

*Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потєбні*

*Кафедра: Електроніки, інформаційних систем та програмного  
забезпечення*

## **Практичне заняття 6**

з дисципліни Аналогова та оптохемотехніка

### **Ключі на польових транзисторах**

Студента (ки) 2 курсу, групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Викладач \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів: \_\_\_\_\_ Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

м. Запоріжжя – 202\_ рік

Метою вивчення теми: дослідити роботу ключа на польовому транзисторі, а також особливості роботи двотактного ключового каскаду.

Ключові терміни та поняття: ключ, залишкова напруга, навантаження, канал, стік, витік, затвор.

План самостійного опрацювання теми.

1. Засвоїти принципи дії польового транзистора з індукованим каналом.
2. Засвоїти характеристики МОН-транзистора з індукованим каналом.
3. Засвоїти схеми ключів на МОН-транзисторах з індукованим каналом.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

В польовому транзисторі провідністю каналу керує електричне поле, створене прикладеною до затвору напругою. В даному випадку незміщених р-n переходів, тому найбільш важливою характеристик польових транзисторів є відсутність струму затвора, як наслідок маємо високий вхідний опір (до  $10^{14}$  Ом і більше). Це суттєво спрощує проектування схем. Дуже вдале використання ПТ в схемах аналогових перемикачів та підсилювачів з великим вхідним опором. Самі по собі або в комбінаціях з біполярним транзистором ПТ чудово реалізується в інтегральних схемах. Транзисторні ключі на ПТ широко використовуються у цифровій техніці. Їх суттєвими перевагами перед ключами на біполярних транзисторах є:

- мала залишкова напруга на відкритому ключі;
- мала потужність, споживана від джерела керуючої напруги (сигналу);
- високий ККД при використанні в одному ключі комплементарної пари;
- хороша електрична розв'язка між вхідними і вихідними колами;
- висока технологічність при виконанні мікросхем.

У ключах використовують МОН ПТ з індукованим каналом. Як правило, використовують три різновиди МОН-транзисторних ключів: ключі з резистивним навантаженням; ключі з динамічним навантаженням; ключі на комплементарних транзисторах.

### МОН-транзисторні ключі з резистивним навантаженням

На рисунку 6.1 наведені схеми найпростіших ключів з резистивним навантаженням на n-канальному МОН-транзисторі та на р-канальному МОН-транзисторі, увімкнених за схемами зі спільним витокком і лінійним стоковим навантаженням. Схеми подібні і різняться лише полярністю керуючих сигналів і полярністю джерела живлення.

Проаналізуємо статичні режими роботи ключа на n-канальному МОН-транзисторі (рис. 6.1 а), скориставшись стоковими характеристиками транзистора і побудованою лінією навантаження за постійним струмом згідно до контурного рівняння для стокового кола (рис. 6.2 а):

$$U_{CB} = E_C - I_C R_C. \quad (6.1)$$

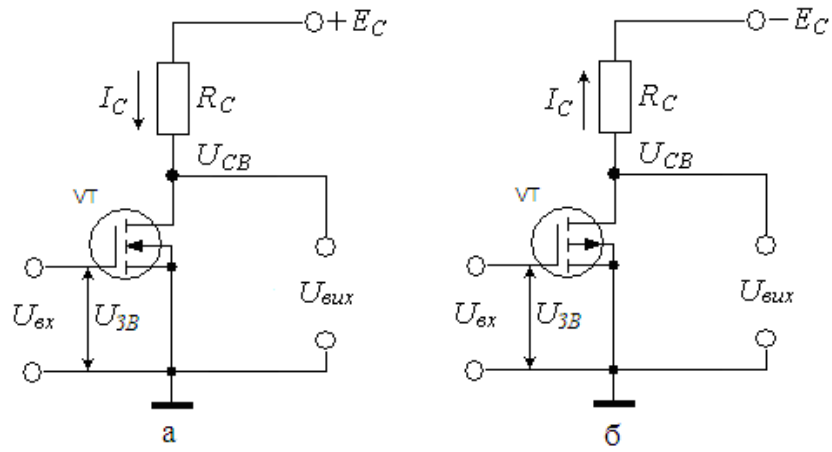


Рисунок 6.1 - Ключі з резистивним навантаженням на МОН-транзисторах з індукованим каналом: на п-канальному транзисторі (а) і на р-канальному транзисторі (б)

