

TEMA 6
ESTABILIDAD EN EL PUNTO DE TRABAJO
(Guía de Clases)

Asignatura: Dispositivos Electrónicos I
Dpto. Tecnología Electrónica

CONTENIDO

Introducción

Estabilidad en el punto de trabajo

Punto de trabajo de un transistor

Variación del punto de trabajo

Variación con la temperatura

Variación por cambio de componentes o dispositivos

Factores de estabilidad

Definición

Cálculo de las variaciones de tensión o corriente

Polarización

Técnicas de estabilización

Técnicas de compensación

Compensación de la variación de V_{BE} mediante diodo o transistor

Compensación de la variación de I_{C0} mediante diodo

BIBLIOGRAFÍA

Introducción

La estabilidad de funcionamiento de los circuitos con transistores es un aspecto fundamental en el diseño de los mismos. El diseñador no sólo ha de asegurar que el circuito funciona, sino que lo hace dentro de los límites máximos y mínimos indicados por las especificaciones del mismo. Además ha de prever posibles eventualidades al funcionamiento que puedan hacer que el circuito deje de funcionar. La elección de la red de polarización de un transistor puede resultar clave a la hora de garantizar que el circuito se adaptará a nuestras expectativas.

Estabilidad en el punto de trabajo

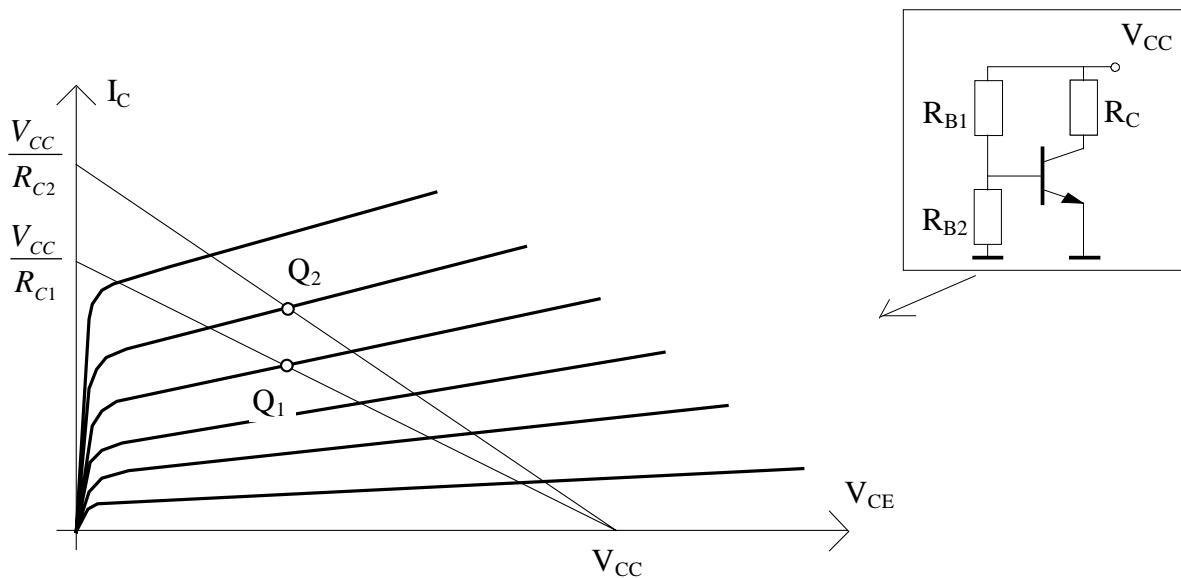
Punto de trabajo de un transistor

Entendemos por punto de trabajo de un trabajo del transistor la combinación de tensiones y corrientes continuas que existen en el mismo en funcionamiento normal. En función de la aplicación del circuito el punto de trabajo de un transistor puede variar mucho. Se puede polarizar el transistor en cualquiera de las tres regiones de funcionamiento dependiendo del uso que se haga del circuito. En el cuaderno dedicado al transistor se estudió en detalle cómo polarizar el transistor y cómo interpretar su punto de trabajo. Aquí se hablará de las variaciones que puede sufrir el mismo, debido a factores externos.

Variación del punto de trabajo

En esencia, el punto de trabajo de un transistor en un circuito variará cuando cambie alguno de los elementos de los que depende. Estos elementos pueden ser bien internos al propio dispositivo (Tensiones o corrientes, características), bien externos, como por ejemplo variaciones en las resistencias, alimentaciones, ...

