resistenza di base si calcola con:

$$R_b = (V_{comando} - V_{be}) / I_b$$

Sostituendo i valori:

$$R_b = (5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) / 0,01 \text{ A}$$

$$R_b = 4,3 \text{ V} / 0,01 \text{ A}$$

$$R_b = 430 \Omega$$

Il valore calcolato è 430 Ω . Si può scegliere il valore commerciale 470 Ω .

Verifica con 470 Ω :

$$I_b = (5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) / 470 \Omega$$

$$I_b = 4,3 \text{ V} / 470 \Omega$$

$$I_b \approx 0,0091 \text{ A}$$

$$I_b \approx 9,1 \text{ mA}$$

Con 470 Ω la corrente di base è circa 9,1 mA. Il rapporto tra corrente di collettore e corrente di base diventa:

$$I_c / I_b = 100 \text{ mA} / 9,1 \text{ mA}$$

$$I_c / I_b \approx 11$$

Il valore è vicino al rapporto prudente 10, quindi il transistor può essere portato in saturazione.

Bisogna però verificare che il circuito di comando possa fornire circa 9 mA. Se il comando arriva da un microcontrollore, il pin deve poter fornire questa corrente senza superare il limite ammesso dal costruttore.

VERIFICA DEL TRANSISTOR

Il BC337 può sopportare una corrente di collettore superiore ai 100 mA dell'esempio, quindi il carico scelto è compatibile dal punto di vista della corrente. Bisogna comunque controllare anche la potenza dissipata.

Quando il transistor è in saturazione, tra collettore ed emettitore resta una piccola tensione, indicata come $V_{ce(sat)}$. Per una stima prudente si può assumere:

$$V_{ce(sat)} = 0,2 \text{ V}$$

La potenza dissipata dal transistor è:

$$P = V_{ce(sat)} \cdot I_c$$

$$P = 0,2 \text{ V} \cdot 0,1 \text{ A}$$

$$P = 0,02 \text{ W}$$

$$P = 20 \text{ mW}$$

La potenza dissipata è bassa, quindi nell'esempio il transistor lavora in condizioni tranquille.

DIODO DI PROTEZIONE

Se il carico è un relè, una bobina o un motore, bisogna aggiungere un diodo di protezione in parallelo al carico. Il diodo si collega in modo da non condurre durante il funzionamento normale: catodo verso il positivo dell'alimentazione, anodo verso il collettore del transistor.

Quando il transistor si spegne, la bobina genera una sovratensione. Il diodo offre un percorso alla corrente della bobina e protegge il transistor.

RIASSUNTO DEL CALCOLO

Dati: $V_{comando} = 5 \text{ V}$; $I_c = 100 \text{ mA}$; $V_{be} = 0,7 \text{ V}$.

Corrente di base scelta:

$$I_b = I_c / 10 = 10 \text{ mA}$$

Resistenza di base:

$$R_b = (5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) / 0,01 \text{ A} = 430 \Omega$$

Valore commerciale scelto:

$$R_b = 470 \Omega$$

Corrente reale di base con 470 Ω :

$$I_b \approx 9,1 \text{ mA}$$

Verifica:

$$I_c / I_b \approx 11$$

Il valore è adatto per usare il BC337 come interruttore con un carico da 100 mA, purché il circuito di comando possa fornire circa 9 mA e sia presente il diodo di protezione se il carico è induttivo.

TRANSISTOR NPN COMUNI E CARATTERISTICHE PRINCIPALI

BC337

Tipo: BJT NPN.

Contenitore tipico: TO-92.

Tensione massima collettore-emettitore, VCEO: 45 V.

Corrente massima di collettore, IC: 800 mA.

Potenza dissipabile, Ptot: 625 mW a temperatura ambiente di 25 °C.

Guadagno in corrente, hFE: circa 100 - 630, secondo versione e condizioni di misura.

Tensione di saturazione, VCE(sat): fino a circa 0,7 V con IC = 500 mA e IB = 50 mA.

