

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Лабораторна робота з аналогової схемотехніки №3

на тему:

«Дослідження польового МДН транзистора з індукованим n-каналом»

Виконав Дем'янчук Тарас
студент II-го курсу ФЕЛ
гр. ДК-12
Дата виконання: 18.02.2023
Перевірив:
Короткий Є. В.

Хід роботи

1. Досліджено залежності $I_c(U_{зв})$ для n-канального польового МДН транзистора 2N7000.

1.1. Перевірено залежність:

$$I_c = \frac{b}{2} \cdot (U_{зв} - U_{п})^2$$

1.1.1. Для цього побудувати схему, для якої завжди виконується умова $U_{вс} > U_{зв} - U_{п}$. Схема наведена на рисунку нижче:

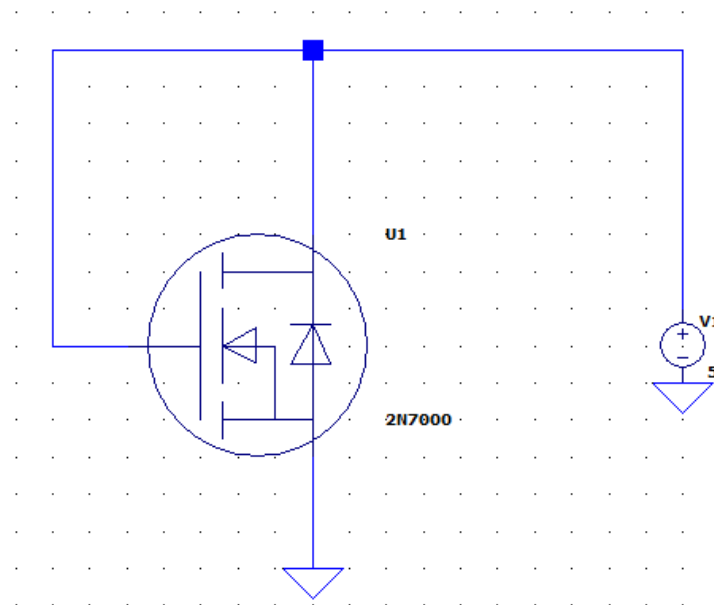


Схема на рисунку вище особлива тим, що у неї затвор закорочений зі стоком, тому завжди справедлива рівність $U_{вс} = U_{зв}$, а отже завжди виконується необхідна нам умова $U_{вс} > U_{зв} - U_{п}$ і транзистор знаходиться в режимі насичення (працює як джерело струму) при будь якій напрузі джерела, яка більша за $U_{п}$.

1.1.2. Одержано залежності $I_c(U_{зв})$ для даного транзистора, поступово збільшуючи напругу $U_{зв}$, яка задається джерелом V1 (від 0 В з кроком 0.1 вольт) і для кожного значення $U_{зв}$ записувалось в таблицю значення струму стоку I_c . Очевидно, що струм стоку почне зростати, після того, як $U_{зв}$ перевищить порогову напругу даного транзистора ($U_{п}$). Напруга $U_{зв}$ збільшувалась до тих пір, доки величина I_c не досягла 20-30 мА.



1.2. Одержати такий графік, як вище(в LTSpice) та записати в таблицю 10 значень струму стоку для 10-ти значень напруги $U_{зв}$ з діапазону від 0 до 2.1В.

$U_{зв}$, мВ	I_d
100	139.07526fA
200	239.88748fA
300	339.80755fA
400	439.72763fA
500	539.6477fA
600	639.17128fA
700	739.88434fA
800	839.01142fA
900	939.72454fA
1000	1.0396446pA
1100	1.1403577pA
1200	1.2418637pA
1300	1.3401978pA
1400	1.4401179pA
1500	1.540038pA
1600	1.641544pA
1700	839.33229μA
1800	3.3159687mA
1900	7.3706699mA
2000	12.947684mA
2100	19.994467mA

1.2.1. Визначено величину порогової напруги транзистора та константу b з формули:

$$I_c = \frac{b}{2} \cdot (U_{зв} - U_{п})^2$$

1.2.2. Розраховано порогову напругу $U_{п}$ наступним чином:

1.2.3. Обрано значення струму стоку $I_{c1} = 10 \text{ mA}$ та зафіксовано значення напруги $U_{зв1}$ при якому через сток протікає такий струм. ($U_{зв1} = 1.95V$).



1.2.4. Обрано значення струму стоку I_{c2} , яке в 4 рази більше за I_{c1} (тобто $I_{c2} = 4I_{c1} = 40 \text{ mA}$). Зафіксовано значення напруги $U_{зв2}$ при якому через сток протікатиме такий струм. ($U_{зв2} = 2.32V$).



1.2.5. Справедливі будуть наступні формули:

$$I_{c1} = \frac{b}{2}(U_{зв1} - U_{\pi})^2$$

$$I_{c2} = 4 \cdot I_{c1} = \frac{b}{2}(U_{зв2} - U_{\pi})^2$$

1.2.6. З формул наведених на попередньому кроці визначено порогову напругу:

$$U_{\pi} = 2U_{зв1} - U_{зв2}$$

$$U_{\pi} = 2 \cdot 1.95 - 2.32 = 1.58 \text{ В}$$

Знаючи порогову напругу визначено коефіцієнт b .

$$I_c = \frac{b}{2} (U_{зв} - U_{п})^2$$

$$U_{п} = 1.58 В; I_c = 10 \mu A = 10^{-2} A;$$

$$U_{зв} = 1.95 В;$$

$$\frac{b}{2} = \frac{I_c}{(U_{зв} - U_{п})^2}$$

$$b = \frac{2 \cdot 10^{-2} A}{(1.95 В - 1.58 В)^2} = 0.15$$

$$b = \frac{2 I_c}{(U_{зв} - U_{п})^2}$$

- 1.3. Записано формулу, що описує струм через транзистор 2N7000 в залежності від $U_{зв}$, підставивши у неї знайдені вище величини:

$$I_c(U_{зв}) = \frac{0.15}{2} (U_{зв} - 1.58)^2$$

- 1.4. Перевірено, чи вірно описує формула знайдена для реальної схеми залежність $I_c(U_{зв})$, одержану під час симуляції:

$$I_c(1.2 В) = \frac{0.15}{2} (1.2 В - 1.58 В)^2 = 0.01083 \mu A$$

$$I_c(1.8 В) = \frac{0.15}{2} (1.8 В - 1.58 В)^2 = 0.00363 \mu A$$

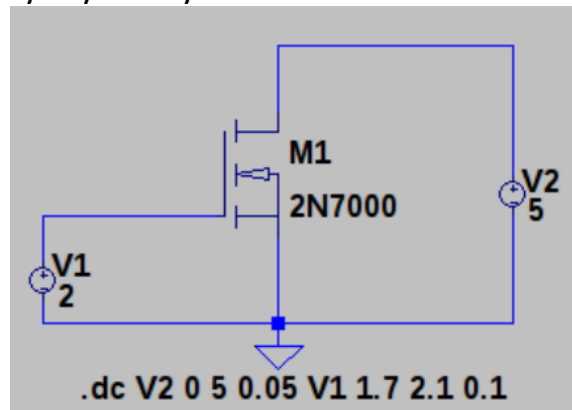
$$I_c(2.1 В) = \frac{0.15}{2} (2.1 В - 1.58 В)^2 = 0.02028 \mu A$$

U _{зв} , мВ	I _d (прктичний замір)	I _d (теоретичний розрахунок)
1.2	1.2418637pA	0.01083A
1.8	3.3159687mA	0.00363A
2.1	19.994467mA	0.02028A

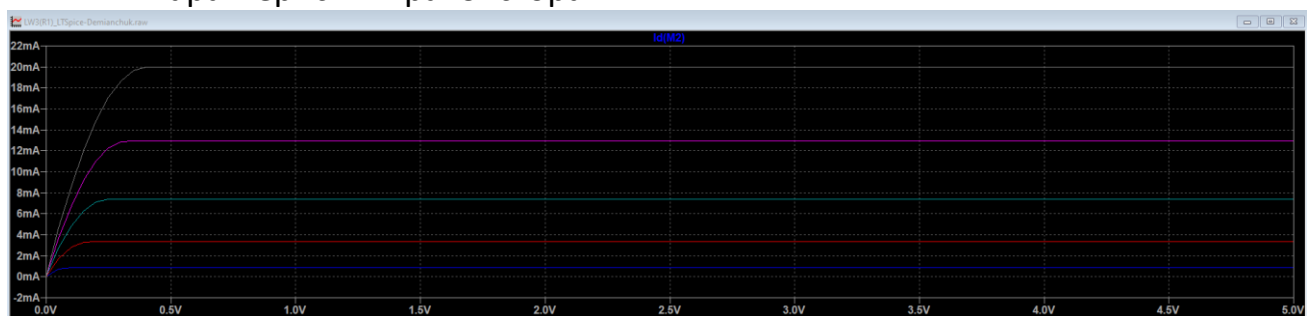
Із таблиці вище видно, що знайдена формула вірна у випадку, коли $U_{зв} > U_{п}$.

2. Досліджено залежності $I_c(U_{bc})$ для n-канального польового МДН транзистора 2N7000.

