



Melexis

INSPIRED ENGINEERING

Източници на Опорно Напрежение Voltage Reference Generators

Христо Христов
Мелексис България
06.03.2023

ДЕФИНИЦИЯ И УПОТРЕБА

Източници на опорно напрежение / ток

- Опорните източници на напрежение и ток имат следните основни характеристики
 - Устойчивост към промени в окръжаващата среда – температура, захранващо напрежение. Не задължително да останат постоянни, но трябва да са добре дефинирани
 - Устойчивост към процесни отклонения, възникнали по време на производство
 - Ниво на шум, съобразено с изискванията за ниво на шум на обработвания сигнал
 - Изходно съпротивление, съобразено с последващите блокове във веригата
- Употреба
 - Входни и изходни стъпала на операционни усилватели
 - Регулатори
 - ЦАП и АЦП
 - Осцилатори
 - ...

ИЗТОЧНИЦИ НА НАПРЕЖЕНИЕ,
НЕЗАВИСЕЩИ ОТ
ТЕМПЕРАТУРАТА

Генериране на напрежение с отрицателен температурен коефициент

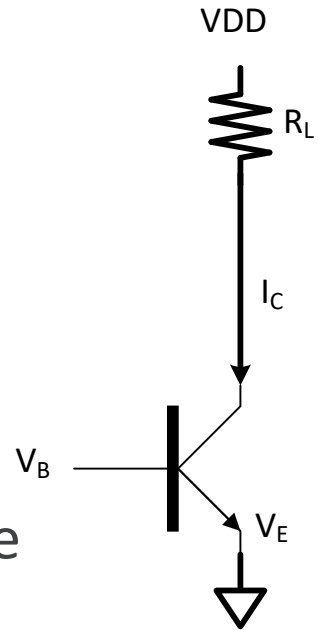
- Колекторният ток през биполярен транзистори се описва със следния израз

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad \text{където } I_S \text{ е токът на насищане, } V_{BE} \text{ е напрежението база-емитер, а } V_T \text{ е топлинния потенциал}$$
$$I_S = b \cdot T^p \cdot e^{\frac{-E_g}{k \cdot T}} \quad V_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

- За зависимостта на V_{BE} по температура може да се запише

$$\frac{d}{dT} V_{BE} = \frac{V_{BE} - \frac{E_g + T \cdot k \cdot p}{q}}{T}$$

- Температурният коефициент на V_{BE} при стайна температура ($T \approx 300\text{K}$) е около -1.5mV/K



Генериране на напрежение с положителен температурен коефициент

- Ако два подобни биполярни транзистора работят при различни токови плътности на колекторния си ток (I_C/I_S), получаваме

$$V_{BE1} = V_T \cdot \ln\left(\frac{n \cdot I_0}{I_{S1}}\right) \quad V_{BE2} = V_T \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_{S2}}\right)$$

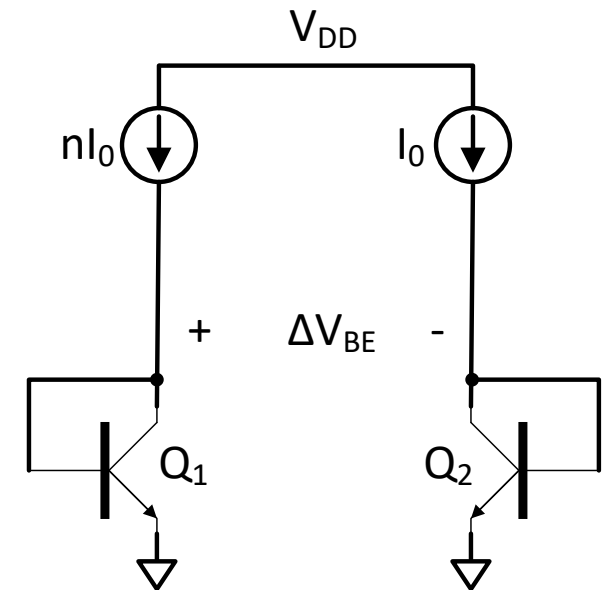
- Ако $I_{S1} = I_{S2} = I_S$

$$\Delta V_{BE} = V_T \cdot \left(\ln\left(\frac{n \cdot I_0}{I_S}\right) - \ln\left(\frac{I_0}{I_S}\right) \right) = V_T \cdot \ln(n)$$

