

**СИМУЛЯЦІЯ РОБОТИ ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА  
НА МДН-ТРАНЗИСТОРАХ**

*Роздобудько І.В., Доценко К.В.*

Проектування електричних принципів схем, з метою виробництва мікросхем, пов'язане з вибором моделей елементів. Вибір моделі елемента, де закладені фізичні процеси функціонування, головним чином, визначає роботу та можливості схемотехнічного рішення. Однією із широко використовуваних електричних схем, в мікроелектроніці, є операційний підсилювач (ОП). Оскільки, умови роботи схеми тісно пов'язані з моделлю транзистора, доцільно провести аналіз роботи ОП, побудованого на МДН – транзисторах, які задані відповідною моделлю.

**Теоретичні викладки**

Досліджуваний ОП створено на МДН - транзисторах BSIM3v3.2.2, з топологічним обмеженням в 130 нм. Щоб оцінити можливості даної моделі та її вплив на результат роботи ОП, слід визначити відповідні показники [1,2], а саме:

для *n*- канального МДН – транзистора: порогова напруга  $U_{GST_n} = 0.632$

[В]; рухливість основних носіїв заряду  $\mu_{0_n} = 670.0 \left[ \frac{cm^2}{B \cdot c} \right]$ ; динамічна пе-

редавальна провідність транзистора  $g_{ms} = 77.6 \left[ \frac{мкА}{В} \right]$ ; вольт-амперна ха-

рактеристика цього транзистора зображена на рис. 1;

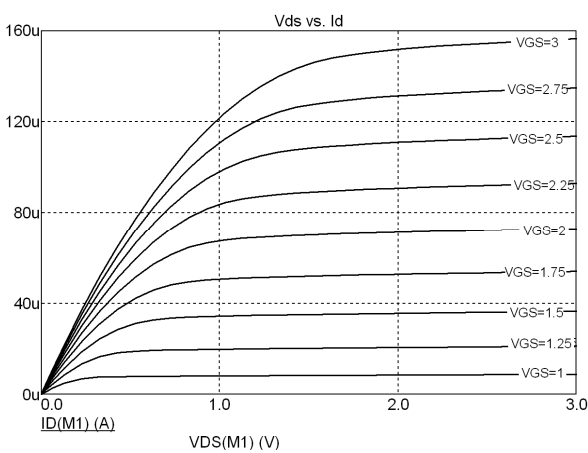


Рис. 1

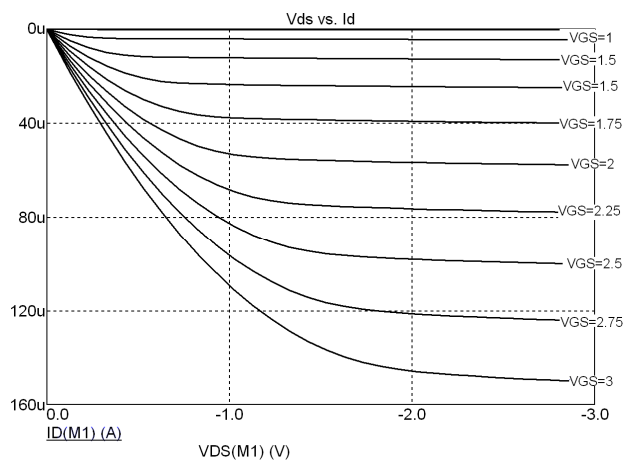


Рис. 2

для *p*- канального МДН – транзистора:

порогова напруга  $U_{GST_p} = -0.673$  [В]; рухливість основних носіїв заряду

$\mu_{0p} = 250.0 \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right]$ ; динамічна передавальна провідність транзистора  
 $g_{ms} = 86.8 \left[ \frac{\text{мкА}}{\text{В}} \right]$ ; вольт-амперна характеристика цього транзистора зображена на рис.2.

Щоб передбачити поведінку роботи ОП, треба розглянути математичні моделі транзисторів [1]. Відповідно до моделі транзистора, струм стік-витік МДН - транзистора розраховують як:

$$I_{DS} = k'(n-1) \cdot U_T^2 \left( 1 - \exp\left(\frac{-U_{DS}}{U_T}\right) \right) \exp\left(\frac{U_{GS} - U_{GST} - U_{OFF}}{n \cdot U_T}\right)$$

де  $k'$  – питома крутість МДН – транзистора;  $n$  – підпороговий коефіцієнт;  $U_{DS}$  – напруга стік-витік МДН-транзистора;  $U_T$  – тепловий потенціал;  $U_{GS}$  – напруга заслін-витік МДН-транзистора;  $U_{GST}$  – порогова напруга МДН-транзистора;  $U_{OFF}$  – параметр, який визначає зміщення порогової напруги за сильної інверсії.