2.1. Складено наступну схему:



2.2. Варіюючи напругу $U_{зв}$ (джерело V1) в діапазоні від 1.7 до 2.1 В з кроком 0.1 В та варіюючи напругу U_{bc} (джерело V2) в діапазоні від 0 до 5 В з кроком 0.05 В, визначено залежність $I_c(U_{bc})$ для різних значень напруг на затворі, та одержано сімейство вихідних статичних характеристик транзистора:

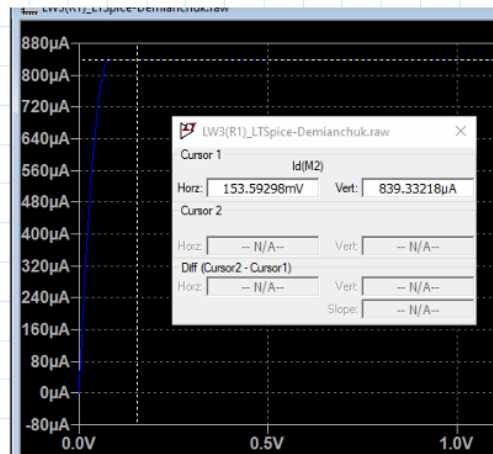


Видно, що чим більша напруга $U_{зв}$, тим вище буде розташований графік залежності $I_c(U_{bc})$, оскільки більше значення напруги на затворі приводить до більшого значення струму стоку.

2.3. Перевірено, що для всіх кривих зупинка росту струму стоку (насичення) наступає за умови $U_{bc} > U_{зв} - U_p$.