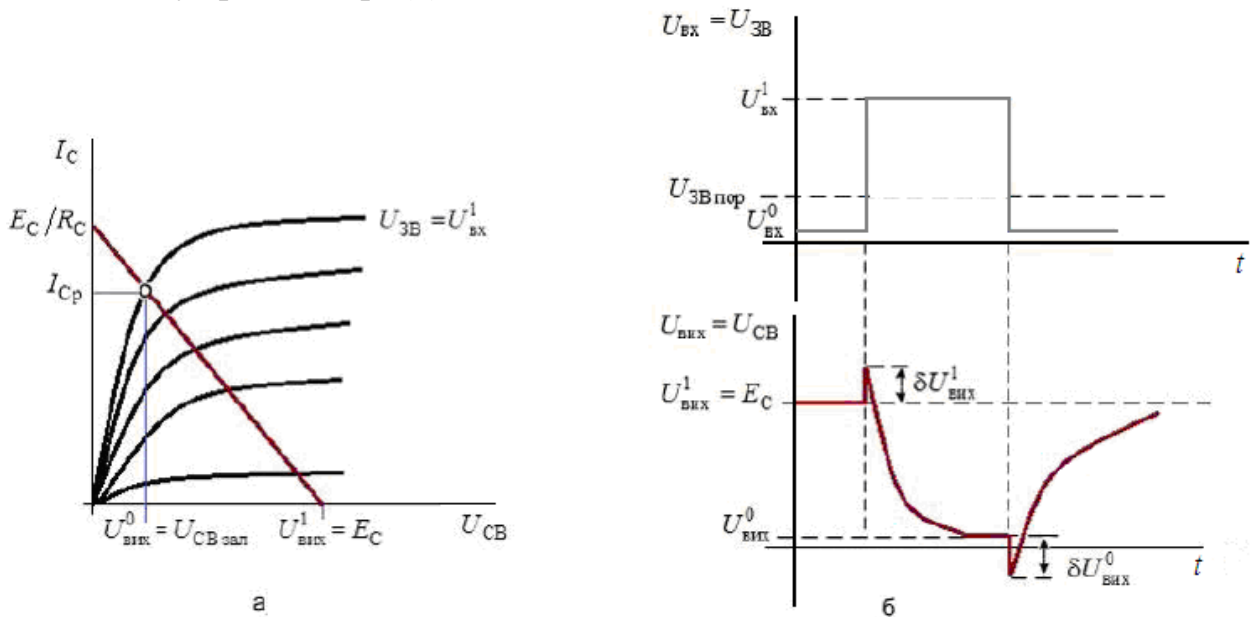


Рисунок 6.2 - Вихідна динамічна характеристика ключа (а), часові діаграми вхідного керуючого сигналу і вихідного сигналу (б)

Якщо на затворі діє сигнал низького рівня

$$U_{\text{вх}}^0 = U_{\text{зв}} < U_{\text{зв пор}},$$

то МОН-транзистор знаходиться у режимі відсічки, провідного каналу немає і струм у колі навантаження визначається дуже малими струмами витoku порядку  $10^{-9} \dots 10^{-12}$  А. Згідно з рівнянням (6.1) вихідний сигнал має високий рівень:

$$U_{\text{внх}}^1 = U_{\text{св}} = E_C - I_{\text{внт}} R_C \cong E_C.$$

Енергоспоживання від джерела  $E_C$  у розімкненого ключа відсутнє:

$$P_{\text{спож}}^1 = 0.$$

Якщо на затворі діє сигнал високого рівня

$$U_{\text{вх}}^1 = U_{\text{зв}} > U_{\text{зв пор}},$$

то в структурі МОН-транзистора індукуються провідний канал і через канал протікає струм стоку  $I_C = I_{Cp}$ , де  $I_{Cp}$  - сила струму в робочій точці відкритого транзистора і визначається точкою перетину лінії навантаження зі стоковою характеристикою транзистора (рис. 6.2 а). Залежно від значень керуючого сигналу на затворі, напруги джерела живлення і опору робоча точка схеми потрапляє або в лінійну область, або в область насичення. На виході ключа встановлюється низький потенціал:

$$U_{\text{вих}}^0 = U_{\text{СВзал}} = E_{\text{С}} - I_{\text{Ср}} \cdot R_{\text{С}},$$

Відкритий транзистор тим ближчий до ідеального замкненого ключа, чим менший спад залишкової напруги  $U_{\text{СВзал}}$ . У реальних МОН-ключів залишкова напруга має значення 100 (мВ) і менше. Для зменшення  $U_{\text{СВзал}}$  потрібно збільшувати значення стокового резистора, тоді лінія навантаження опускається вниз і залишкова напруга зменшується.