$$V_T = \frac{k(T)}{q}$$

$$\frac{d}{dT} \Delta V_{BE} = \frac{k}{q} \cdot \ln(n)$$

- Получихме напрежение, имащо положителен температурен коефициент
- Остава да намерим начин да комбинираме напрежението с отрицателен и това с положителен температурен коефициент, за да получим температурно независимо опорно напрежение



Генериране на напрежение с „нулев“ температурен коефициент

- Нека дефинираме V_{REF} като

$$V_{REF} = V_{BE} + \alpha \cdot \Delta V_{BE}$$

- Умножаваме по коефициент само ΔV_{BE} , тъй като $k/q \approx 87\mu\text{V}/\text{K}$, докато температурния коефициент на V_{BE} е $-1.5\text{mV}/\text{K}$
- Стойността на α се получава около 17.2, което при $V_{BE}=0.8\text{V}$ и $V_T=26\text{mV}$ при $T=300\text{K}$ дава следната стойност за V_{REF}

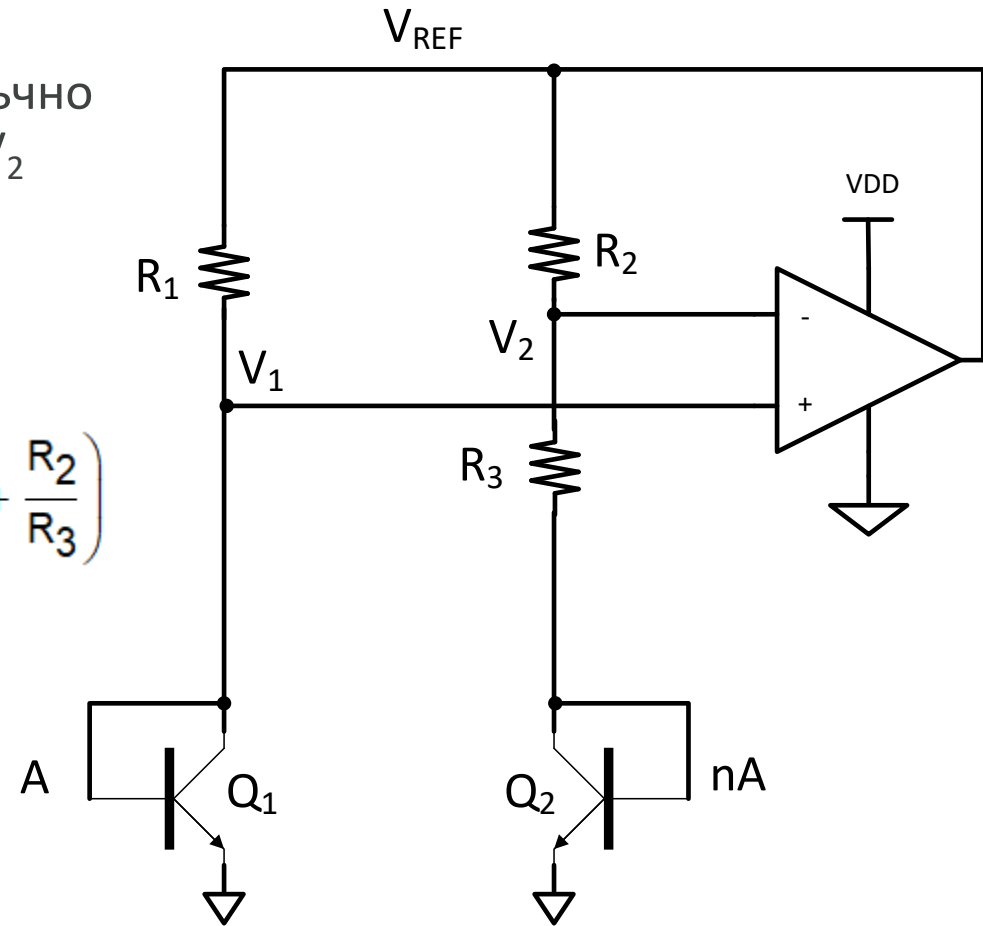
$$V_{REF} = 0.8\text{V} + 17.2 \cdot 26\text{mV} = 1.247\text{ V}$$