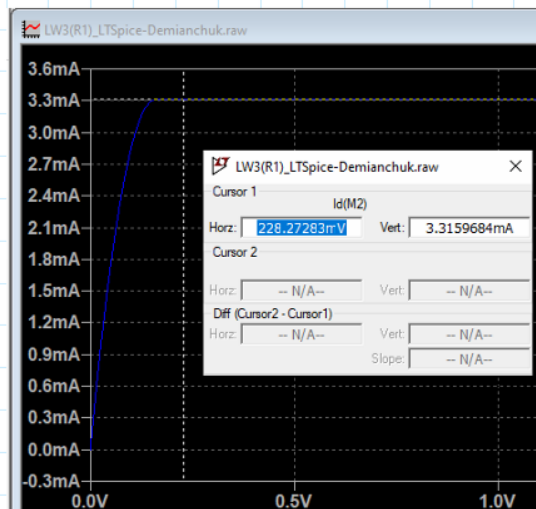
2.3.1. $U_{зв} = 1.7V$

$$0.154\text{ B} > 1.7\text{ B} - 1.58\text{ B} = 0.12\text{ B}$$



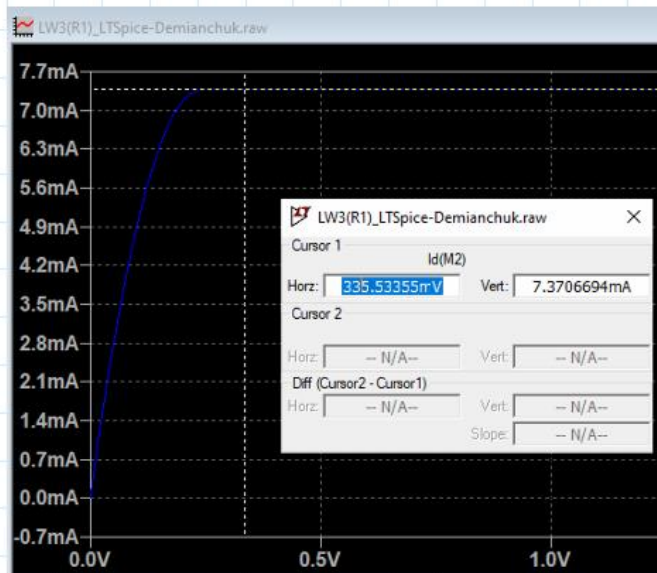
2.3.2. $U_{3B} = 1.8\text{B}$

$$0.228\text{ B} > 1.8\text{ B} - 1.58\text{ B} = 0.22\text{ B}$$



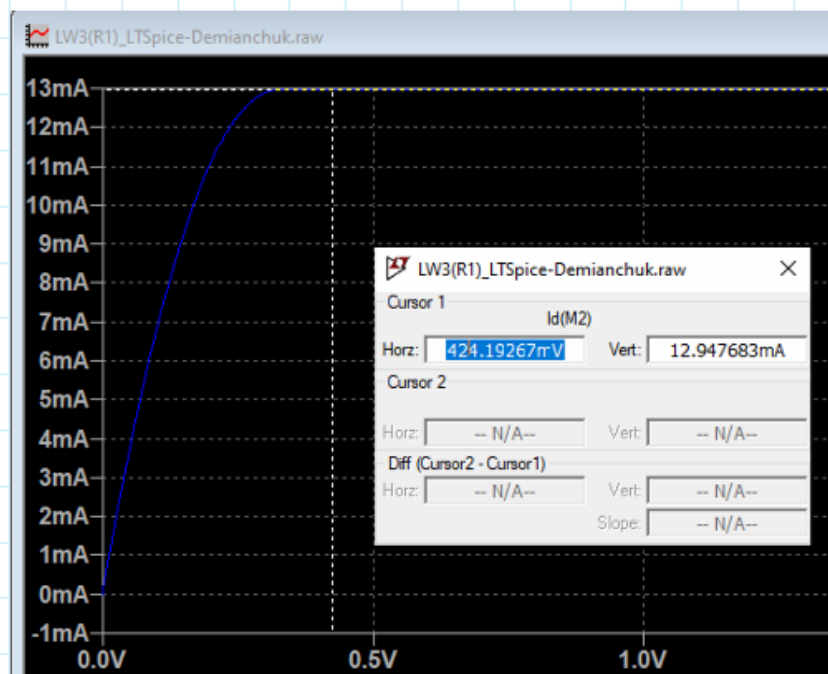
2.3.3. $U_{3B} = 1.9\text{B}$

$$0.335 \text{ B} > 1.8 \text{ B} - 1.58 \text{ B} = 0.32 \text{ B}$$



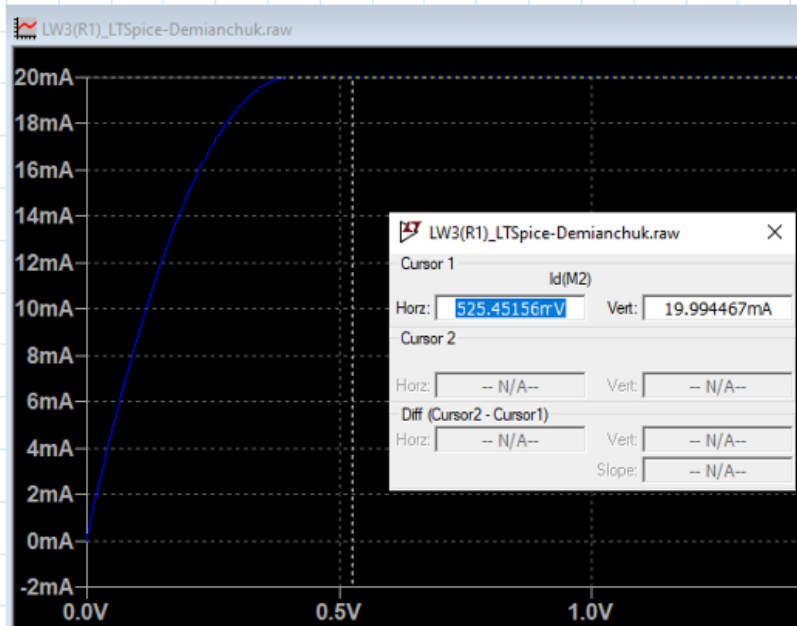
2.3.4. $U_{3B} = 2 \text{ B}$

$$0.424 \text{ B} > 2 \text{ B} - 1.58 = 0.42 \text{ B}$$



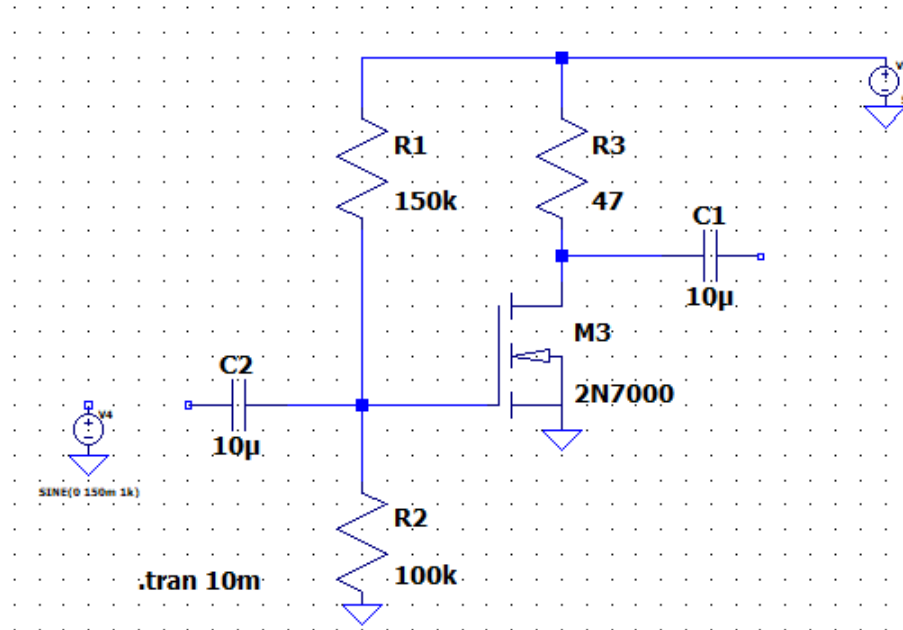
2.3.5. $U_{3B} = 2.1 \text{ B}$

$$0.525 \text{ B} > 2.1 \text{ B} - 1.58 \text{ B} = 0.52 \text{ B}$$

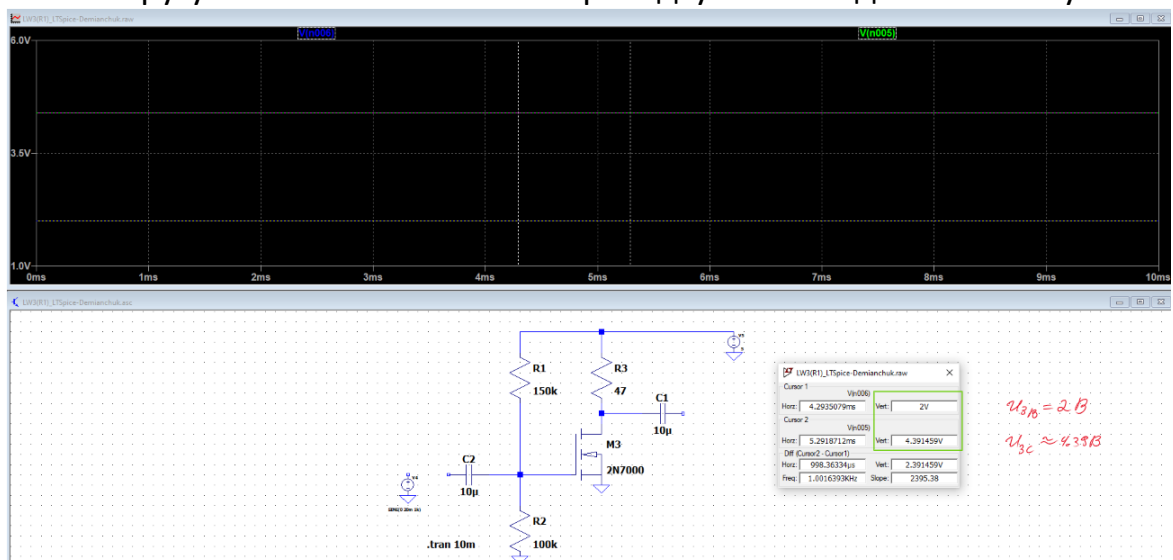


3. Досліджено підсилювач з загальним витоком на польовому МДН транзисторі 2N7000.

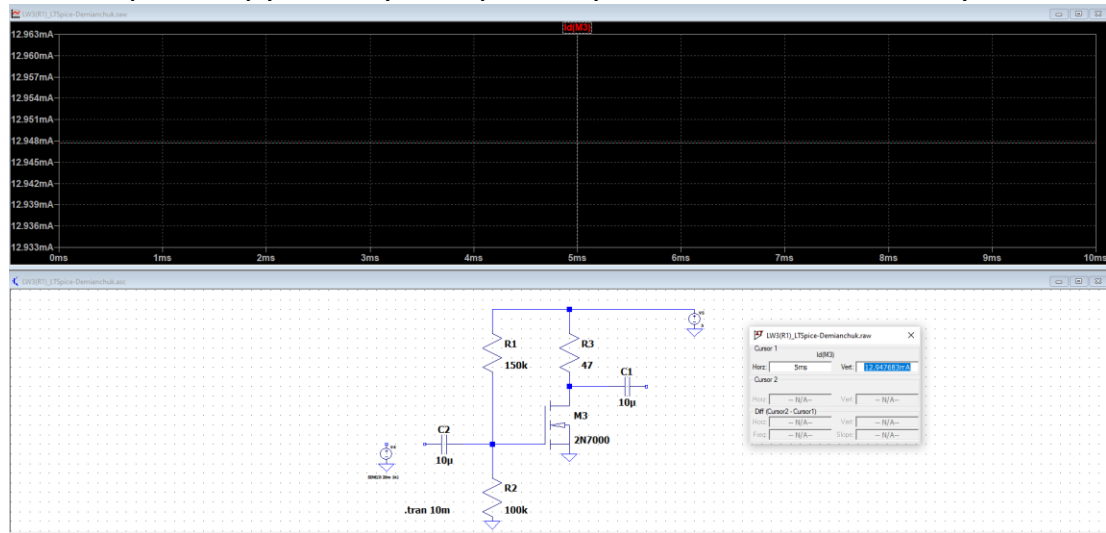
- 3.1. Складено підсилювач з загальним витоком на польовому МДН транзисторі 2N7000. Напруга джерела живлення (V5) становить 5В. Джерелом вхідної напруги (V4) є генератор. Підсилений змінний вихідний сигнал знімається між землею та не підключеним виводом конденсатора C1. (Зазвичай R1 має найбільший опір (порядку 100 КОм), R3 має найменший опір (менше 1.5 КОм). Опір R2 складає кілька десятків КОм.)



- 3.2. Відключено джерело V4 від схеми. Виміряно напругу між затвором і витоком транзистора при відсутності вхідного сигналу. Виміряно напругу між витоком і стоком при відсутності вхідного сигналу.



3.2.1. Виміряно струм стоку I_{c0} при відсутності вхідного сигналу.



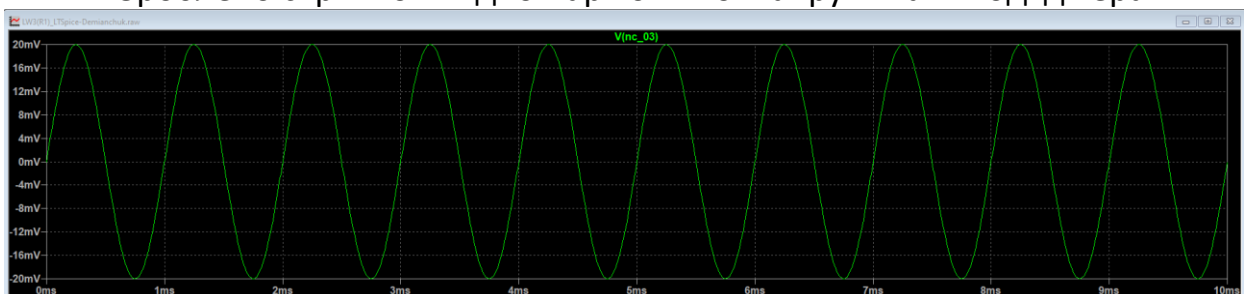
3.2.2. В результаті визначено параметри робочої точки спокою підсилювача, які визначають його коефіцієнт підсилення.

$$U_{зв_0} = 2\text{ В}$$

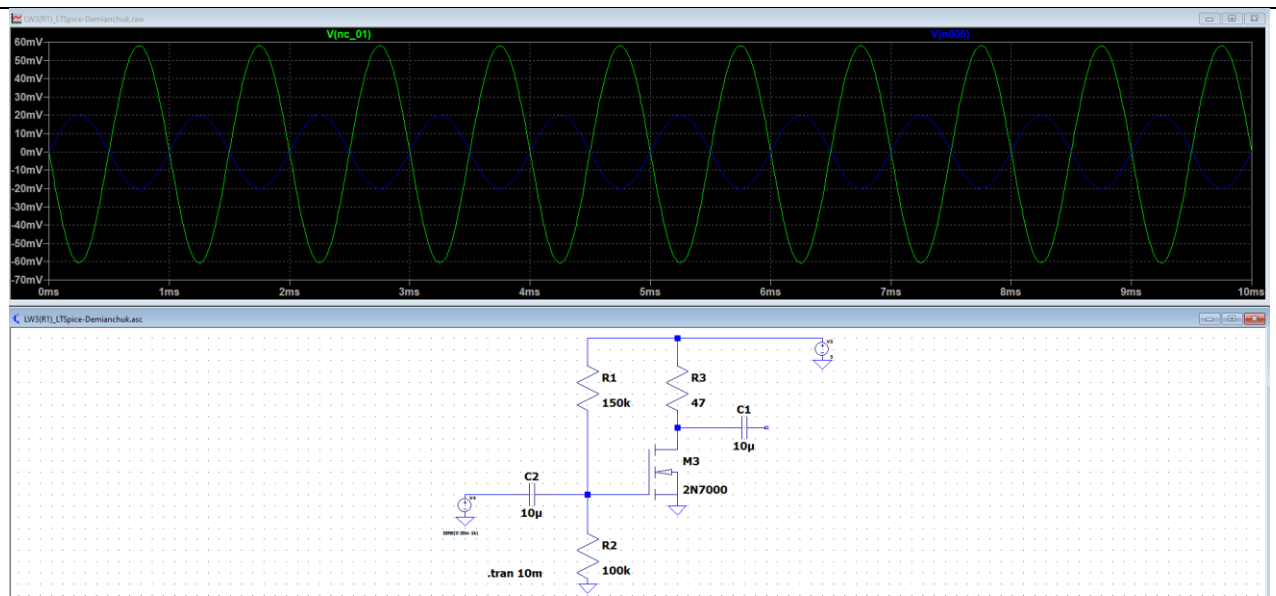
$$U_{вс_0} \approx 4.38\text{ В}$$

$$I_{c_0} \approx 13\text{ }\mu\text{А}$$

3.3. Виставлено на генераторі (джерело V4) гармонічну синусоїдальну напругу вхідного сигналу амплітудою 20 мВ та частотою 1 КГц. Зроблено скріншот вхідної гармонічної напруги на виході джера V4.



