
Активен товар в CMOS усилвателите

Проектиране на аналогови интегрални схеми

Емил Д. Манолов, edm@tu-sofia.bg, edmanolov@gmail.com
кат. “Електронна техника”, Технически университет - София

Специфични особености при проектиране на CMOS аналогови интегрални схеми

Понастоящем, поради високата си плътност и ниска консумация, CMOS технологията е доминираща при проектирането на интегрални схеми.

Структурата на CMOS аналоговите блокове е подобна на добре известните схеми с дискретни транзистори и пасивни елементи, но тяхната реализация е много по-различна.

При интегрално изпълнение ключовият фактор, определящ цената, е използваната площ на чипа. Най-евтините елементи в интегрално изпълнение са тези, които заемат най-малка площ - транзисторите. Затова в съвременните интегрални схеми усилията са насочени към избягване на използването на резистори и кондензатори с големи стойности. Това води до използването на:

- непосредствени връзки между стъпалата;
- активни (динамични) товари, характеризиращи се със заместване на високоомните товарни резистори с транзистори.

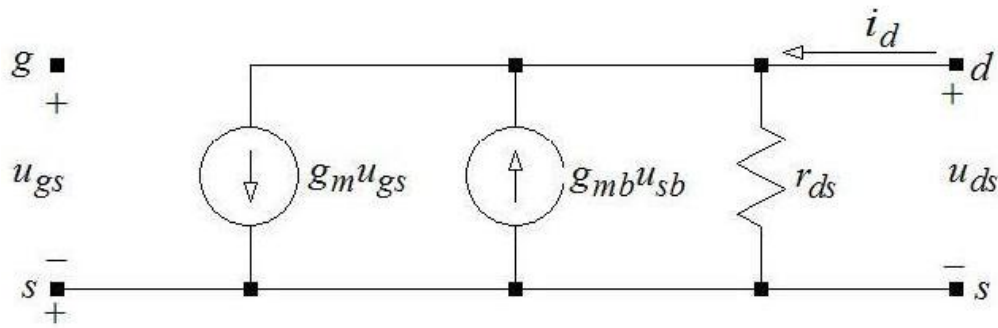
Тези подходи позволяват реализацията на усилватели с голямо усилване и минимална площ на чипа, при използване на нисковолтови захранващи напрежения.

Цели и задачи при изучаването на CMOS аналоговите усилватели

Тази част от учебния курс е посветена на изучаване на основните CMOS едностъпални и многостъпални усилватели. Тя цели да формира у обучавания интуитивно разбиране за функционирането на схемите и да демонстрира и онагледи ефикасни методи за анализ, които да са полезни в бъдещата му практика.

Вниманието е насочено към “ръчния” анализ на схемите на началния етап от проектирането. За целта се използват опростени еквивалентни схеми и формули, без необходимост от използването на специфични софтуерни ресурси. Получените резултати трябва да са ясни, нагледни и лесни за интерпретация, което ще позволи безпроблемното открояване на съществените фактори и зависимости в схемата. Това, заедно със използването на компютърни симулации, дава възможност за ефикасно приложение на итеративни процедури за проектиране на усъвършенствани схемни решения.

Еквивалентна схема на MOS транзистор в областта на насищане за малки сигнали и ниски честоти



