

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ  
НА ТРАНЗИСТОРАХ ТА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ**

**Методичні рекомендації  
до виконання курсового проекту**

**з дисциплін «Основи схемотехніки», «Електроніка та мікросхемотехніка»**  
для бакалаврів галузей знань 17 Електроніка та телекомунікації,  
15 Автоматизація та приладобудування

Дніпро  
2019



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

---

---



**ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ**  
**Факультет інформаційних технологій**  
*Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій*

**РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ  
НА ТРАНЗИСТОРАХ ТА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ**

**Методичні рекомендації  
до виконання курсового проекту**

**з дисциплін «Основи схемотехніки», «Електроніка та мікросхемотехніка»**

для бакалаврів галузей знань 17 Електроніка та телекомунікації,  
15 Автоматизація та приладобудування

Дніпро  
НТУ «ДП»  
2019

## **Галушко О.М.**

Розрахунок та моделювання підсилювачів потужності на транзисторах та операційних підсилювачах. Методичні рекомендації до виконання курсового проекту з дисциплін «Основи схемотехніки», «Електроніка та мікросхемотехніка» для бакалаврів галузей знань 17 Електроніка та телекомунікації, 15 Автоматизація та приладобудування / Упоряд.: О.М. Галушко, Ю.П. Рибальченко; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2019. – 24 с.

Упорядники:

О.М. Галушко, канд. техн. наук, доц.,

Ю.П. Рибальченко, асист.

Затверджено редакційною радою університету (протокол № 2 від 07.02.2019) за поданням методичної комісії зі спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка (протокол № 6 від 07.02.2019).

Подано методичні рекомендації до виконання курсового проекту на тему «Розрахунок та моделювання підсилювачів потужності на транзисторах та операційних підсилювачах» для бакалаврів галузей знань 17 Електроніка та телекомунікації, 15 Автоматизація та приладобудування.

Відповідальний за випуск зав. кафедри БІТ В.І. Корнієнко, д-р техн. наук, проф.

# 1. Розрахунок підсилювача потужності типу ППЗ з передкінцевим ступенем на операційному підсилювачі

## Призначення

Пристрій, що проектується – безтрансформаторний підсилювач потужності. Даний тип пристрою забезпечує лінійне підсилення низькочастотних сигналів та застосовується як вихідний каскад підсилення звуку, а також для тестування різних пристроїв у дослідницьких цілях.

## Принцип роботи

Електрична схема підсилювача, який працює в режимі класу В, показана на рисунку 1.1. Цей режим забезпечує високий ККД підсилювача.