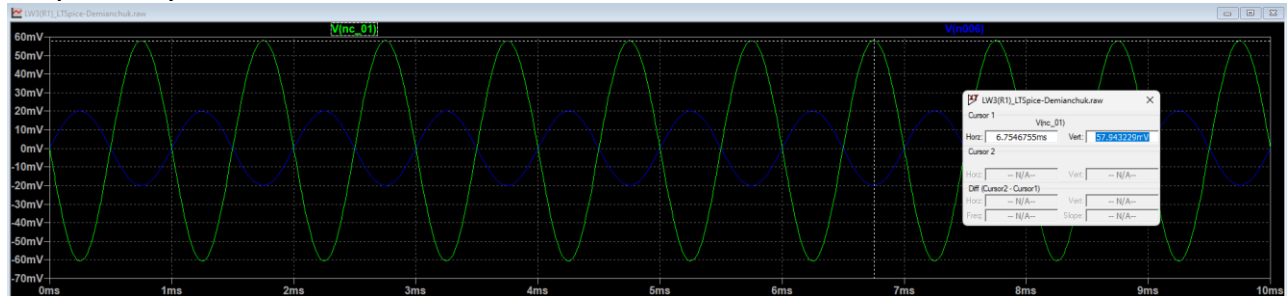
3.3.1. Зроблено скріншот вихідного гармонічного сигналу. Перевірено, що схема зсуває фазу сигналу на 180 градусів.



Із скріншота видно, що даний підсилювач дійсно зсуває фазу на 180 градусів.

3.3.2. Визначено коефіцієнт підсилення за напругою, як відношення амплітуди гармонічного сигналу на виході до амплітуди гармонічного сигналу на вході.

Амплітуда сигналу на вході підсилювача становить -20 мВ, це не складно бачити з скріншоту нижче, а на виході:

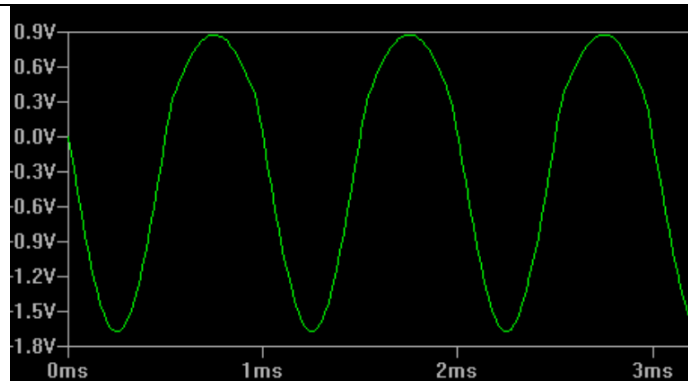


Тому, коеф. підсилення становитиме:

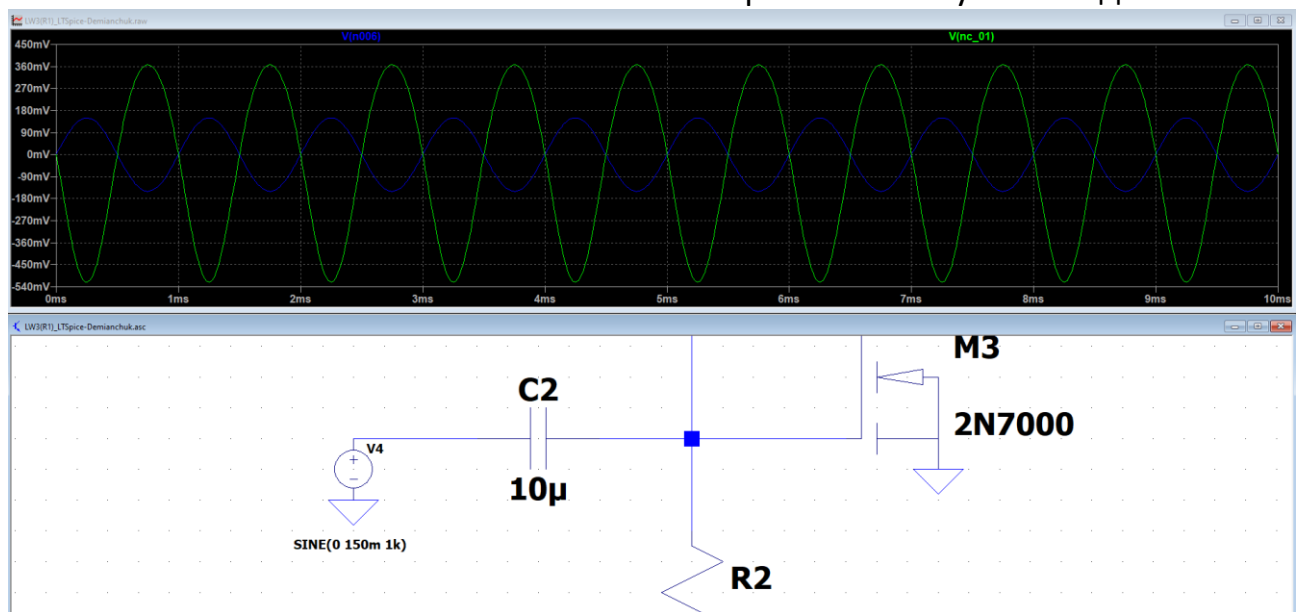
$$K_u = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{58 \text{ мВ}}{-20 \text{ мВ}} \approx -2.9$$

Знак мінус у величині отриманого коеф. підсилення свідчить про те, що досліджуваний підсилювач є інвертуючим.

3.4. Знайдено значення амплітуди гармонічного сигналу на вході, при якій починається спотворення форми вихідного сигналу на виході (форма вихідного сигналу починає відрізнятися від синусоїдальної). Ці спотворення вихідного сигналу можуть виглядати приблизно так:

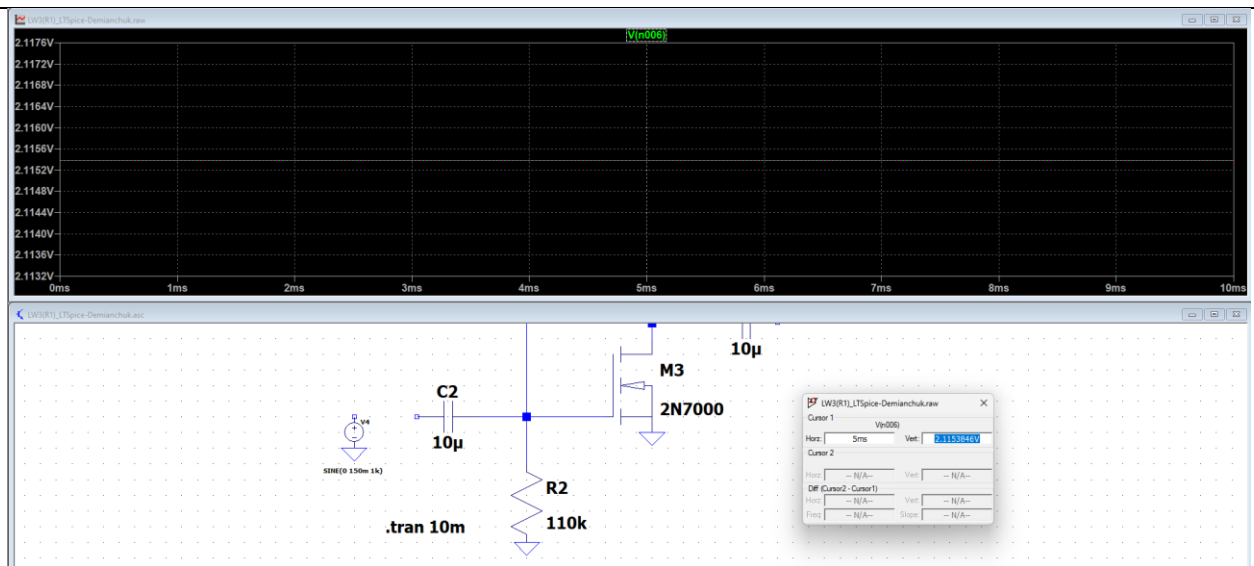


Знайдене значення визначає максимальну величину змінної напруги на вході, при якій схема виходить з лінійного режиму підсилення і починають виникати нелінійні спотворення сигналу на виході.