- Това е типична стойност на повечето бандгап (bandgap) източници на опорно напрежение

Реализация на схема за генериране на напрежение с „нулев“ температурен коефициент

- Можем да приложим обратна връзка с достатъчно усилване, за да направим напреженията V_1 и V_2 равни
- Тогава за V_{REF} се получава

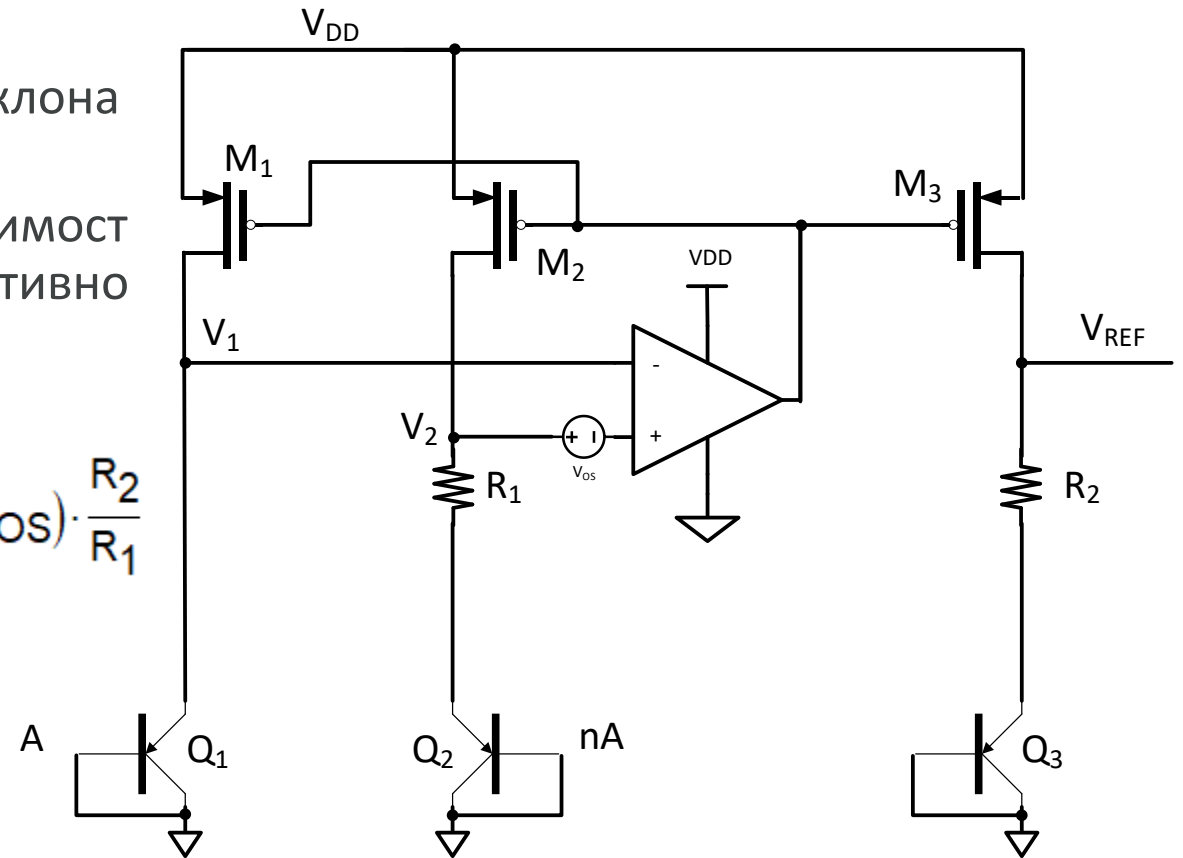
$$V_{REF} = V_{BE2} + \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_3} \cdot (R_2 + R_3) = V_{BE2} + V_T \cdot \ln(n) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$