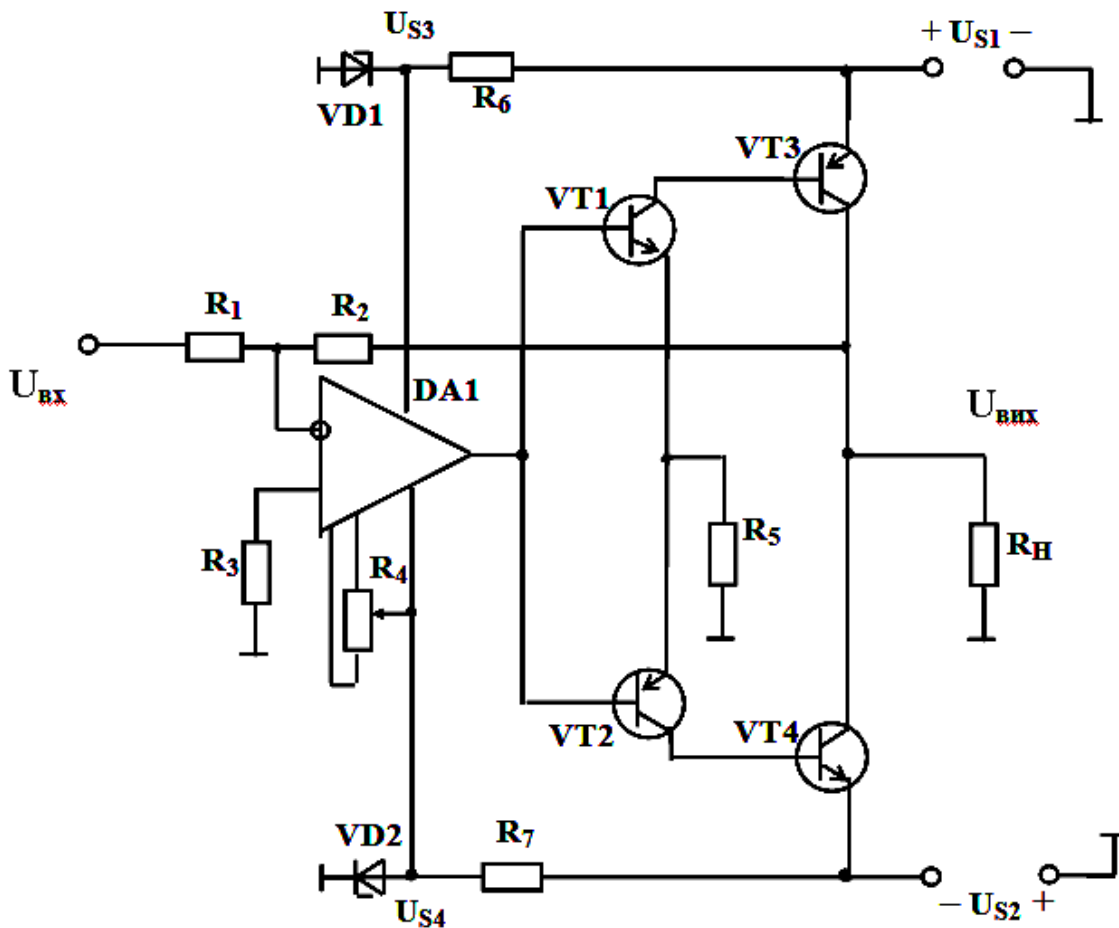


Рис. 1.1 Схема підсилювача потужності типу ППЗ

Прикінцевий ступінь підсилювача, зібрано на складених комплементарних транзисторах – VT1, VT3 та VT2, VT4. До з'єднаних колекторів VT3 та VT4 підключений опір навантаження  $R_H$ .

Передкінцевий ступінь схеми являє собою інвертуючий підсилювач на операційному підсилювачі DA1. Коефіцієнт підсилення за напругою цього ступеню забезпечується від'ємним зворотним зв'язком на резисторах  $R_1$  та  $R_2$ .

Спряження виходу ОП з кінцевим ступенем виконано першою частиною складених транзисторів, а саме VT1 та VT2, які також є комплементарними. Емітерне навантаження цієї пари складає опір  $R_5$ .

Живлення підсилювача потужності здійснюється від двох джерел з напругами ( $+U_{S1}$  та  $-U_{S2}$ ), а операційного підсилювача – напругами від параметричних стабілізаторів на елементах VD1 –  $R_6$  та VD2 –  $R_7$  (напруги  $+U_{S3}$  та  $-U_{S4}$ ).

Таблиця 1.1

Варіанти завдань

№ варіанта	Тип операційного підсилювача (ОП) та його іноземний аналог (параметри ОП – таблиця 1Д)	Параметри навантаження
1	<b>КР140УД14</b> <b>LM108Н</b>	$P_H = 10 \text{ Вт}$ , $R_H = 4 \text{ Ом}$
2	<b>КР140УД7</b> <b>LM741Н</b>	$P_H = 12 \text{ Вт}$ , $R_H = 8 \text{ Ом}$
3	<b>КР140УД608</b> <b>MC1456G</b>	$P_H = 15 \text{ Вт}$ , $R_H = 12 \text{ Ом}$
4	<b>К153УД2</b> <b>LM101</b>	$P_H = 18 \text{ Вт}$ , $R_H = 16 \text{ Ом}$
5	<b>К553УД1</b> <b>LM709А</b>	$P_H = 25 \text{ Вт}$ , $R_H = 12 \text{ Ом}$

Дані для розрахунку:

Режим роботи – в класі «**B**».

Потужність навантаження –  $P_H$ , Вт,

Опір навантаження –  $R_H$ , Ом,

Напруга на вході –  $U_{ВХ} = 2,0 \dots 2,5 \text{ В}$ .

Смуга пропускання –  $f_H \dots f_B = 40 \text{ Гц} \dots 16 \text{ кГц}$ .

## Послідовність розрахунку

Згідно заданого значення потужності навантаження, прийняв коефіцієнт запасу  $k_3 = 1,15 \dots 1,2$ , отримаємо розрахункове значення  $P_{H.P}$ :

$$P_{H.P} = k_3 * P_H, \text{ Вт.}$$

Амплітуда напруги на навантаженні складає

$$U_{H.m} = U_{KE.m} = \sqrt{2 R_H P_{H.P}}, \text{ В.}$$

Розрахункові значення напруг джерел живлення всієї схеми підсилювача

$$U_{SI} = \left| -U_{S2} \right| = U_{KE.m} + U_{3AL}, \text{ В,}$$

де  $U_{3AL} = 1 \dots 1,5 \text{ В}$  – залишкова напруга на транзисторах VT3 та VT4.