Uso tipico: piccoli carichi, relè, LED, circuiti di comando, piccoli stadi driver.

Nota: adatto per esempi didattici con carichi da qualche decina o qualche centinaio di mA.

2N3904

Tipo: BJT NPN.

Contenitore tipico: TO-92.

Tensione massima collettore-emettitore, VCEO: 40 V.

Corrente massima di collettore, IC: 200 mA.

Potenza dissipabile, Ptot: 625 mW circa, secondo contenitore e condizioni termiche.

Guadagno in corrente, hFE: 100 - 300 con IC = 10 mA e VCE = 1 V.

Tensione di saturazione, VCE(sat): massimo 0,2 V con IC = 10 mA e IB = 1 mA; massimo 0,3 V con IC = 50 mA e IB = 5 mA.

Uso tipico: piccoli segnali, piccoli LED, piccoli carichi, circuiti logici semplici.

Nota: non è adatto a correnti elevate; è più un transistor da segnale che da potenza.

PN2222

Tipo: BJT NPN.

Contenitore tipico: TO-92.

Tensione massima collettore-emettitore, VCEO: 40 V.

Corrente massima di collettore, IC: 600 mA.

Potenza dissipabile, P_{tot}: 625 mW circa a temperatura ambiente di 25 °C.

Guadagno in corrente, hFE: 100 - 300 con IC = 150 mA e VCE = 10 V.

Tensione di saturazione, VCE(sat): fino a circa 1 V con IC = 500 mA e IB = 50 mA.

Uso tipico: piccoli driver, relè, LED di potenza moderata, piccoli carichi.

Nota: rispetto al 2N3904 sopporta più corrente; la VCEO resta pari a 40 V nei datasheet considerati.

SS8050

Tipo: BJT NPN.

Contenitore tipico: TO-92.

Tensione massima collettore-emettitore, VCEO: 25 V.

Corrente massima di collettore, IC: 1,5 A.

Potenza dissipabile, P_{tot}: circa 1 W, secondo contenitore e condizioni termiche.

Guadagno in corrente, hFE: circa 85 - 300, secondo versione e condizioni di misura.

Tensione di saturazione, VCE(sat): fino a circa 0,5 V con IC = 800 mA e IB = 80 mA.

Uso tipico: piccoli carichi con corrente più alta, piccoli motori, relè, stadi audio, driver generici.

Nota: può gestire più corrente rispetto a BC337 e 2N3904, ma ha tensione massima VCEO più bassa.

BC639

Tipo: BJT NPN.

Contenitore tipico: TO-92.

Tensione massima collettore-emettitore, VCEO: 80 V.

Corrente massima di collettore, IC: 1 A.

Potenza dissipabile, P_{tot}: 625 mW a temperatura ambiente di 25 °C; 800 mW con contenitore mantenuto a 25 °C.

Guadagno in corrente, hFE: valore variabile secondo versione e corrente di lavoro; per BC639 sono indicati valori tipici dell'ordine di alcune decine fino a circa 160 nelle condizioni riportate dal datasheet.

Tensione di saturazione, VCE(sat): massimo 0,5 V con IC = 500 mA e IB = 50 mA.

Uso tipico: piccoli driver con tensioni più alte, relè, carichi di potenza moderata.

Nota: utile quando serve una tensione VCEO più alta rispetto a BC337 o PN2222.