Для розрахунку  $k'$  використовують формулу:  $k' = \mu_0 \frac{W}{L} \frac{\sqrt{\frac{q \varepsilon_{Si} \varepsilon_0 N_{Ch}}{2 \Phi_B}}}{n-1}$ , де  $\mu_0$  – рухливість носіїв заряду;  $W$ ,  $L$  – ширина та довжина каналу польового транзистора МДН структури;  $q$  – заряд електрона;  $\varepsilon_{Si}$  – відносна діелектрична проникність силіцію;  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму;  $N_{Ch}$  – концентрація домішок у каналі;  $\Phi_B$  – поверхневий потенціал силіцію.

Поверхневий потенціал силіцію розраховують за формулою [3]:

$$\Phi_B = \frac{U_{GST} - U_{FB}}{n} - U_0 \quad (1)$$

де  $U_{FB}$  – напруга плоских зон;  $U_0$  – константа.

Напругу плоских зон розраховують як [3]:

$$U_{FB} = U_{GST0} - \Phi_S - K_1 \sqrt{\Phi_S} \quad (2)$$

де  $U_{GST0}$  – порогова напруга, за умови, що напруга основа-витік дорівнює 0,  $\Phi_S = 2\varphi_F$ ,  $\varphi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{Ch}}{n_i}\right)$  – потенціал Фермі ( $n_i$  – концентрація електронів у власному напівпровіднику;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура).

Коефіцієнт  $K_1$  з формули (2) може бути знайдений як

$K_1 = \gamma_2 - 2K_2 \sqrt{\Phi_S - U_{BM}}$ , де  $\gamma_2 = \frac{\sqrt{2q \varepsilon_{Si} \varepsilon_0 N_{SB}}}{C_{ox}}$  – коефіцієнт впливу основи;

$U_{BM}$  – максимальна напруга, прикладена до основи при розрахунку  $U_{GST}$ ;

$$K_2 = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)(\sqrt{\Phi_S - U_{SB}} - \sqrt{\Phi_S})}{2\sqrt{\Phi_S}(\sqrt{\Phi_S - U_{BM}} - \sqrt{\Phi_S}) + U_{BM}}, \text{ де } \gamma_1 = \frac{\sqrt{2q\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 N_{Ch}}}{C_{ox}} \text{ – коефіцієнт}$$

впливу основи біля поверхні;  $U_{SB}$  – напруга витік-основа, при якій товщина

збідненої області дорівнює глибині домішок;  $C_{ox} = \frac{C_d}{n-1}$  – питома ємність

заслону,  $C_d = \sqrt{\frac{q\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 N_{Ch}}{4\phi_F}}$  – ємність збідненого шару;  $U_{SB} = \Phi_S - \frac{qN_{Ch}Xt^2}{\varepsilon_{Si}\varepsilon_0}$

Константу  $U_0$  з формули (1) розраховують за виразом  $U_0 = 2\phi_F \frac{n-1}{n}$ .

Концентрація електронів у власному напівпровіднику визначається як

$$n_i = 1.45 \cdot 10^{16} \left(\frac{T_{nom}}{300}\right)^{1.5} \exp\left(21.556 - \frac{E_g}{2U_T}\right), \text{ де } E_g = 1.16 - \frac{7.02 \cdot 10^{-4} T^2}{T + 1108} \text{ – ши-}$$

рина забороненої зони; тепловий потенціал  $U_T = \frac{kT}{q}$ .

### Результати реалізації

Симуляцію роботи ОП виконували в середовищі MicroCap 9.0.3.0.1 (Spectrum Software).

Використовуючи модель МДН-транзистора BSIM3v3.2.2, був створений ОП з наступними схемотехнічними рішеннями:

Вхідний каскад створено на диференційній парі на n-канальних МДН-транзисторах (M12, M18) та р-канальних МДН-транзисторах (M11, M17) транзисторах (рис.3).