Остаточні напруги джерел живлення приймаємо на підставі рекомендованих значень, що дорівнюють: 15, 18, 20, 24, 30, 36 В.

$$U_{SI} = \left| -U_{S2} \right|, \text{ В.}$$

Максимальна потужність, що випромінюється на колекторах транзисторів VT3 та VT4:

$$P_{K3,4 \text{ max}} = (2U_{SI})^2 / 4\pi^2 R_H, \text{ Вт.}$$

Найбільше значення напруги  $U_{KE.3}$  та струму  $I_{K3.max.max}$  цих транзисторів

$$U_{KE3 \text{ max.max}} = U_{SI,2} - U_{OCT}, \text{ В,}$$

де  $U_{SI,2} = U_{SI} + \left| -U_{S2} \right|, \text{ В.}$

$$I_{K.max} = (U_{SI,2} - U_{3AL}) / R_H, \text{ А.}$$

Прийнявши отримані значення  $P_{Kmax}$ ,  $U_{KE.t.max}$ ,  $I_{K.max}$ , та коефіцієнт запасу не менш 20% ( $K_3 = 1,2$ ) обираємо транзистори VT3 та VT4 за паспортними даними [6].

Рекомендовані комплементарні пари цих транзисторів, а також їх імпорتنих аналогів наведені у таблиці 1.2.

Серед імпорتنих транзисторів треба обирати пари з близькими значеннями параметрів BF –  $h_{21E}$ ; IKF –  $I_{K.max}$ ,

Таблиця 1.2

Рекомендовані комплементарні пари транзисторів великої потужності

	<i>p-n-p</i>	Можливий іноземний аналог	<i>n-p-n</i>	Можливий іноземний аналог
1	КТ814В	BD244В	КТ815Б,В	BD243В BD135, BD137,
2	КТ816В	BD534, BD536, BD538, BD330, 2N6727, ZTX750	КТ817В	BD535, BD539,
3	КТ818В	ZTX951, ZTX955 BDV65, BDW94,	КТ819В	ZTX851, ВСР68, 2N6497

Зробивши вибір транзисторів за довідником, треба записати їх основні параметри:

$$P_{K_{max}} = \dots Bm, \quad I_{K_{max}} = \dots A, \quad U_{KE.m.max.} = \dots B,$$

$$h_{21.E} = \dots, \quad U_{BE.} = \dots B.$$

Наступним кроком визначаються робочі параметри транзисторів VT1 та VT2.

Максимальні струми колекторів:

$$I_{K1,2 max} = I_{B3,4 max} = I_{K3,4 max} / h_{21.E.3,4}, \text{ mA.}$$

Для того, щоб струми колекторів цих транзисторів при роботі підсилувача були близькими, треба й обирати у довідниках такі типи транзисторів, які мають близькі паспортні значення цих струмів, а також і таких параметрів, як динамічні коефіцієнти підсилення струму колекторів –  $h_{21E}$ .

Рекомендовані комплементарні пари транзисторів VT1 та VT2 наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Рекомендовані комплементарні пари транзисторів середньої потужності

	<i>p-n-p</i>	Можливий іноземний аналог	<i>n-p-n</i>	Можливий іноземний аналог
1	КТ361В	2N3905,	КТ315В	2N3903, 2N4123, 2N5223
2	КТ3107В	2N3906,	КТ3102В	2N3904, 2N2712, BC108CP.
3	КТ502В	BC640, 2N5227, 2N4058	КТ503В	BC639, 2N5551

Для обраних типів транзисторів також записуються їх параметри:

$$P_{K_{max}} = \dots Bm, \quad I_{K_{max}} = \dots A, \quad U_{KE.m.max.} = \dots B,$$

$$h_{21.E} = \dots, \quad U_{BE.} = \dots B.$$



Максимальна потужність, що випромінюється на колекторах транзисторів VT1 та VT2:

$$P_{K1,2 \max} = (U_{S1,2})^2 / 4\pi^2 R_5, \text{ Вт}$$

Опір резистора  $R_5$  (дивись нижче) необхідно обирати, прийнявши до уваги допустиме значення вихідної напруги обраного типу операційного підсилювача  $U_{\text{ВИХ.ОП.МАХ}}$  (для сучасних ОП за звичай  $U_{\text{ВИХ.ОП.МАХ}} \approx 0,8 U_{S1 \text{ ОП}}$ ).