En la figura podemos ver el efecto de la variación de la resistencia de colector sobre el punto de funcionamiento del transistor. Es evidente que si dicha resistencia disminuye, tendremos un incremento en la corriente de colector (I_C) para la misma tensión colector-emisor (V_{CE}), luego se ve claramente que la variación de un componente afecta directamente a la posición del punto de trabajo, el cual con una resistencia R_{C1} se encuentra en Q_1 y con otra resistencia menor (R_{C2}) pasa a ser Q_2 .



Los componentes, y las características del transistor, pueden variar por numerosos motivos, entre los cuales los más importantes son:

- Debido a cambios de temperatura
- Debido a cambio del componente en sí por otro igual o diferente

Variación con la temperatura

La temperatura afecta a todos los componentes y dispositivos, aunque a unos más que a otros. Por ejemplo un incremento de temperatura afectará a la resistividad de una resistencia, provocando una bajada de su valor, sin embargo este efecto suele ser despreciable. El efecto de la temperatura se hace mucho más importante cuando afecta a un semiconductor en sí. Concretamente existen dos características del mismo que dependen de la temperatura de forma importante:

- La tensión base-emisor (V_{BE}): Su variación para transistores de silicio suele ser $\Delta V_{BE}(T^a) = -2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, es decir, disminuye al aumentar la temperatura
- La corriente inversa de la unión colector-base (I_{C0}): El valor de este parámetro se duplica aproximadamente por cada 10 grados de incremento de la temperatura, por lo que podemos obtener su valor aplicando la siguiente fórmula: $I_{C0}(T_2) = I_{C0}(T_1) \cdot 2^{\frac{(T_2 - T_1)}{10}}$

ANOTACIONES

Variación por cambio de componentes o dispositivos

Es evidente que al cambiar un componente de un circuito nunca vamos a conseguir que tenga exactamente las mismas características y valores que el antiguo, debido a las tolerancias de fabricación. Así, si estábamos usando una resistencia de 1K (con 10% de tolerancia), el valor real de la resistencia podía ser, por ejemplo, 980Ω. Si cambiamos esta resistencia por otra del mismo valor nominal (es decir, 1K) podemos encontrarnos fácilmente que la nueva tiene una resistencia real igual a 1080Ω, valor que está dentro de los márgenes de tolerancia del componente, pero que sin embargo puede hacer que nuestro circuito deje de funcionar correctamente.

La dispersión de valores, y las tolerancias, son mucho más acusadas con los dispositivos semiconductores. Así, por ejemplo, dentro de una misma serie de transistores, podemos tener unidades con grandes diferencias en sus características. En las hojas características de los mismos podemos observar este hecho, por ejemplo en la β ; los fabricantes suelen dar un margen de tolerancia al parámetro, y en ocasiones del valor mínimo al máximo puede haber diferencias de más de 100 unidades o más.

Teniendo lo anterior en cuenta, a la hora de diseñar un circuito hay que tener en cuenta que cualquier cambio de componentes que hay que hacer puede llevar al mismo a dejar de funcionar correctamente, por variar su punto de trabajo fuera de los límites admisibles.

Ejemplo

De las hojas características del transistor 2N3904 (un transistor bipolar de tipo NPN del fabricante Motorola), obtenemos la siguiente información:

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
DC Current Gain ($I_C = 10 \text{ mA}_{dc}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ V}_{dc}$)	β	100	300	-
Base-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10 \text{ mA}_{dc}$, $I_B = 1.0 \text{ mA}_{dc}$)	$V_{BE(sat)}$	0.65	0.85	V_{dc}

Se puede observar la gran diferencia de características entre transistores de la misma serie, pues la tabla nos indica que, por ejemplo, la β del transistor que adquiramos, puede estar comprendida entre 100 y 300.

ANOTACIONES

Factores de estabilidad

Definición

Los factores de estabilidad nos dan la variación de una tensión o una corriente en función de alguno de los parámetros susceptibles de cambio en el dispositivo. Por ejemplo, si consideramos la corriente de colector como elemento a observar, podemos definir al menos cuatro factores de estabilidad, que nos indican la variación de dicha corriente con respecto a otros cuatro elementos como son la tensión base-emisor, la corriente inversa colector-base, la ganancia en continua (β) y la tensión de alimentación del circuito. Las definiciones serían concretamente:

$$S_{I_{C0}} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} \quad S_{V_{BE}} = \frac{\partial I_{C0}}{\partial V_{BE}} \quad S_{\beta} = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \quad S_{V_{CC}} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CC}}$$

Las definiciones serían análogas si hubiésemos considerado como valor a observar la tensión de colector, o la corriente de base.