Реализация на схема за генериране на напрежение с „нулев“ температурен коефициент (2)

- Операционният усилвател в предходното разглеждане трябва да осигури ток за двата клона (Q_1 и Q_2)
- За да се избегнат изискванията за товарносимост на усилвателя, той се натоварва само капацитивно

$$V_{REF} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2} + V_{OS}}{R_1} \cdot R_2 + V_{BE3} = V_{BE3} + (V_T \cdot \ln(n) + V_{OS}) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



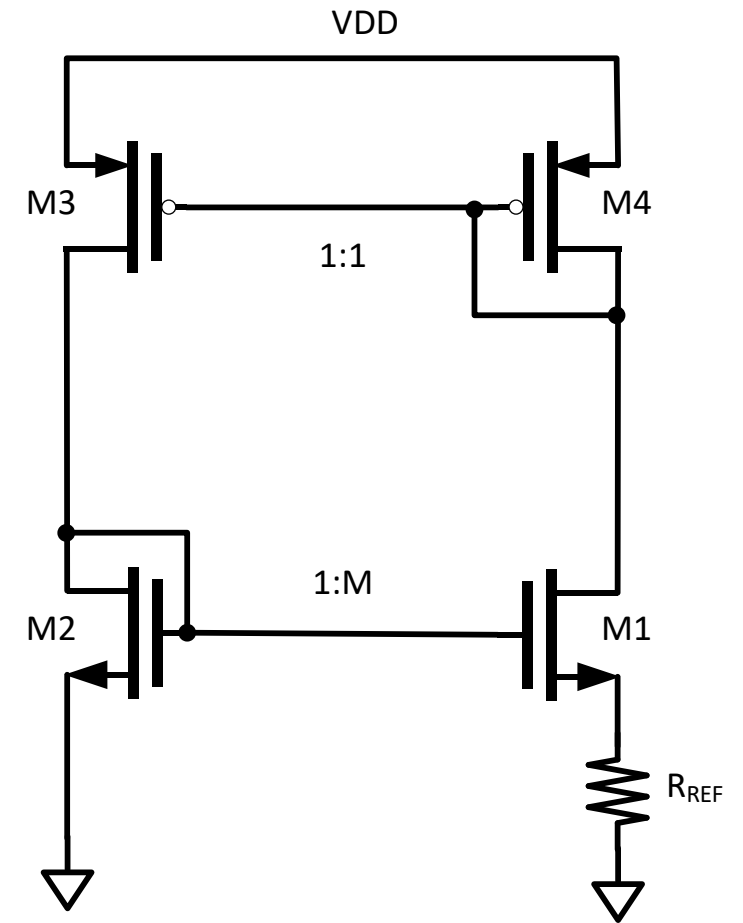
Източник на ток, независещ от захранващото напрежение

- Транзисторите M3 и M4 изискват в двата клона един и същи ток (възможен е и ток 0A!)
- Поради различното гейт-сорс напрежение на M1 и M2, дължащо се на напрежителния пад върху резистора R_{REF} , е необходимо размерите на M1 да са различни от тези на M2
- За схемата важи следната зависимост

$$\sqrt{\frac{2 \cdot I_{REF}}{\beta_{M2}}} + V_{THN} = \sqrt{\frac{2 \cdot I_{REF}}{M \cdot \beta_{M2}}} + V_{THN} + I_{REF} \cdot R_{REF}$$