CONFRONTO RAPIDO

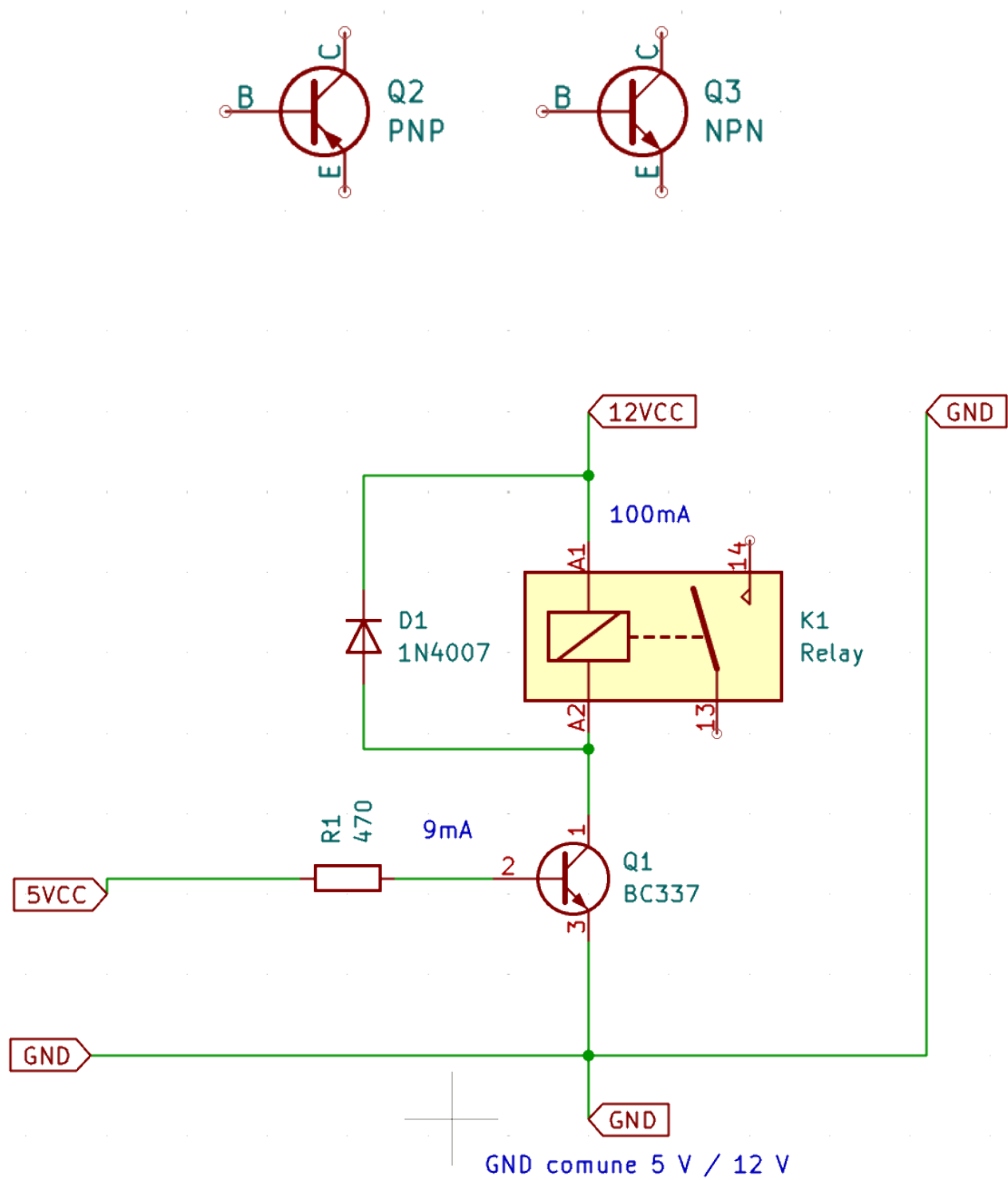
Il 2N3904 è adatto a piccoli segnali e piccole correnti.

Il BC337 è adatto a piccoli carichi e relè comuni.

Il PN2222 è simile come uso al BC337, ma con limiti diversi.

L'SS8050 è adatto quando serve più corrente, ma con tensione di lavoro più bassa.

Il BC639 è utile quando serve una tensione collettore-emettitore più alta.



Datasheet BC337 onsemi, datasheet 2N3904 onsemi, datasheet P2N2222A onsemi, datasheet SS8050 onsemi, datasheet BC637/BC639 onsemi, Sedra/Smith — Microelectronic Circuits, Horowitz/Hill — The Art of Electronics, All About Circuits — Bipolar Junction Transistors, Electronics Tutorials — Bipolar Transistor as a Switch