Параметри деяких типів ОП та їх імпортних аналогів наведені в розділі «Довідкові матеріали» – таблиця 1Д.

Найбільш розповсюдженим значенням напруги живлення ОП загального використання є  $U_{S, \text{ ОП}} = \pm 15 \text{ В}$ .

Записуються основні параметри обраного типу ОП:

1. Напруга джерел живлення:  $U_{S1} = | - U_{S2} |$ , В.
2. Струм споживання:  $I_{\text{сн ОП}}$ , мА.
3. Частота одиничного підсилення:  $F_{\text{о.п.}}$ , МГц.
4. Коефіцієнт підсилення:  $K_U$

Значення опору  $R_5$  визначається з виразу:

$$U_{R5, \max} = R_5 * I_{R5, \max} \cong R_5 * I_{K1,2, \max}, \text{ В,}$$

звідси:

$$R_5 = U_{R5, \max} / I_{E1,2, \max}, \text{ Ом.}$$

При цьому прийнято  $U_{R5, \max} < U_{\text{ВИХ ОП. МАХ}} - U_{BE,1}$ , В.

У розрахунках треба прийняти  $U_{BE} = 0,7 \text{ В}$

Стандартне значення  $R_5$  обирається з ряду E24 – таблиця 2Д.

Завдяки резисторам  $R_2$  та  $R_1$ , які з'єднують вихід підсилювача потужності з інвертуючим входом операційного підсилювача (ОП) реалізовано від'ємний зворотний зв'язок, який забезпечує коефіцієнт підсилення всього підсилювача по напрузі:

$$K = U_{\text{ВИХ}} / U_{\text{ВХ}}; |K| = R_2 / R_1,$$

де:

$$U_{\text{ВИХ}} = U_{\text{Н}} = \sqrt{P_{\text{Н}} * R_{\text{Н}}}, \text{ В.}$$

З формули для значення  $K$ , приймаючи опір одного з резисторів, визначають опір іншого. Доцільні значення їх складають (20 . . . 200) кОм.

Наприклад, можна прийняти  $R_1 = 20 \text{ кОм}$  з ряду E24. При цьому  $R_2 = R_1 * K$ , кОм. Номінального значення  $R_2$  набуває також з ряду E24.

Опір  $R_3$  вибирається по умові:

$$R_3 = 1 / (1/R_1 + 1/R_2), \text{ кОм.}$$

Номінального значення  $R_3$  набуває також з ряду E24.

Резистор  $R_4$  використовується для балансу операційного підсилювача. Доцільне значення його складає близько 10 кОм.

Живлення операційного підсилювача DA1 – рис. 1.1 повинно здійснюватися від двох джерел живлення зі значеннями напруги для цього типу ОП (наприклад, +15 В і –15 В). Таку напругу можна отримати від наявних джерел з прийнятою напругою  $U_{S1} = | - U_{S2} |$  через параметричні стабілізатори напруги на стабілітронах VD1, VD2 і резисторах  $R_6, R_7$ .

Стабілітрони VD1, VD2 і резистори  $R_6, R_7$  обирають, по необхідному значенням напруг живлення ОП  $U_{S3}, U_{S4}$  і їх струмам споживання, прийнятим рівними  $I_{R6}, I_{R7}$ .

Струм навантаження ОП має бути меншим, ніж гранично допустимі його значення (із запасом)  $I_{H,OP} < I_{ВИХ.ОП.МАХ}$ . Як приклад при  $U_{S3} = U_{S4} = 15$  В, можна прийняти стабілітрони типу КС515А – таблиця 8Д. Струми стабілітронів мають бути більшими мінімального значення їх струмів стабілізації плюс максимально можливий струм споживання ОП:

$$I_{CT} \geq I_{CT\min} + I_{cn\text{ ОП}}, \text{ мА.}$$

Зазвичай приймають  $I_{CT} = 8 \dots 10$  мА.

При цьому

$$R6 = R7 = (U_{S1} - U_{CT}) / I_{CT}, \text{ кОм.}$$

Стандартні значення  $R6 = R7$  обирається також з ряду E24 – таблиця 2Д.