- Следователно

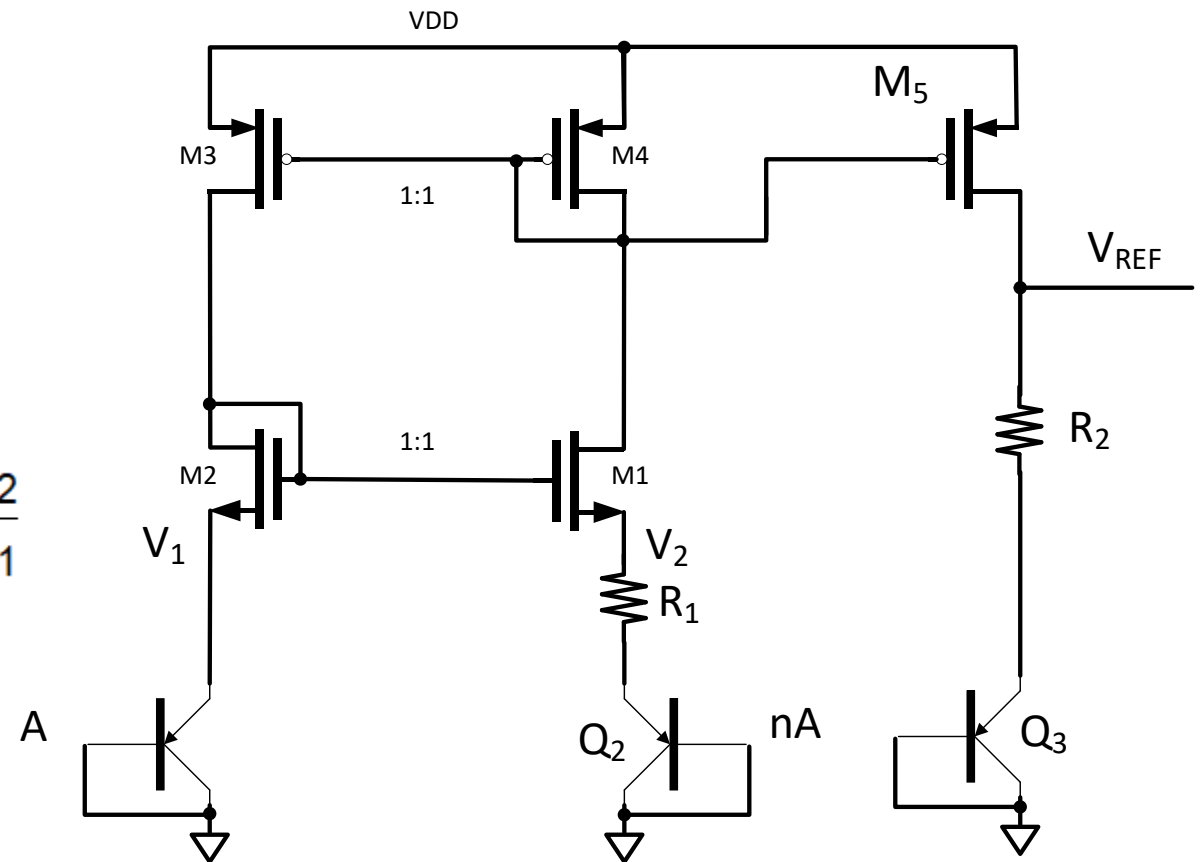
$$I_{REF} = \frac{2 \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{M}} - 1 \right)^2}{R_{REF}^2 \cdot \beta_{M2}}$$



Реализация на схема за генериране на напрежение с „нулев“ температурен коефициент (3)