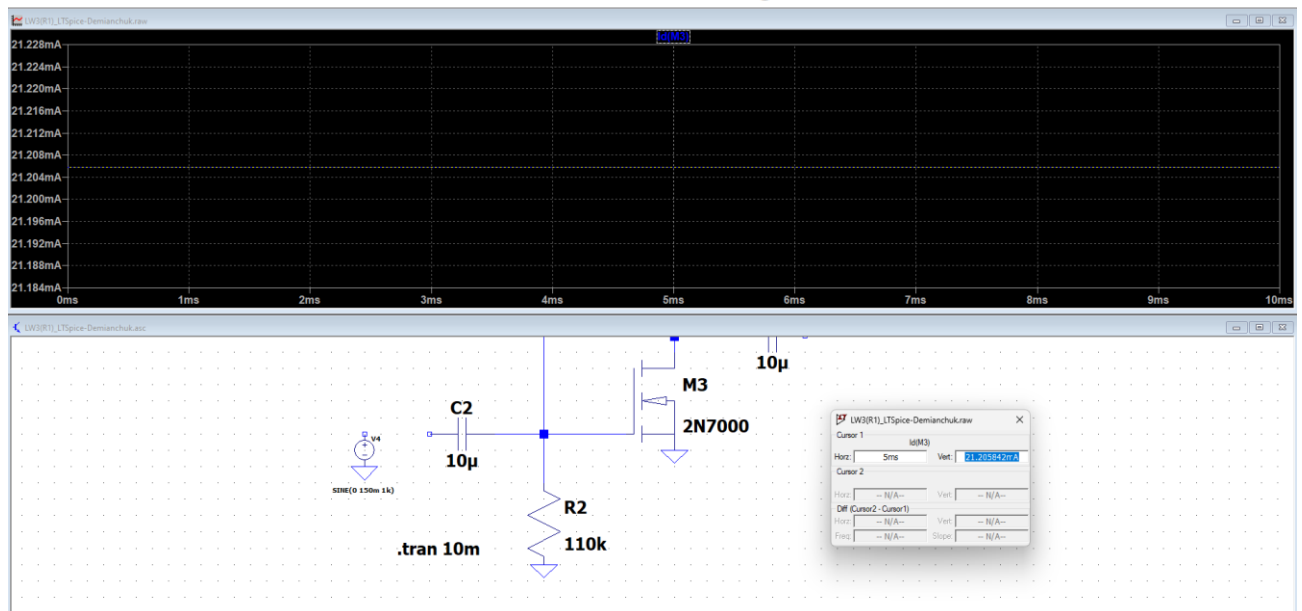
Визначено, що при амплітуді вхідного сигналу рівної 150мВ на виході підсилювача спостерігаються нелінійні спотворення.

- 3.5. Визначено передаточну провідність транзистора g_m для обраної робочої точки спокою. Збільшивши напругу між затвором і витоком на $\Delta U_{зв}$ (0.05...0.2 В) шляхом збільшення опору резистору R2.



Далі знайдено нове значення струму стоку:

$$I_{c1}(U_{3B0} + \Delta U_{3B})$$



Далі розраховано $\Delta I_c = I_{c1} - I_{c0}$: $\Delta I_c = I_{c1} - I_{c0} = 21.2\text{mA} - 13\text{mA} = 8.2\text{mA}$

Після цього знайдено передаточну провідність за формулою:

$$g_m = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{3B}} = \frac{0,0082\text{ A}}{2.11513 - 2.13} \approx 0.071\text{ C}_m$$

Передаточну провідність також розраховано за формулою:

$$g_m = b \cdot (U_{зв0} - U_{п})$$

величини b та $U_{п}$ були визначені в минулих завданнях:

$$g_m = b \cdot (U_{зв0} - U_{п}) = 0.15 (2 В - 1.58 В) \approx 0.063 Сл$$

Отримані в результаті значення провідності дещо відрізняються між собою, це викликано тим, що деякі величини при замірах в LTSpice округлювались, але, навіть не зважаючи на це, видно, що значення доволі сильно схожі, що свідчить про правильність втканої роботи.

- 3.6. Розраховано теоретичний коефіцієнт підсилення за напругою даної схеми за формулою

$$K_U = \frac{u_{вих}}{u_{вх}} = -R_3 \cdot g_m$$

Порівняно розраховане значення з коефіцієнтом передачі за напругою, який раніше був визначений експериментально.

$$K_u = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} \approx -2.9$$

$$K_u = -R_3 \cdot g_m = -470 \Omega \cdot \left| \begin{array}{l} 0.071 Сл \approx -3.337 \\ 0.063 Сл \approx -2.961 \end{array} \right.$$

Не складно бачити, що визначений експериментально коеф. передачі практично дорівнює тому, що був визначений теоретично, а особливо тому, при розрахунку якого було використано g_m , яке також було розраховано теоретично. У будь-якому разі отримані відмінності незначні, тому можна вважати, що проведені заміри та обрахунки було виконано вірно.

Висновок

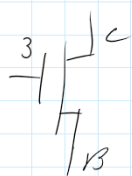
Виконуючи дану лабораторну роботу було досліджено/перевірено/отримано:

1. Залежність $I_c(U_{зв})$ для n-канального польового МДН транзистора 2N7000. Також було помічено, що отримана в результат роботи формула для залежності $I_c(U_{зв})$ виявилася досить точною.
2. Сімейство вихідних статичних характеристик транзистора, а також перевірено, що для всіх кривих зупинка росту струму стоку (насичення) настає за умови $U_{вс} > U_{зв} - U_{п}$.
3. Досліджено підсилювач з загальним витоком на польовому МДН транзисторі 2N7000. Визначено параметри робочої точки спокою підсилювача, які визначають його коефіцієнт підсилення. Визначено коефіцієнт підсилення за напругою. Визначено передаточну провідність транзистора g_m для обраної робочої точки спокою. Розраховано теоретичний коефіцієнт підсилення за напругою.

Контрольні запитання та відповіді на них.

1. Намалюйте умовне графічне позначення польового МДН транзистора з індукованим n-каналом та позначте його контакти;

Польовий МДН транзистор з індукованим n-каналом



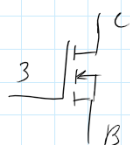
3-затвор (gate)

C-стіле (source)

B-випок (drain)

} познач на з'єднувальн. схемі

МДН - метал - діелектрик - напівпровідник



← познач на вимізуваннях схемі

2. Напишіть формулу залежності $I_c(U_{bc})$ для польового МДН транзистора з індукованим n-каналом в триодному режимі;

$$I_c = b \cdot \left[(U_{зп} - U_n) \cdot U_{bc} - 0.5 \cdot U_{bc}^2 \right] \approx b \cdot (U_{зп} - U_n) \cdot U_{bc} = \frac{U_{bc}}{R_K}$$

натурна ємність між затвором та каналом

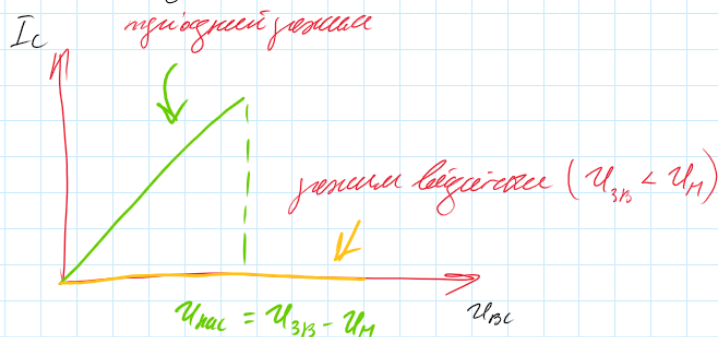
const = $\frac{1}{R_K}$

$b = \mu \cdot C_o \cdot \frac{W}{L}$ $\left\{ \begin{array}{l} \mu \text{ - швидкість} \\ C_o \text{ - ємність} \end{array} \right\}$ $\left\{ \begin{array}{l} W \text{ - ширина} \\ L \text{ - довжина} \end{array} \right\}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{каналу} \\ \text{затвору} \end{array} \right\}$

↑ швидкість електронів в каналі між випоком і стілею

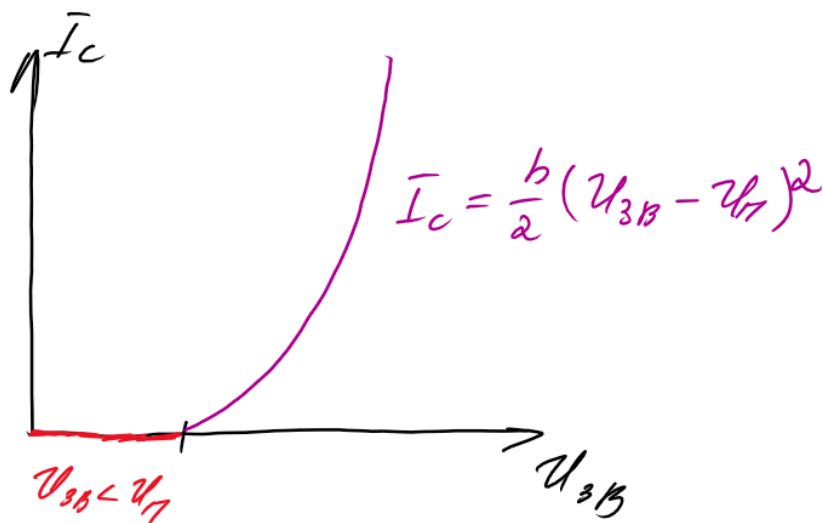
$$R_K(U_{зп}) = \frac{1}{b \cdot (U_{зп} - U_n)}$$

залежить від констатції польового транзистора і це буде загальна константа. Нормо, випоківм електронів польовий транзистор і він він буде ка - це являється постійним і незмінним погр. b.



$$0 < U_{bc} < U_{nac} = U_{зп} - U_n \text{ - триодний режим}$$

3. Намалюйте залежність струму стоку від напруги між затвором і витоком для польового МДН транзистора з індукованим n-каналом;

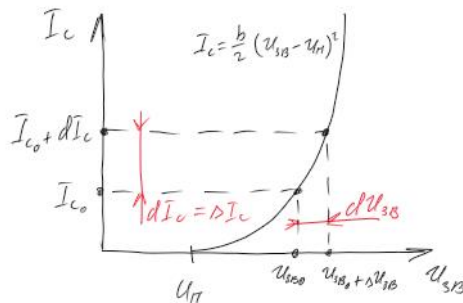


4. Що таке передаточна провідність польового МДН транзистора з індукованим n-каналом? Поякій формулі її можна розрахувати? Як її визначити з графіку залежності $I_c(U_{zB})$?