Приклад моделювання схеми підсилювача в пакеті MULNISIM 11.0 наведено на рисунку 1.2

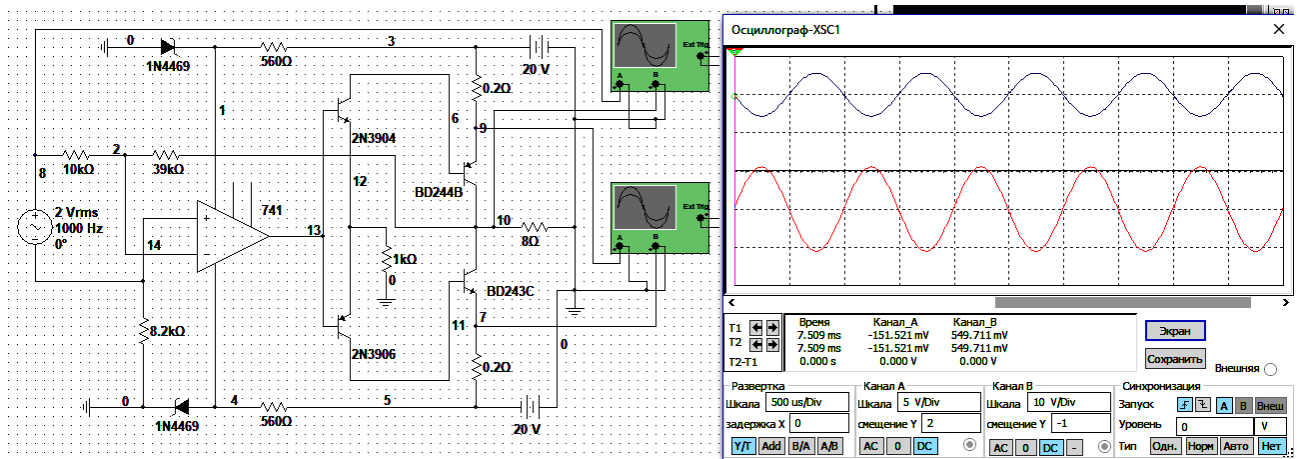


Рисунок 1.2. Приклад моделювання схеми ППЗ в пакеті MULNISIM 11.0

## 2 Розрахунок підсилювача потужності типу ПП4 на три каскади з попереднім каскадом на операційному підсилювачі

### Призначення та область застосування

Пристрій, що проектується – безтрансформаторний підсилювач потужності. Даний тип пристрою забезпечує лінійне підсилення низькочастотних сигналів та застосовується як вихідний каскад підсилення звуку, а також для тестування різних пристроїв у дослідницьких цілях.

### Принцип роботи

Електрична схема підсилювача показана на рисунку 2.1.

Підсилювач потужності на три каскади з попереднім каскадом посилення напруги – неінвертуючим підсилювачем (НІП) на операційному підсилювачі DA1, генератором стабільного струму (ГСС) в ланцюзі зміщення транзисторів VT2, VT4 та передкінцевим каскадом працює в режимі роботи, відповідному класу В. Цей режим забезпечує високий ККД підсилювача.

Кожне плече прикінцевого ступеня – це потужний підсилювач напруги на транзисторах VT2, VT4 та VT3, VT5 з негативним зворотним зв'язком на резисторах R11, R12 та R13, R14.

Напруга зміщення транзисторів прикінцевого ступеню  $U_{3M}$ , при якій забезпечується режим підсилення класу В, утворюється на діоді VD4 та резисторі R8, через які проходить струм  $I_{R8} \approx I_{K1}$ , стабілізований ГСС на елементах VT1, VD3, R7, R9.

Струм  $I_{ГСС}$  повинен бути у кілька разів більшим за струм бази  $I_{B2(4).max.макс}$ . При цьому в режимі спокою для класу В струми колекторів транзисторів VT1, VT2 та VT3 незначні, тому напругами  $U_{R12}$  та  $U_{R14}$  при визначені напруги  $U_{3M}$  можна знехтувати.

Остаточний режим спокою встановлюють за допомогою підстроювального резистора R8.

Увесь підсилювач охоплений зворотним зв'язком на елементах R3, R4 та C1. Ємність цього конденсатора вибирають з умови значної меншості його опору на нижній частоті ( $f_H$ ) смуги пропускання відносно опору R4.

Ємність C2 приєднують паралельно резистору R11 або R13 для запобігання паразитного самозбудження підсилювача. Величину ємності (найчастіше – сотні пікофарад) визначають експериментально.