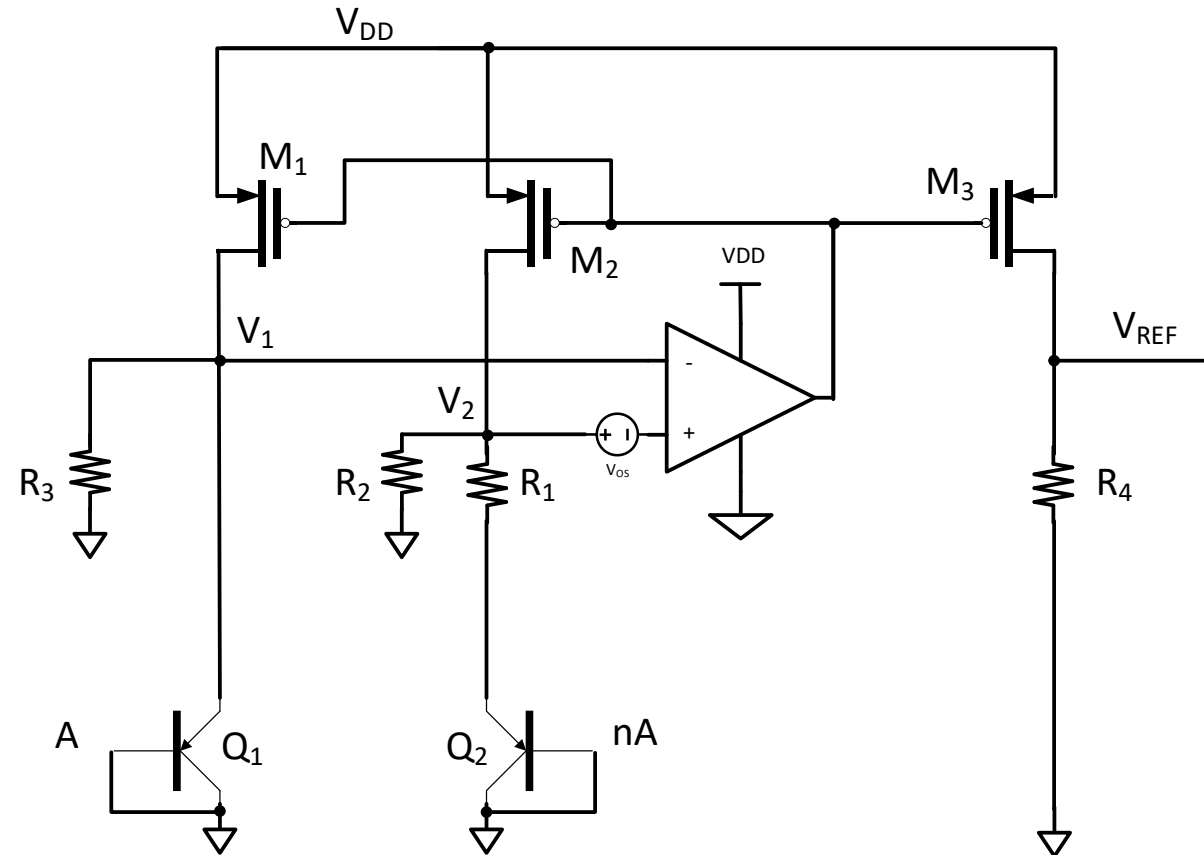
- Възможна е и следната схемна реализация

$$V_{REF} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_1} \cdot R_2 + V_{BE3} = V_{BE3} + (V_T \cdot \ln(n)) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



Нисковолтова реализация на схема за генериране на напрежение с „нулев“ температурен коефициент

- Разглежданите досега схемни решения осигуряват $V_{REF} \sim 1.25V$
- Това може да е неприемливо в случай на нисковолтово проектиране
- В случай че сумираме ток с положителен температурен коефициент и такъв с отрицателен температурен коефициент, бихме могли да получим температурно независим ток, който да създаде пад на напрежение с произволна (желана) стойност



$$V_{REF} = \left(\frac{V_{BE1} - V_{OS}}{R_2} + \frac{V_{BE1} - V_{BE2} - V_{OS}}{R_1} \right) \cdot R_4 = \frac{R_4}{R_2} \cdot \left[V_{BE1} + \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_T \cdot \ln(n)) - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot V_{OS} \right]$$



INSPIRED ENGINEERING