Cálculo de las variaciones de tensión o corriente

A la hora de calcular la variación de una tensión o corriente primero tenemos que definir con respecto a qué queremos conocer la variación. Un caso típico es calcular la variación de la corriente de colector de un transistor con respecto a la temperatura. Esto implica ser capaces de calcular el incremento o decremento en la I_C cuando la temperatura pasa de un valor T_1 a otro T_2 . En general no se dispone de ningún dato que nos indique directamente cuánto varía I_C con T , por lo que el cálculo hay que hacerlo empleando otros tipos de relaciones que sí se conocen. Concretamente el problema queda planteado de la siguiente forma:

¿Qué se quiere calcular	¿Qué es necesario?	Datos de los que se dispone
I_C cuando T varía de T_1 a T_2	$I_C(T_1)$ $\Delta I_C (T_1 \text{ a } T_2)$	$I_C(T_1)$ $\Delta V_{BE} (T_1 \text{ a } T_2)$ $\Delta I_{C0} (T_1 \text{ a } T_2)$ $\Delta \beta (T_1 \text{ a } T_2)$ $\Delta V_{CC} (T_1 \text{ a } T_2)$

Como se puede observar en la tabla anterior, para realizar el cálculo necesitamos la variación de I_C con respecto a la temperatura, pero generalmente no se dispone de este dato, y sí de otros como son las variaciones de la tensión V_{BE} , la corriente I_{C0} , β y V_{CC} con la temperatura. La solución del

ANOTACIONES

problema pasa entonces por poner I_C en función de estos cuatro valores: $I_C = f(V_{BE}, I_{C0}, \beta, V_{CC})$, derivando ahora con respecto a los cuatro parámetros podemos obtener lo siguiente:

$$\Delta I_C = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \Delta V_{BE} + \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} \Delta I_{C0} + \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \Delta \beta + \frac{\partial I_C}{\partial V_{CC}} \Delta V_{CC}$$

A partir de la anterior ecuación podemos determinar la variación buscada y resolver el problema.

Ejemplo

Dado el circuito de la figura, y conocidos los datos que se indican a continuación, calcular el valor de la corriente de colector cuando la temperatura pasa de 25 a 30°C.

DATOS:

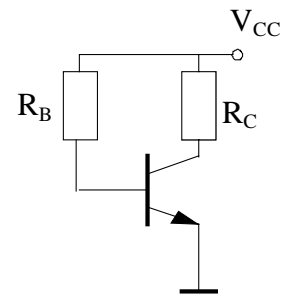
(A la temperatura de 25°C)

$$V_{CC} = 12 \text{ V} \quad R_C = 1 \text{ K} \quad R_B = 49 \text{ K}$$

$$\beta = 49 \quad V_{BE} = 0,6 \text{ V}$$

(Datos que varían con la temperatura)

$$\Delta \beta(T^\circ) = 5 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad \Delta V_{BE}(T^\circ) = -2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$



Solución:

La corriente de colector se puede obtener a partir de las dos ecuaciones siguientes:

$$\begin{cases} I_C = \beta \cdot I_B \\ I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \end{cases}$$

De forma que nos queda:

$$I_C = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = f(\beta, V_{CC}, V_{BE}) \quad (I)$$

Como podemos observar, la corriente de colector depende de β , V_{CC} y V_{BE} , de los cuáles sólo β y V_{BE} dependen de la temperatura (según los datos de los que disponemos).

Podemos calcular inmediatamente el valor de I_C a la temperatura de 25°C que resulta:

$$I_C = \beta \frac{12 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{49 \text{ K}} = 11,4 \text{ mA}$$

ANOTACIONES

Y para calcular su valor a 30°C necesitaremos previamente calcular la variación de I_C con la temperatura, que podemos obtener con la siguiente ecuación:

$$\Delta I_C = S_{\beta} \Delta \beta + S_{V_{BE}} \Delta V_{BE} \quad (II)$$

Los factores de estabilidad se obtiene inmediatamente a partir de la ecuación (I) y se su definición:

$$S_{\beta} = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right) = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = 232,7 \mu\text{A}$$

$$S_{V_{BE}} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{\partial}{\partial V_{BE}} \left(\beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right) = -\frac{\beta}{R_B} = -1 \text{mA/V}$$

Es de particular importancia observar las unidades de cada factor. El primero (S_{β}) resulta de una corriente dividida por un parámetro adimensional, luego tiene unidades de corriente (amperios), mientras que el segundo ($S_{V_{BE}}$) tiene unidades de Ω^{-1} , pues resulta de dividir una corriente por una tensión. En general, y por comodidad para su uso posterior, se emplean unidades de mA para el primero, y mA/V para el segundo caso.