$$g_m = \left. \frac{\Delta \bar{I}_c}{\Delta U_{зБ}} \right|_{\Delta U_{зБ} \rightarrow 0} = \frac{d\bar{I}_c}{dU_{зБ}}$$

↑
перехідна провідність

Перехідна провідність показує наскільки зростає струм каналу, якщо $U_{зБ}$ змінює на нескінченно малий величину



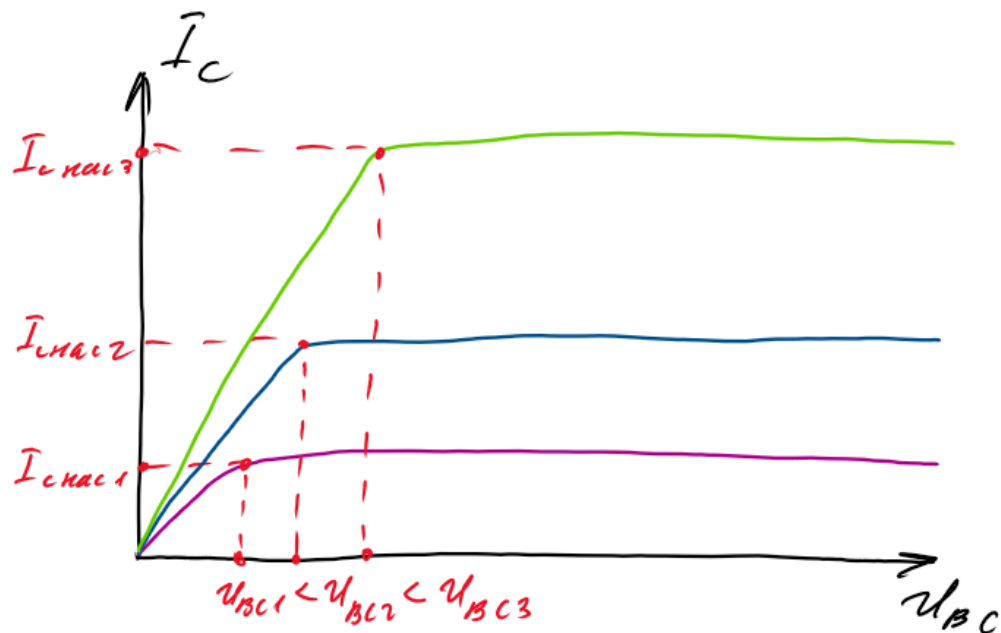
$$! \quad d\bar{I}_c = \Delta \bar{I}_c \quad \left| \quad dU_{зБ} = \Delta U_{зБ} \rightarrow 0 \right.$$

Визначення провідності струм каналу до напруги затвору і між витоком і каналом, який визначає струм каналу, називається перехідною провідністю

$$\begin{aligned} I_c &= \frac{b}{2} (U_{зБ} - U_{П})^2 \Rightarrow \frac{d\bar{I}_c}{dU_{зБ}} = \frac{d}{dU_{зБ}} \left(\frac{b}{2} (U_{зБ}^2 - 2U_{зБ}U_{П} + U_{П}^2) \right) = \\ &= \frac{d}{dU_{зБ}} \left(U_{зБ}^2 \cdot \frac{b}{2} - 2U_{зБ}U_{П} \cdot \frac{b}{2} + U_{П}^2 \frac{b}{2} \right) = U_{зБ} \cdot b - U_{П} \cdot b = b(U_{зБ} - U_{П}) \end{aligned}$$

$$g_m = \left. \frac{\Delta \bar{I}_c}{\Delta U_{зБ}} \right|_{\Delta U_{зБ} \rightarrow 0} = \frac{d\bar{I}_c}{dU_{зБ}} = b(U_{зБ} - U_{П})$$

5. Намалюйте залежність струму стоку від напруги між витоком і стоком польового МДН транзистора з індукованим n-каналом для різних значень напруг між витоком і затвором;



6. Яку умову необхідно виконати, щоб між витокom і стокom польового МДН транзистора з індукованим n-каналом почав протікати струм?

$U_{зв} < U_n$ - умова в режимі відкриття \Rightarrow
 $\Rightarrow I_c = 0 \Rightarrow I_c \neq 0 \Leftrightarrow \underline{U_{зв} > U_n}$

7. Від чого залежить опір каналу польового МДН транзистора з індукованим n-каналом?

Підвищений струм - струм в режимі напівового МДН
 транзистора поводиться собі як резистор

$$\begin{cases} U_{зп} > U_{п} \\ U_{зс} < U_{нас} \\ U_{нас} = U_{зп} - U_{п} \end{cases} \Rightarrow U_{зс} < U_{зп} - U_{п}$$

В такому випадку напівовий транзистор буде виступати як резистор. Щобто I_c буде залежати від $U_{зс}$ лінійно.

$$I_c = b \cdot [(U_{зп} - U_{п}) \cdot U_{зс} - 0,5 \cdot U_{зс}^2] \approx b \cdot (U_{зп} - U_{п}) \cdot U_{зс} = \frac{U_{зс}}{R_K}$$

нормальна ємність між затвором та каналом

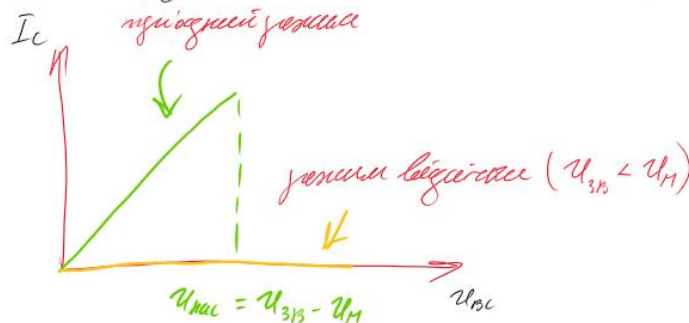
$$b = \mu \cdot C_o \cdot \frac{W}{L}$$

μ - швидкість заряду
 C_o - ємність
 W - ширина
 L - довжина

$$const = \frac{1}{R_K}$$

$$R_K(U_{зп}) = \frac{1}{b \cdot (U_{зп} - U_{п})}$$

залежить від конструкції напівового транзистора і це буде залежати від конструкції. Щобто, виходячи з напівового транзистора і він буде ха - це залежить від конструкції і розмірності коду. b .



8. Що таке порогова напруга польового МДН транзистора з індукованим п-каналом?

Порогова напруга – це така напруга між затвором і виток, при досягненні якої між витком та стоком польового МДН транзистора починає протікати струм.

9. Чому дорівнює струм затвору для польового МДН транзистора з індукованим п-каналом?

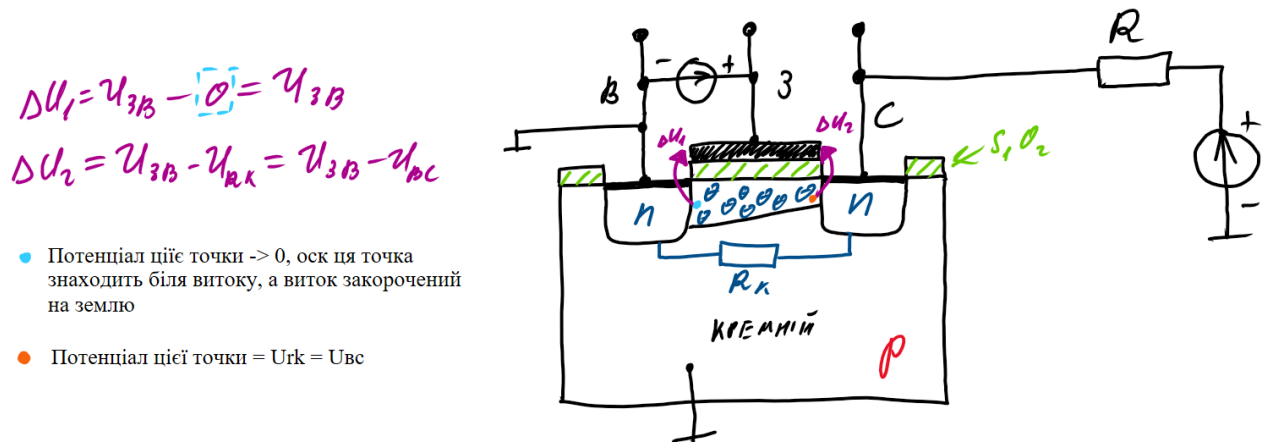
Під час подачі напруги на затвор та виток польового транзистора через нього починає протікати струм заряду затвору і цей струм швидко зменшується і згодом стає рівним нулю, оскільки виводи затвор та виток польового транзистора при детальнішому розгляді являють собою виводи "затворного"

конденсатора малої ємності. Після того, як перехідні процеси завершилися через виводи затвор та виток струм перестає протікати (ситуація еквівалентна до повного заряду конденсатора).

10. Чому дорівнює вхідний опір польового МДН транзистора з індукованим n-каналом?

Вхідний опір, тобто опір між выводами затвор-виток польового МДН транзистора є дуже великим, оскільки це впливає з конструкції самого транзистора і по факту виводи затвор-виток є выводами “затворного” конденсатора, а конденсатор, який зарядився, характеризується великим опором, або – розривом кола. І в польовому МДН транзисторі через “затворний” конденсатор, як і в звичайному конденсаторі, може протікати лише незначний струм втрат, яким у переважній більшості випадків нехтують.