### Ключі на МОН транзисторах з динамічним навантаженням

Схему МОН-ключа з динамічним навантаженням показано на рисунку 6.3. Транзистор VT2 служить основним (активним) транзистором. Роль динамічного навантаження виконує транзистор VT1, у якого затвор з'єднаний з стоком, тим самим, є двополосником - резистором. Динамічне навантаження активного транзистора VT2 дорівнює диференціальному опору (вихідному опору

$$R_{\text{д}} = \Delta U_{\text{св}} / I_{\text{с}}$$

транзистора VT1, значення якого на прямолінійній ділянці вихідних ВАХ дорівнює десяткам кОм. Ключ з динамічним навантаженням дозволяє отримати більш низький рівень логічного нуля  $U^0$ , ніж схема рис. 6.1. Схема також реалізує операцію інверсії.

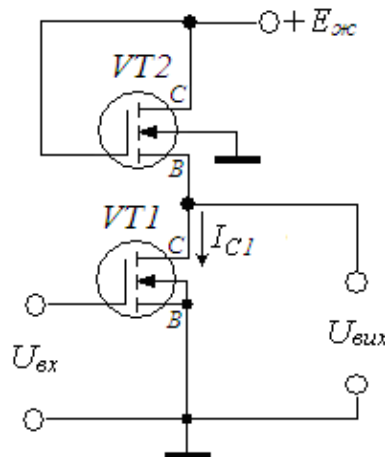


Рисунок 6.3 - Ключ на МОН-транзисторах з динамічним навантаженням

При подачі на вхід ключа низького позитивного рівня логічного нуля ( $U_{\text{вх}} = U^0 = U_{\text{зб2}}$ ) основний транзистор VT1 закритий, тому що  $U_{\text{зб2}} = U^0 < U_{\text{пор}}$ . У цей час між затвором і витком транзистора VT2 діє велика негативна напруга, яка дорівнює  $U_{\text{зб1}} = U_{\text{вх}} - E_{\text{ж}} = U^0 - E_{\text{ж}}$ . Оскільки напруга  $E_{\text{ж}} \gg U^0$ , на-

пруга  $U_{зв2}$  має негативний знак, тому транзистор VT2 з каналом р-типу відкритий. Основний транзистор VT1 закритий і вихідна напруга дорівнює високому рівню логічної одиниці  $U_{вих} = E_{жс} = U^1$ , при цьому струм стоку у спільному колі дорівнює нулю  $I_C=0$ .

При подачі на вхід ключа високого позитивного рівня логічної одиниці ( $U_{вх} = U^1 = U_{зв2}$ ) основний транзистор VT1 відкритий. При цьому напруга затвор-витік транзистора VT2, дорівнює  $U_{зв2} = U^1 - E_{жс}$  близька до нуля ( $U_{зв1} < U_{пор}$ ) тому що  $E_{жс} \approx U^1$ . Тому транзистор VT2 закритий.

Оскільки основний транзистор VT1 відкритий, то вихідна напруга дорівнює низькому рівню логічного нуля  $U_{вх} = U_{зал} = U^0$ . Тому що транзистор VT2 закритий, то струм стоку у спільному колі дорівнює нулю  $I_C=0$ .

#### Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. Статичні та динамічні параметри електронного ключа.
2. Зменшення часу перемикання ключових схем на біполярних транзисторах.
3. Призначення паузи між керуючими напругами двотактного перетворювача.
4. Різновиди електронних ключових схем.
5. Напруга на виході ключової схеми на рольовому транзисторі, якщо транзистор перебуває в режимі відсічки.

#### Практичне завдання.

1. Створити в програмі Electronics Workbench схему ключа на польовому транзисторі (рис. 6.4).