Calculamos ahora las variaciones de β y V_{BE} en los 5 grados de diferencia que existen entre la temperatura inicial (25°C) y la final (30°C):

$$\Delta \beta = \Delta \beta(T^a) \cdot (T_2 - T_1) = 5 \cdot (30 - 25) = 25$$

$$\Delta V_{BE} = \Delta V_{BE}(T^a) \cdot (T_2 - T_1) = -2,5 \text{mV}/^{\circ}\text{C} \cdot 5^{\circ}\text{C} = -12,5 \text{mV}$$

El cálculo ahora de la variación de la corriente de colector resulta inmediato, aplicando la ecuación (II), con los valores obtenidos de los factores y de la variación de β y V_{BE} con la temperatura:

$$\Delta I_C(25^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}) = S_{\beta} \Delta \beta + S_{V_{BE}} \Delta V_{BE} = 0,23 \text{mA} \cdot 25 + (-1 \text{mA/V}) \cdot (-0,0125 \text{V})$$

$$\Delta I_C = 5,75 \text{mA} + 0,0125 \text{mA} = 5,76 \text{mA}$$

como resultado final tenemos que I_C a 30°C resulta:

$$I_C(30^{\circ}\text{C}) = I_C(25^{\circ}\text{C}) + \Delta I_C = 11,4 \text{mA} + 5,76 \text{mA} = 17,16 \text{mA}$$

Polarización

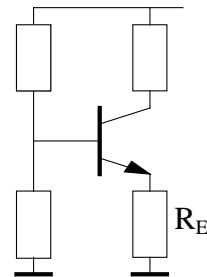
A la hora de polarizar un circuito con transistores para un correcto funcionamiento teniendo en cuenta que se pueden producir las variaciones antes comentadas, tenemos dos tipos de técnicas:

- Técnicas de estabilización
- Técnicas de compensación

Técnicas de estabilización

Las técnicas de estabilización se basan en el uso de circuitos de polarización resistivos que, ante variaciones de los diversos parámetros antes mencionados, actúan sobre la corriente de base del transistor compensando su efecto.

Un ejemplo clásico es el uso de una resistencia de emisor, en una configuración amplificadora en Emisor Común. Si la corriente de colector aumenta también lo hace la tensión en la resistencia R_E , provocando una disminución de la tensión base-emisor, y por consiguiente una reducción en I_B que lleva a una disminución de I_C . Las variaciones de corriente o tensión se ven de esta forma estabilizados (véase figura).



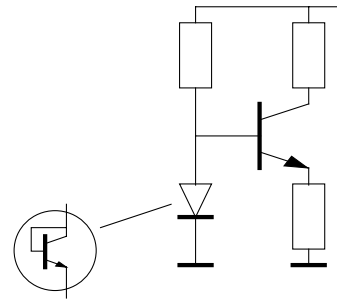
Técnicas de compensación

Las técnicas de compensación van encaminadas a paliar en la medida de lo posible los efectos de la temperatura, u otros parámetros, en las características del transistor del diseño, mediante el uso de otros transistores, diodos o termistores que compensen dichos efectos.

Compensación de la variación de V_{BE} mediante diodo o transistor

Para compensar los efectos de la temperatura en la tensión V_{BE} del transistor se puede usar otra unión PN (transistor o diodo) de idénticas características a la unión base-emisor del transistor empleado.

En el ejemplo de la figura se puede deducir fácilmente que si la dependencia de la tensión V_{BE} del transistor con la temperatura es idéntica a la de la tensión del diodo (V_γ), entonces se compensan y la corriente de colector no varía al cambiar la temperatura.



Efectivamente, la corriente de colector la podemos poner como (suponiendo $I_C \cong I_E$):

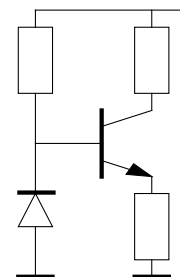
$I_C = \frac{V_\gamma - V_{BE}}{R_E}$, y de aquí obtenemos la variación con la temperatura como:

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = \frac{\partial V_\gamma / \partial T - \partial V_{BE} / \partial T}{R_E}$$

Aplicando la suposición de que ambas uniones tienen la misma variación, es decir, suponiendo $\frac{\partial V_\gamma}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$, obtenemos que $\frac{\partial I_C}{\partial T} = 0$, es decir, que la corriente de colector quede compensada frente a variaciones de temperatura.

Compensación de la variación de I_{C0} mediante diodo

De forma análoga al apartado anterior, podemos colocar un diodo en un circuito con un transistor para compensar el efecto de la temperatura sobre el parámetro I_{C0} . En la figura vemos cómo quedaría el circuito.



BIBLIOGRAFÍA

Diseño electrónico. Circuitos y sistemas

C.J. Savant, M.S. Roden y G.L. Carpenter

Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, 2ª edición, 1992

El capítulo 5 de este libro trata el tema de la estabilidad de una forma sencilla y conceptual, con numerosos ejemplos de cálculo. Habla tanto de la estabilidad de transistores bipolares como FET.