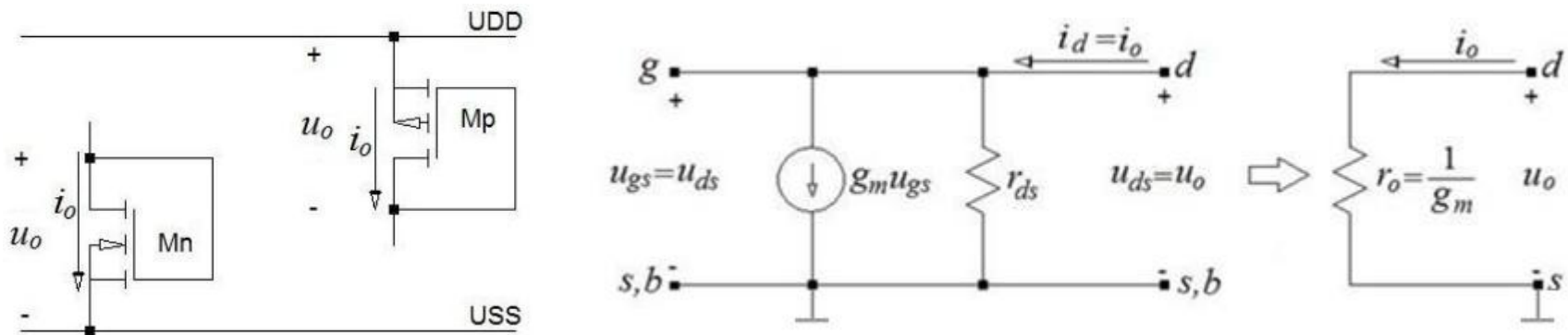
u_{sb}
 b^-

Променлива съставка на дрейновия ток	$i_d = g_m u_{gs} - g_{mb} u_{sb} + \frac{u_{ds}}{r_{ds}}$	(1-1)
Стръмност	$g_m = K_n \frac{W}{L} U_{eff} = \sqrt{2K_n \frac{W}{L} I_D} = \frac{2I_D}{U_{eff}}$	(1-2)
Изходна проводимост	$g_{ds} = \frac{1}{r_{ds}} = \lambda I_{DSAT} \approx \lambda I_D$	(1-3)
Стръмност спрямо подложката	$g_{mb} = \frac{\gamma g_m}{2\sqrt{U_{SB} + 2\phi_F }}$	(1-4)
Емпирични зависимости	$g_m \approx (5 \div 10) g_{mb} \approx (200 \div 500) g_{ds}$	(1-5)

Примерни стойности на нискочестотните малосигнални параметри на MOS транзисторите

Параметри	$K_n = 100 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2}$; $U_{\text{eff}} = 0,2\text{V}$; $\lambda_n = 0,014\text{V}^{-1}$ $\gamma_n = 0,55\text{V}^{1/2}$; $U_{\text{SB}} = 1,65\text{V}$; $ 2\phi_F = 0,6\text{V}$	
	$I_{\text{Dmin}} = 5\mu\text{A}$	$I_{\text{Dmax}} = 200\mu\text{A}$
Стръмност g_m	50 $\mu\text{A/V}$	2mA/V
Изходна проводимост g_{ds}	0,07 $\mu\text{A/V}$	2,8 $\mu\text{A/V}$
Изходно съпротивление r_{ds}	14M Ω	357k Ω
Стръмност спрямо подложката g_{mb}	$\approx 9\mu\text{A/V}$	$\approx 367\mu\text{A/V}$

Динамичен товар с активен резистор при $u_{SB}=0$



Транзисторите работят в силна инверсия, в областта на насищане (гейта и дрейна са свързани директно и условието $U_{DS} > U_{GS} - U_{TN0}$ е изпълнено винаги).

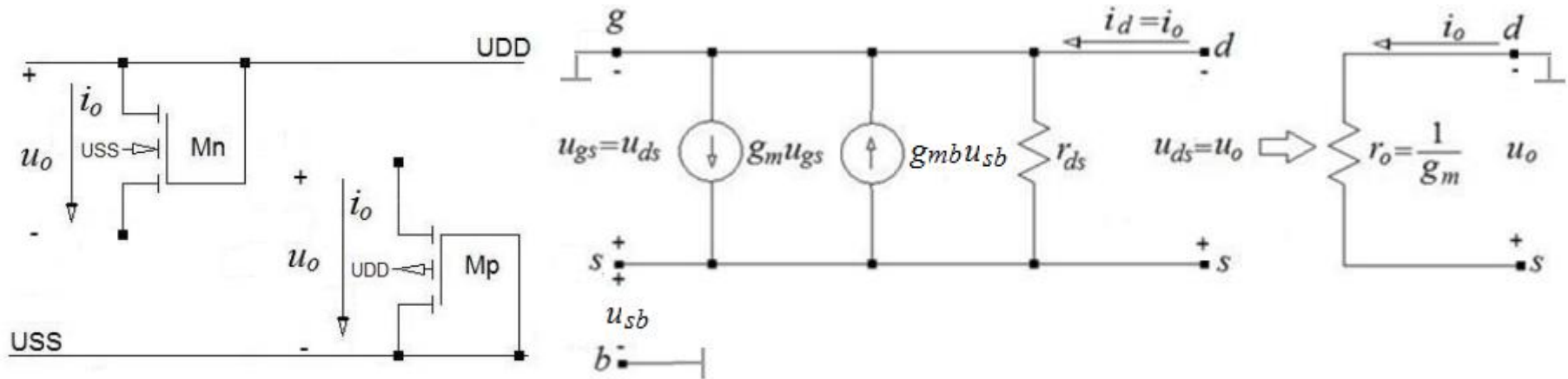
Еквивалентно съпротивление r_o при $u_{SB}=0$