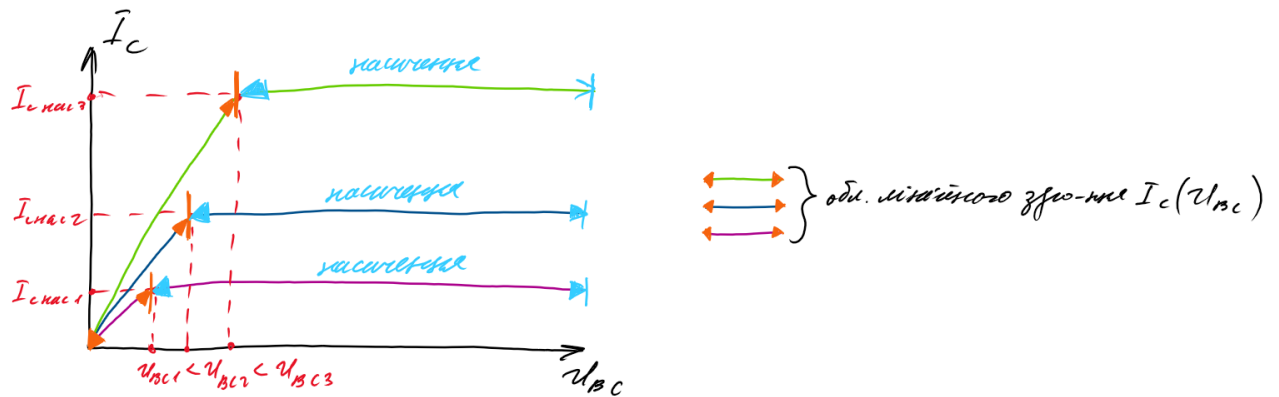
11. Намалуйте конструкцію польового МДН транзистора з індукованим n-каналом.



12. Чому дорівнює опір каналу відкритого польового МДН транзистора?

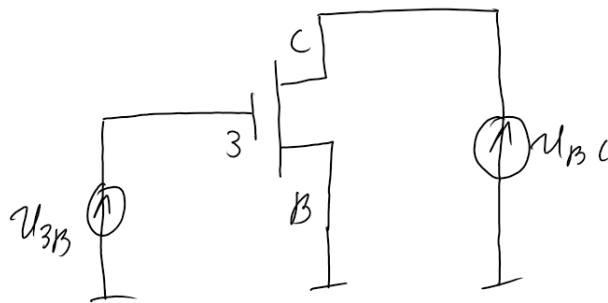
Опір каналу відкритого польового МДН транзистора приймає дуже малі значення якими в процесі більшості розрахунків можна знехтувати, тому можна сказати, що опір каналу відкритого польового МДН транзистора прямує до нуля.

13. Позначте область лінійного зростання струму та область насичення на графіку залежності $I_c(U_{рс})$.



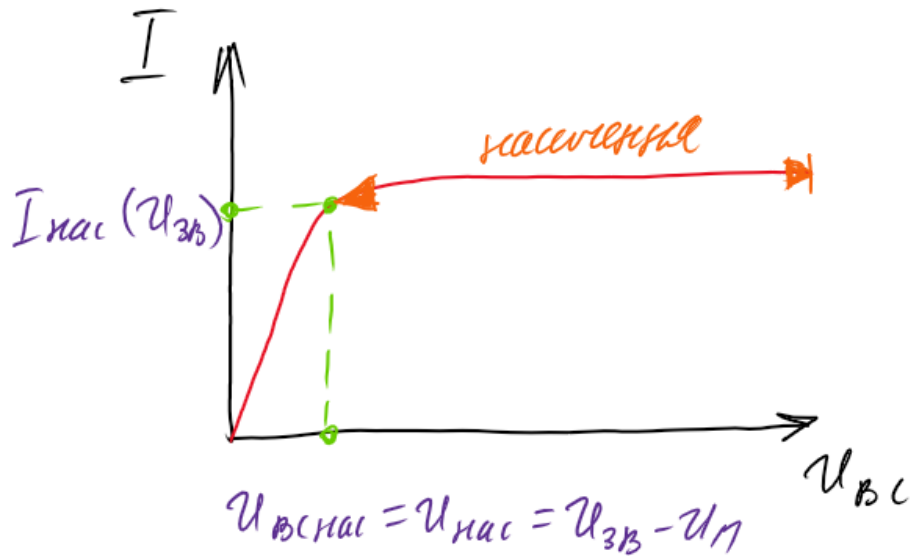
14. Що таке режим відсічки польового МДН транзистора з індукованим п-каналом?

Режим відсічки польового МДН транзистора з індукованим п-каналом – це режим за якого через п-канал не протікає струм.



$$\begin{cases} U_{GB} < 0 \\ U_{GB} < U_{th} \\ U_{th} \in [0.6 \div 10] \text{ В} \end{cases} \Rightarrow \underline{I_c = 0}$$

15. При якій напрузі U_{CE} струм I_c досягає насичення і далі не збільшується?



16. За яких умов польовий МДН транзистор з індукованим n-каналом можна замінити керованим джерелом струму?

Замінити польовий МДН транзистор джерелом струму можна тоді, коли він працює в режимі насичення.

17. Що таке робоча точка спокою підсилювача на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом? Які струми і напруги характеризують цю робочу точку? Як їх задати?

Робоча точка спокою підсилювача на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом – це така точка, відносно якої невеликим змінам $U_{ЗВ}$ відповідатиме лінійна зміна струму стоку.

Робочу точку спокою характеризують: струм I_{C0} , напруга $U_{ЗВ0}$ та напруга $U_{ВС0}$. $I_{C0}(U_{ЗВ0})$, $U_{ЗВ0}$ – це така напруга, за якої зміна струму I_{C0} буде лінійною при зміні напруги $U_{ЗВ}$ відносно $U_{ЗВ0}$ на якусь малу величину, тобто, іншими словами – якщо напруга $U_{ЗВ}$ відносно точки $U_{ЗВ0}$ змінюється в деякому малому околі, то струм буде змінюватись лінійно відносно зміни $U_{ЗВ}$; I_{C0} – струм, що протікатиме через транзистор при напругзі затвор-виток $U_{ЗВ0}$. Також важливо зазначити, що струм I_{C0} , напруга $U_{ЗВ0}$ та напруга $U_{ВС0}$ – це величини, які матимуть місце при відсутності вхідного сигналу.

Напруга $U_{ЗВ0}$ задається наступною формулою:

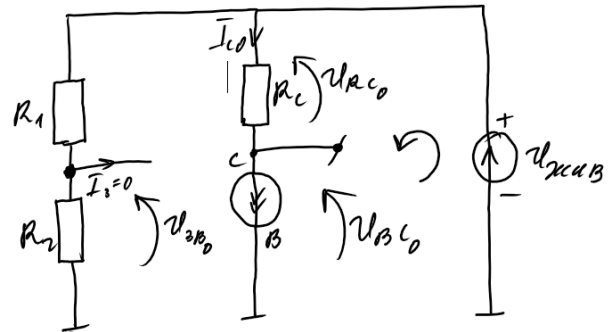
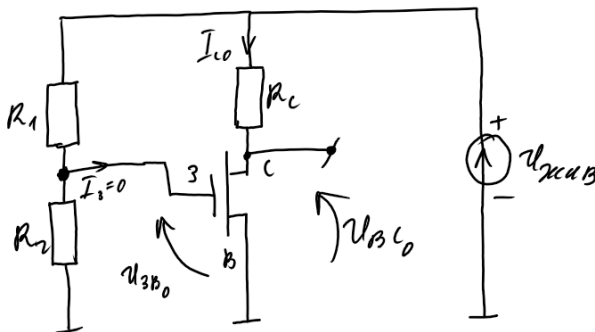
$$U_{зв0} = \frac{U_{хав} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Струм I_{c0} задається наступною формулою:

$$I_{c0} = \frac{b}{2} (U_{зв0} - U_{п})^2$$

Напруга $U_{вс0}$ задається наступною формулою:

$$U_{вс0} = U_{хав} - I_{c0} R_c$$



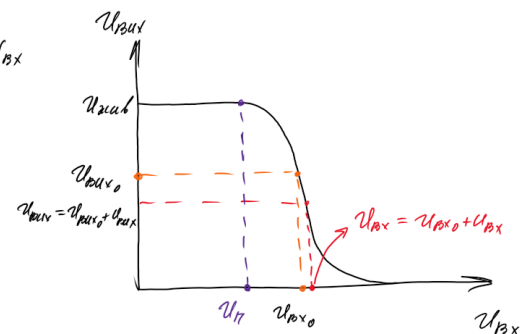
18. Виведіть формулу залежності $U_{вих}(U_{вх})$ для підсилювача з загальним витоком на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом та намалюйте графік такої залежності;

$$U_{вих}(U_{вх}) = U_{вих}(U_{вх0} + U_{вх}) = U_{вих}(U_{вх0}) + \frac{U_{вих}(U_{вх0})'}{1!} \cdot U_{вх}$$