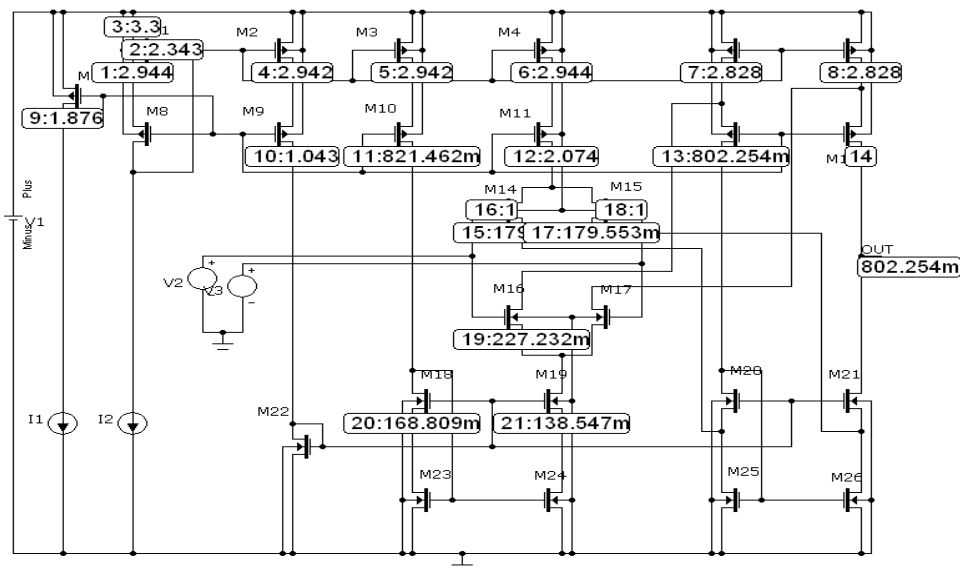


Рис.3. Симуляція роботи схеми за постійним струмом. Вузлові напруги

Основною перевагою використання такої структури є те, що вона дозволяє використовувати широкий діапазон вхідних напруг, від  $U_{SS}$  до  $U_{DD}$ . Тобто, до порогових напруг n-канальних транзисторів будуть функціонувати р-канальні транзистори, і навпаки.

Каскад підсилення побудовано на транзисторах у каскодному вмиканні, для р- канальної диференційної пари (M20, M24) та диференційної пари n- канальних транзисторів (M21, M25), водночас, ці транзистори є частинами схем струмового дзеркала, які створені на транзисторах M19, M20, M23, M24 та M21, M22, M25, M26.

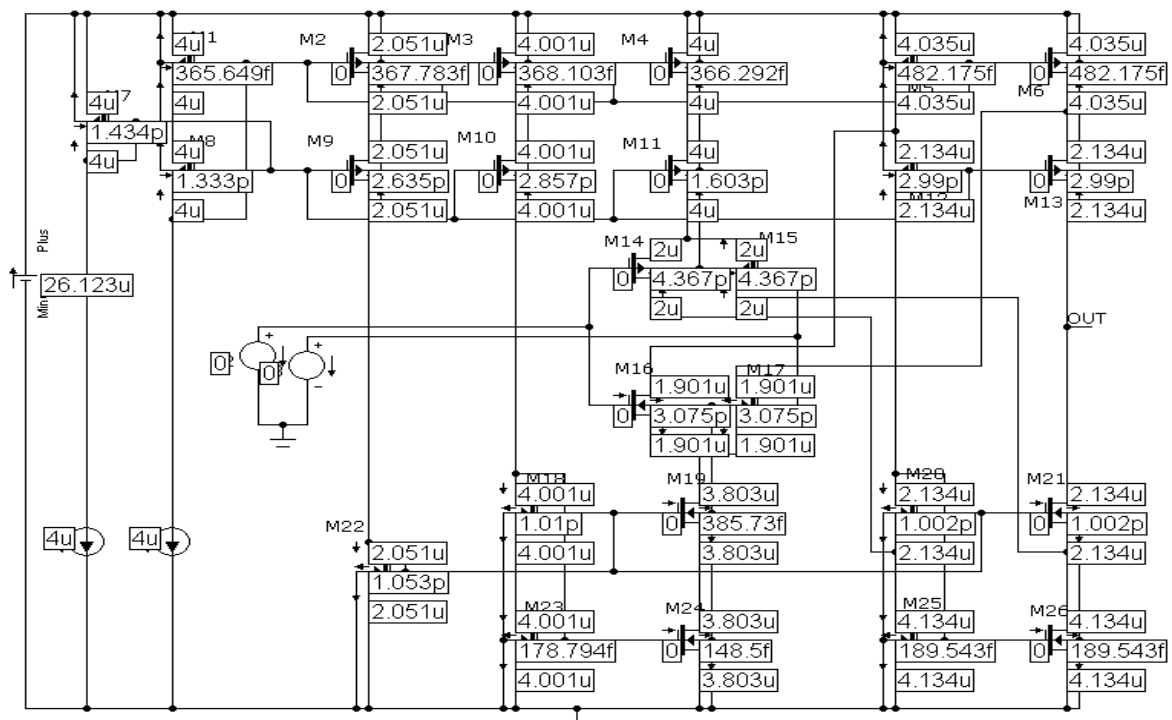


Рис.4 Симуляція роботи схеми за постійним струмом. Струми в гілках.