$$i_o = i_d = g_m u_{gs} + g_{ds} u_{ds}$$

$$r_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{u_{ds}}{i_d} = \frac{u_{ds}}{g_m u_{gs} + g_{ds} u_{ds}} = \frac{u_{ds}}{g_m u_{ds} + g_{ds} u_{ds}} = \frac{1}{g_m + g_{ds}} \approx \frac{1}{g_m}$$

при $I_D=5\mu\text{A}$ ($g_m=50\mu\text{A/V}$) $\rightarrow r_o=20\text{k}\Omega$; при $I_D=200\mu\text{A}$ ($g_m=2\text{mA/V}$) $\rightarrow r_o=500\Omega$

Динамичен товар с активен резистор при $u_{SB} \neq 0$

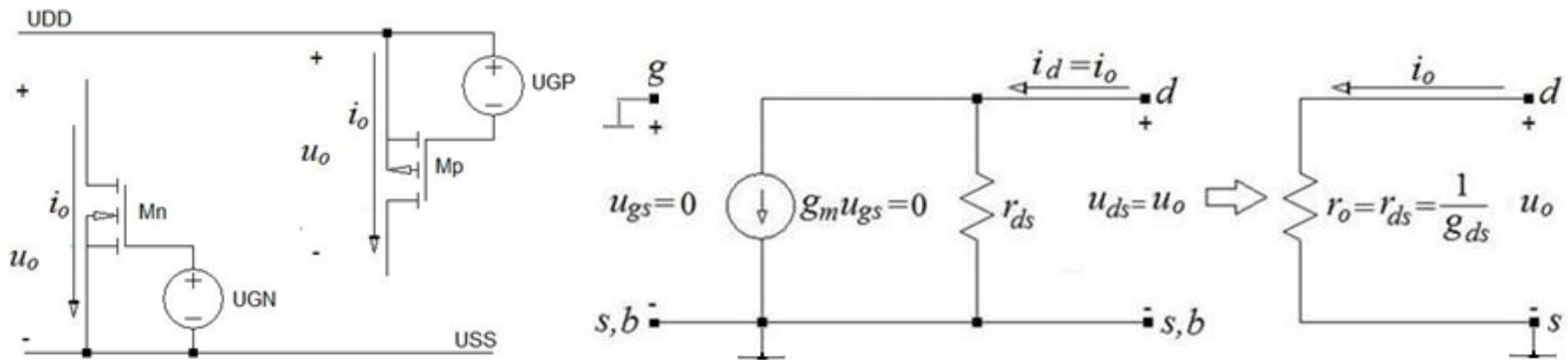


Еквивалентно съпротивление r_o при $u_{SB} \neq 0$

$$r_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{u_{ds}}{i_d} = \frac{u_{ds}}{g_m u_{gs} - g_{mb} u_{sb} + g_{ds} u_{ds}} = \frac{u_{ds}}{g_m u_{ds} + g_{mb} u_{ds} + g_{ds} u_{ds}} = \frac{1}{g_m + g_{mb} + g_{ds}} \approx \frac{1}{g_m}$$