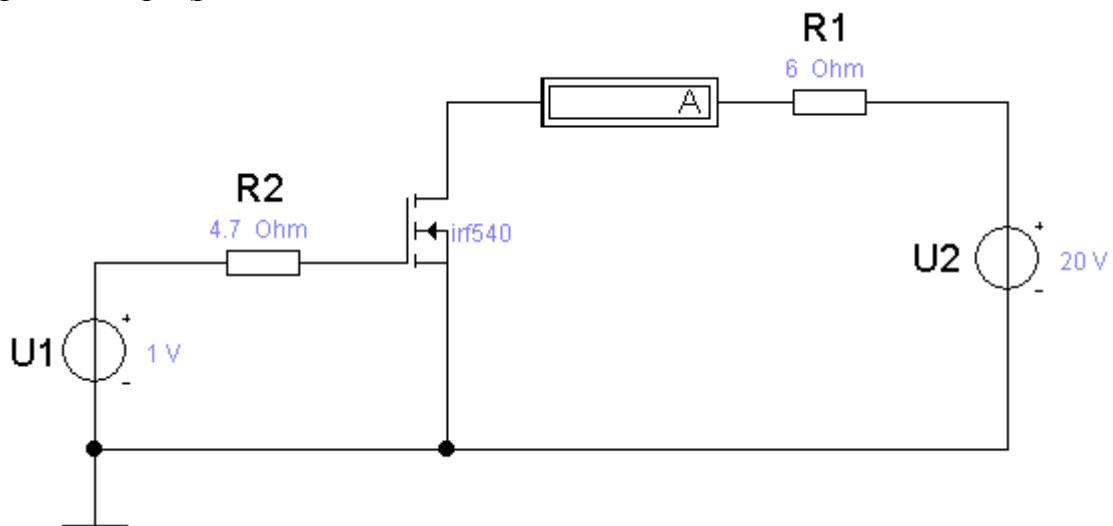


Рисунок 6.4 – Ключ на польовому транзисторі з індукованим n-каналом

2. Вибрати з таблиці 6.1 напругу живлення каскаду та опір резистора R1. Змінюючи напругу джерела U1 від 0 до 10 В побудувати залежність струму стоку транзистора (резистора R1) від напруги управління. Визначити

по побудованій кривій значення напруги управління, після якого струм практично не росте. Зафіксувати це значення.

Таблиця 6.1 – Параметри для розрахунку каскаду за варіантами

| Варіант | Транзистор | R1, Ом | U2, В | U3, В  |
|---------|------------|--------|-------|--------|
| 1       | IRFP140    | 12     | 32    | 1...10 |
| 2       | irf540     | 6      | 20    | 1...10 |
| 3       | MTH30N20   | 12     | 30    | 1...10 |
| 4       | M2SK1078   | 4      | 20    | 1...10 |
| 5       | IRFP342R   | 8      | 15    | 1...10 |

3. Створити в програмі Electronics Workbench схему двохтактного ключового каскаду на польових транзисторах (рис. 6.5).

Для перетворення енергії у ключовому режимі на активно-індуктивне навантаження використовується двотактний каскад на польових транзисторах, який називається понижуючий перетворювач. У цьому каскаді транзистори працюють по черзі: спочатку відкривається, наприклад, транзистор VT1, а потім він закривається. Після цього відкривається і закривається другий VT2. Одночасне відкривання транзисторів не припустиме, оскільки через них буде протікати нічим не обмежений струм, який призведе до виходу з ладу обох транзисторів. Для вимірювання наскрізного струму через транзистори у схему введено шунт R4, на якому виділяється напруга, пропорційна цьому струму.