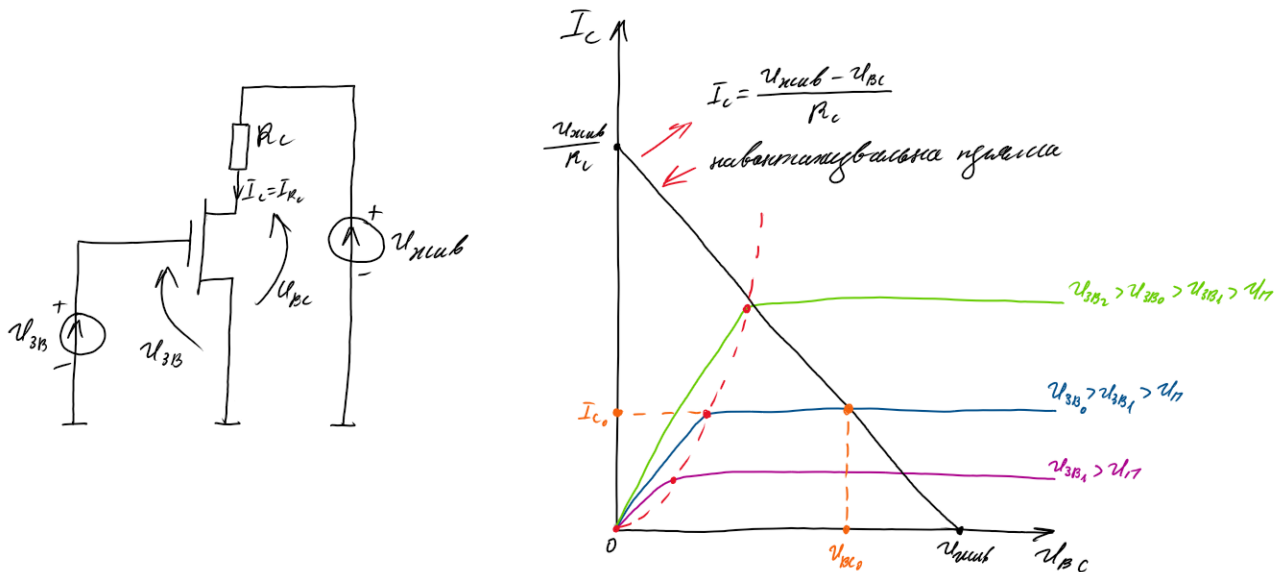
$$\text{оск.} : U_{вих}(U_{вх}) = U_{хав} - \frac{b}{2} (U_{вх} - U_{п})^2 \cdot R_c \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U_{вих}(U_{вх})' = -R_c b (U_{вх} - U_{п}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U_{вих}(U_{вх}) = U_{вих0} - R_c b (U_{вх0} - U_{п}) \cdot U_{вх}$$



19. Що таке навантажувальна пряма підсилювача на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом? Виведіть її формулу.



Навантажувальна пряма – лінія на графіку, що показує залежність струму стоку від напруги затвору. Вона показує межі робочої області транзистора, тобто діапазон значень напруги та струму.

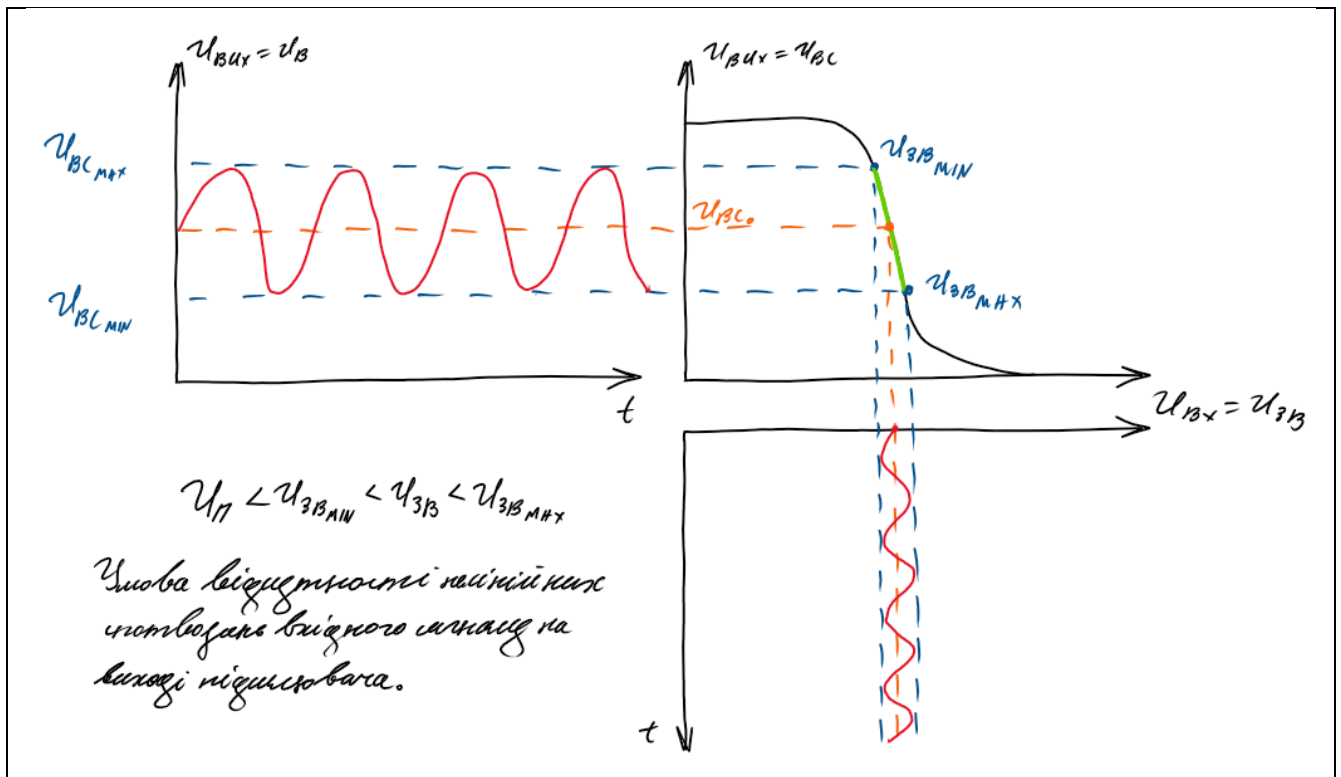
20. Виведіть формулу коефіцієнта підсилення за напругою для польового МДН транзистора з індукованим n-каналом;

$$\begin{aligned} \text{осл.: } U_{ВХ} (U_{ВХ}) &= U_{ВХ_0} + U_{ВХ_1} = U_{ВХ_0} - R_c b (U_{ВХ_0} - U_{П}) \cdot U_{ВХ} \Rightarrow \\ \Rightarrow U_{ВХ} &= -R_c b (U_{ВХ_0} - U_{П}) \cdot U_{ВХ} \Rightarrow K_u = \frac{U_{ВХ_1}}{U_{ВХ}} = -R_c b (U_{ВХ_0} - U_{П}) = \\ &= -R_c g_m, \text{ де: } g_m = b (U_{ВХ_0} - U_{П}) \Rightarrow K_u = -R_c g_m \end{aligned}$$

21. Чому дорівнює зсув фаз між вхідною та вихідною напругою в підсилювачі на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом?

180°

22. Поясніть появу нелінійних спотворень вихідного сигналу у підсилювачі на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом?



23. Від чого залежить коефіцієнт підсилення за напругою у підсилювачі на польовому МДН транзисторі з індукованим п-каналом?

$$K_u = \frac{U_{B_{MAX}}}{U_{B_X}} = -R_c b (U_{B_{X_0}} - U_{TH}) = -R_c g_m$$

порогова напруга

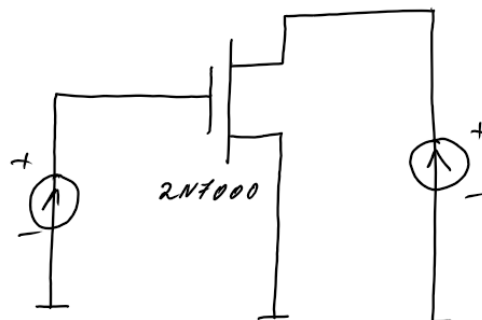
позитивна провідність

вхідна напруга

стабілізатор

опір каналу

24. Намалюйте схему для вимірювання залежності $I_D(U_{GS})$, яку ви використовували в лабораторній роботі;



25. Як можна експериментально визначити порогову напругу польового МДН транзистора з індукованим n-каналом та його коефіцієнт b в формулі залежності $I_c(U_{зв})$?

Можна поступово збільшувати напругу на затворі і зафіксувати амперметром момент, коли через сток-виток почне протікати струм, також, коли цей струм почне протікати, потрібно вольтметром визначити напругу на затворі, це і буде порогова напруга. А коеф b можна визначити з наступною формули маючи визначено попередньо порогову напругу, струм сток-виток та напругу на затворі:

$$I_c = \frac{b}{2} (U_{зв} - U_{п})^2$$

26. Чому дорівнює максимальний струм стоку для транзистора 2N7000, який використаний в лабораторній роботі?

В лабораторній роботі використано транзистора 2N7000, який має відповідно до - <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00005134.pdf>, максимальний струм стоку, що становить 350 мА.

27. Опишіть режим аналізу (моделювання) DC Sweep в LTSpice.

The DC sweep is a function that sweep input voltage from a start value to a stop value for given steps. And it stores the DC voltage of every node in the circuit for each sweeping step. The start value and stop value in the sweep is the voltage range of the sweep of the input voltage source. "Increment" is the step of the sweep. Important to keep in mind that the DC sweep disables the signal settings in the voltage source. This means even the signal source is set to output SINE wave at 1k Hz, the DC sweep simulation will automatically disable the SINE wave and make the signal source as a DC source sweeping from start value to stop value for given steps.