Окончателно и за двата случая: $r_o \approx \frac{1}{g_m}$

Динамичен товар с източник на ток



Еквивалентно съпротивление r_o

За случая $u_{gs} = 0$; $u_{sb} = 0$; $u_o = u_{ds}$

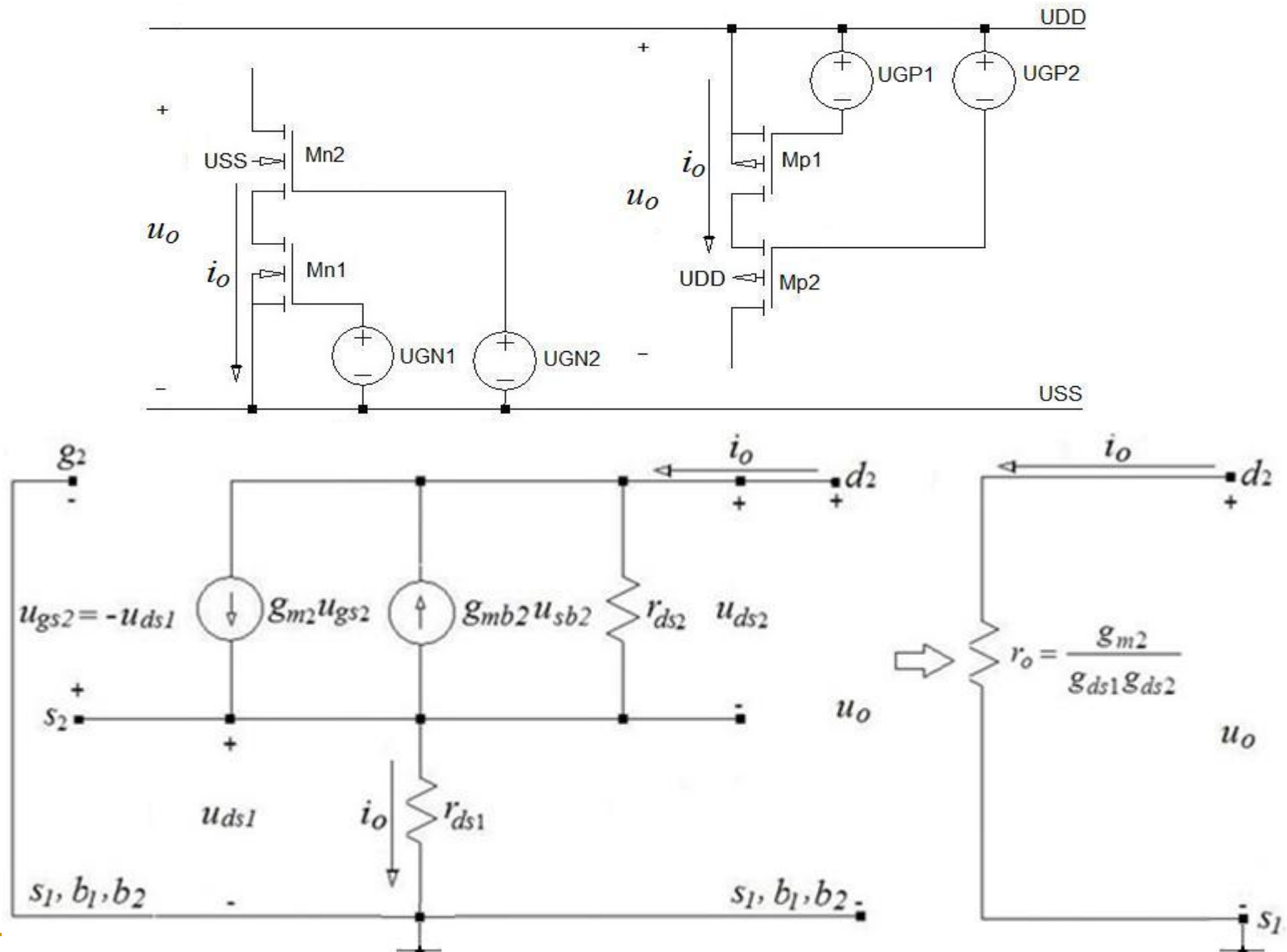
и следователно

$$i_o = i_d = g_m u_{gs} - g_{mb} u_{sb} + g_{ds} u_{ds} = 0 - 0 + g_{ds} u_{ds} = g_{ds} u_{ds}$$