В схемі присутні наступні джерела напруг і струмів: V1 – джерело напруги живлення (3.3V); V2, V3 – джерела живлення, які задають робочу точку для транзисторів вхідного каскаду ( $U_{GS} = 1$  В), також вони подають сигнали напругою в 10мВ та 100мВ, відповідно; I1, I2 – джерела струму (4мкА).

Для правильної роботи ОП всі транзистори, виходячи з їх математичної моделі, мають знаходитися в активному режимі функціонування. Симуляція роботи схеми за постійним струмом представлена на рис.3 та рис.4. Одними із найважливіших характеристик роботи ОП є амплітудно-частотна і фазочастотна характеристика, що зображені на рис.5. Частотний аналіз показує, що підсилення (близько 60дБ) не змінюється до частоти 50 кГц. Фазове зміщення до 50 кГц незначне.

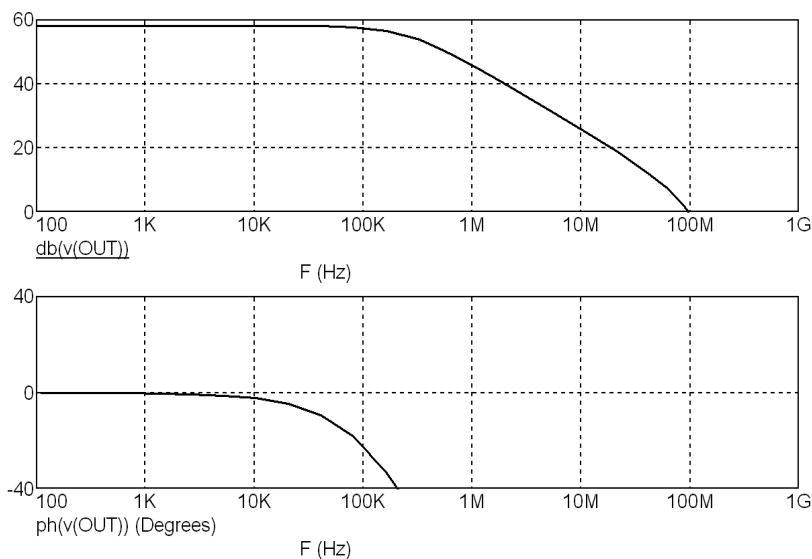


Рис. 5. Частотний аналіз роботи ОП

### Висновки

Симуляція роботи ОП, побудованого на транзисторах моделі BSIM3v3.2.2, показала, що використання даної моделі в побудові ОП дозволяє отримати високі показники по підсиленню (60дБ), незалежність запасу по фазі від частоти (до 50 кГц). При розробці топології необхідно отримати мінімальні паразитні параметри, які впливатимуть на роботу ОП.

### Література

1. Chenming Hu, Weidong Liu, et al., "BSIM3v3.2.2 MOSFET Model. Users' manual", UC Berkley, 1999. 210 p.
2. Gray, Paul R., et al. Analysis and design of analog integrated circuits. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 875 p.
3. R. Jacob Backer, Harry W. Li, David E. Boyce. CMOS Circuit Design, Layout and Simulation. New York : IEEE Press ,inc., 1998. 899 p.
4. Phillip E. Allen, Douglas R. Holberg. CMOS Analog Circuit Design, Second Edition. New York. Oxford University Press, Inc., 2002. 701 p.

*Роздобудько І.В., Доценко К.В. Симуляція роботи операційного підсилювача на МДН-транзисторах. Проведено аналіз параметрів моделі МДН-транзистора; наведені результати симуляції спроектованого операційного підсилювача за параметрами. Ключові слова: операційний підсилювач, модель МДН транзистора.*

*Роздобудько І.В., Доценко К.В. Симуляція роботи операційного усилителя на МОП-транзисторах. Произведен анализ параметров модели МОП-транзистора; приведены результаты симуляции спроектированного операционного усилителя. Ключевые слова: операционный усилитель, модель МОП транзистора.*

*Rozdobudko I., Dotsenko K. Simulation of an operational amplifier based on MOS transistors. The analysis of model's parameters of MOS transistor was carried out; the job contains results of simulation of an operational amplifier. Keywords: operational amplifier, MOS transistor model.*