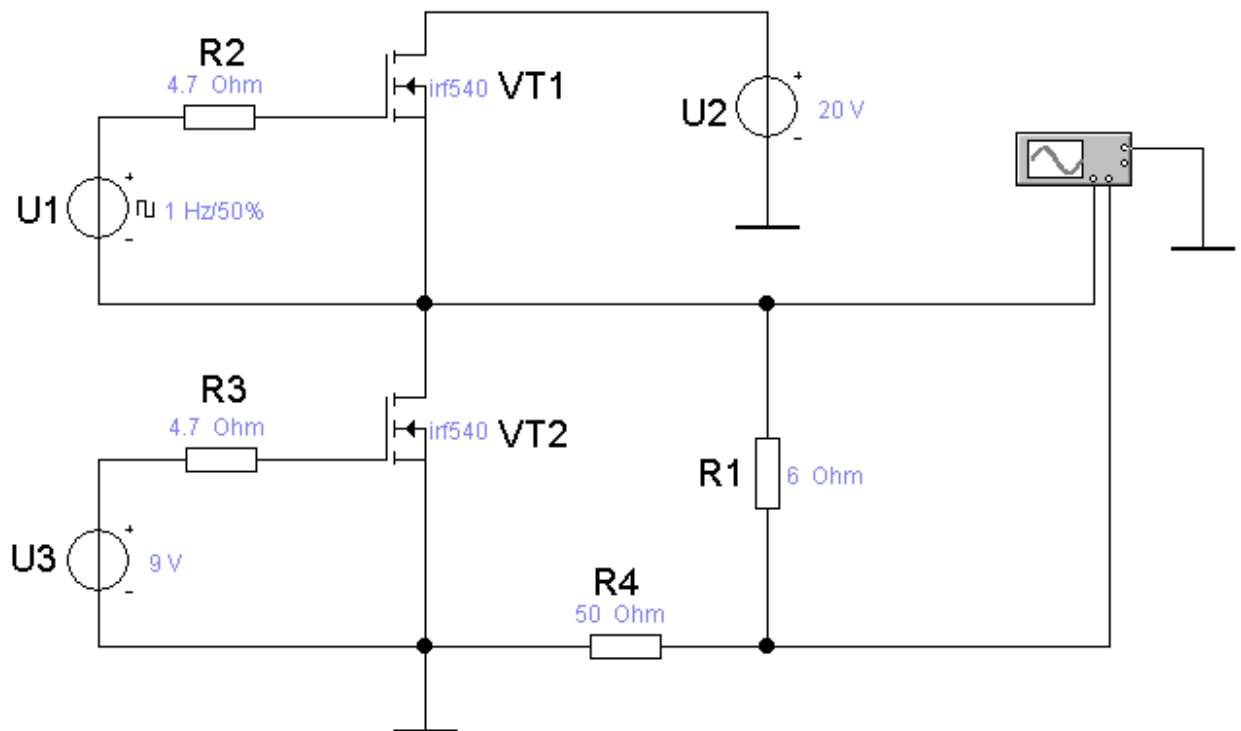


Рисунок 6.5 – Схема двохтактного ключового каскаду на польових транзисторах з індукованим n-каналом

4. Вибрати з таблиці 6.1 напругу живлення каскаду U2, опір резистора R1 та частоту повторення імпульсів джерела U1. Частоту імпульсів U1 встановити рівною 1 Гц і напругу 5 В. Змінюючи напругу джерела V3 від 0 до 10 В отримати діаграми сигналів на виході ключа і на шунті R4 (рис. 6.6).

5. Змінюючи амплітуду імпульсів U1 від 1В до 10В, отримати діаграми сигналів при фіксованих значеннях U3 (табл. 6.2).

6. Пояснити отримані результати та зробити висновки.

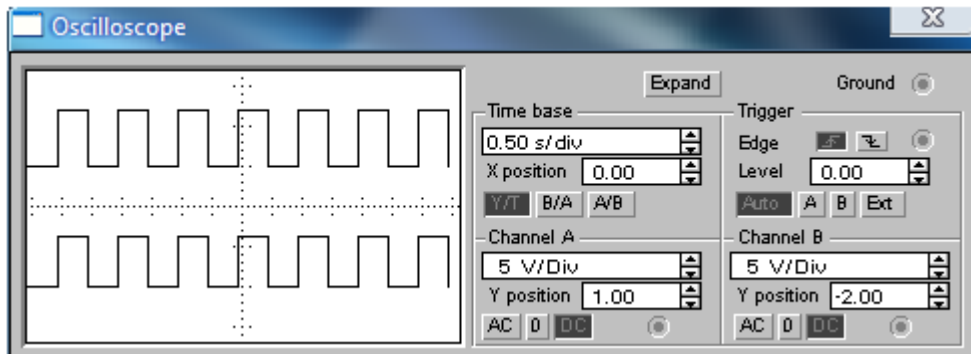


Рисунок 6.6 - Діаграми сигналів на виході ключа і на шунті R4

Таблиця 6.2 – Параметри практичного експерименту

| U1<br>U3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 2        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 4        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 6        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 8        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

### Контрольні питання

1. Яке призначення транзисторних ключів?
2. Якими є умови для того, щоб ключ на польовому транзисторі відкривався та закривався з максимальною швидкістю?
3. Для чого між керуючими напругами двотактного перетворювача вводиться пауза?
4. Що таке «наскрізні струми» і чому вони виникають?
5. У чому перевага двотактного ключового каскаду перед одинарним ключем?

### Література

1. Медяний Л. П. Аналогова схемотехніка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 177 с.
2. Бойко В.І., Жуйков В.Я., Співак В.М. та ін. Основи технічної електроніки: Підручник. Київ : Вища школа., 2007. 510 с.