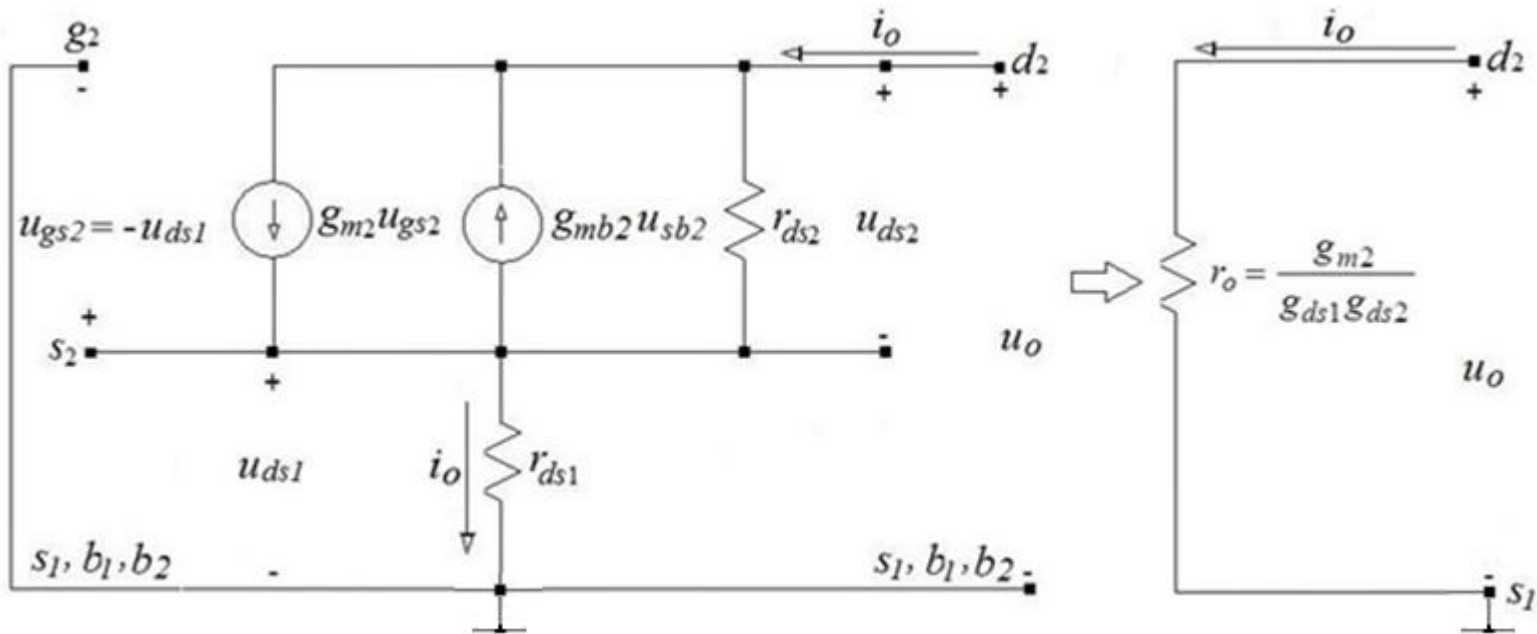
$$r_o = \frac{u_o}{i_o} = \frac{u_{ds}}{i_d} = \frac{u_{ds}}{g_{ds} u_{ds}} = \frac{1}{g_{ds}} = r_{ds}$$

при $I_D = 5\mu\text{A}$, $r_o \approx 14,3\text{M}\Omega$;
при $I_D = 200\mu\text{A}$, $r_o \approx 357\text{k}\Omega$

Динамичен товар с каскоден източник на ток



Динамичен товар с каскоден източник на ток



Определяне на еквивалентното съпротивление r_o

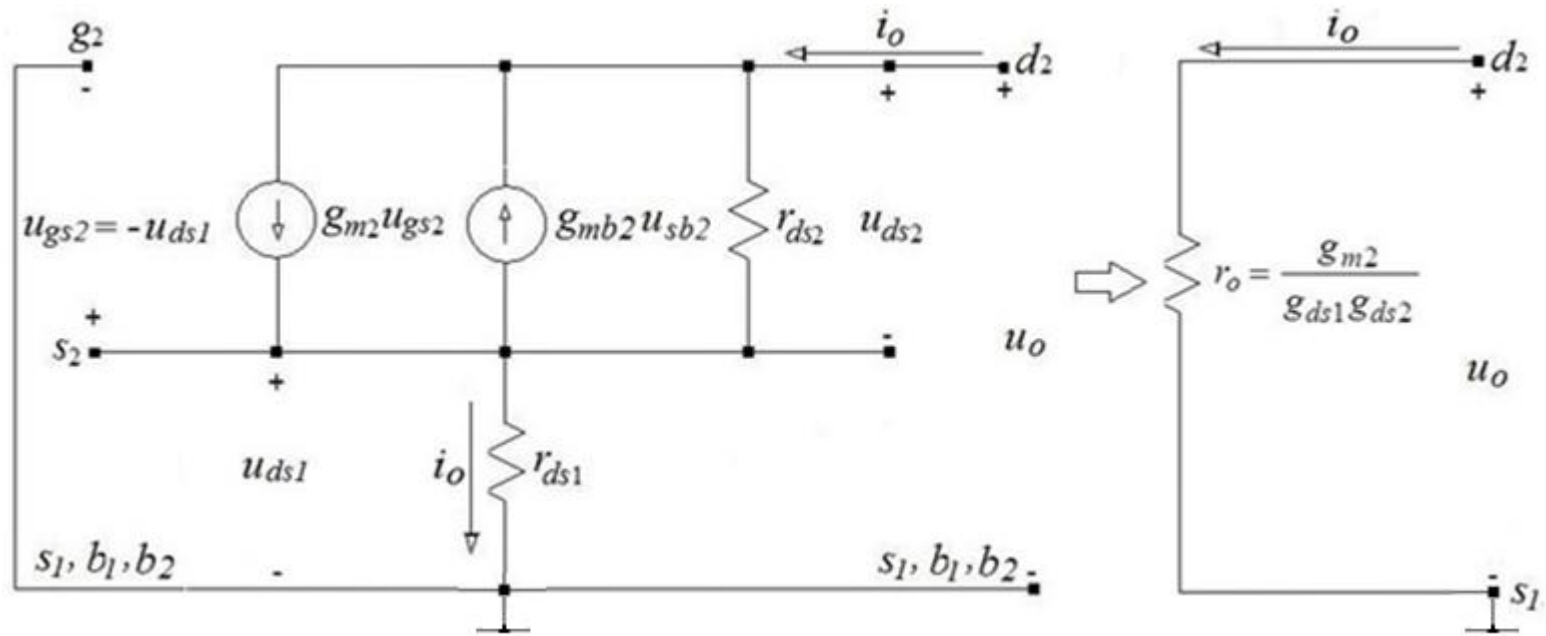
$$u_o = i_o r_{ds1} + (i_o - g_{m2}u_{gs2} + g_{mb2}u_{sb2}) r_{ds2};$$

$$u_{gs2} = -u_{ds1} = -i_o r_{ds1}; \quad u_{sb2} = u_{ds1} = i_o r_{ds1};$$

$$u_o = i_o r_{ds1} + (i_o + g_{m2}r_{ds1}i_o + g_{mb2}r_{ds1}i_o) r_{ds2}$$

$$r_o = \frac{u_o}{i_o} = r_{ds1} + r_{ds2} + (g_{m2} + g_{mb2}) r_{ds1} r_{ds2} \approx (g_{m2} + g_{mb2}) r_{ds1} r_{ds2}$$

Динамичен товар с каскоден източник на ток



$$r_o \approx (g_{m2} + g_{mb2})r_{ds1}r_{ds2} \approx g_{m2}r_{ds1}r_{ds2} = \frac{g_{m2}}{g_{ds1}g_{ds2}}$$

При $I_D = 5\mu A$ $r_o = \frac{g_{m2}}{g_{ds1}g_{ds2}} = \frac{50\mu A/V}{0,07\mu A/V \cdot 0,07\mu A/V} \approx \frac{50}{0,005} V/\mu A = 10G\Omega$

При $I_D = 200\mu A$ $r_o = \frac{g_{m2}}{g_{ds1}g_{ds2}} = \frac{2mA/V}{2,8\mu A/V \cdot 2,8\mu A/V} \approx \frac{2000}{7,84} V/\mu A = 255M\Omega$

Благодаря!