Живлення підсилювача потужності здійснюється від двох джерел з напругами  $U_{S1}$  та  $U_{S2}$ , а операційного підсилювача DA1 – напругами від параметричних стабілізаторів на елементах VD1 – R5 та VD2 – R6 (напруги  $+U_{S3}$  та  $-U_{S4}$ ).

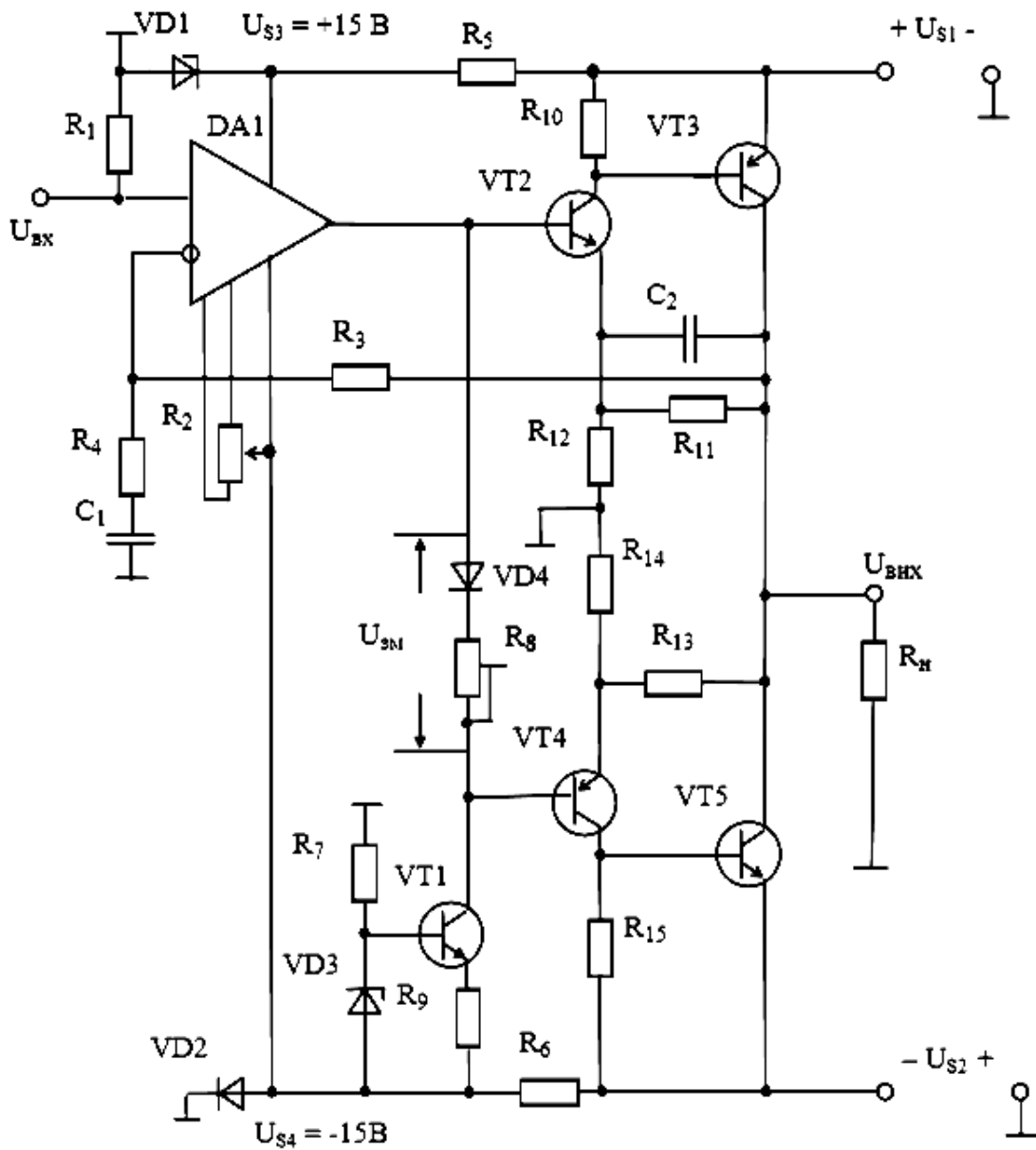


Рисунок 2.1 – Електрична схема підсилювача потужності ПП4 на три каскади

**Дані для розрахунку:**

- Режим роботи – в класі «**B**».
- Потужність навантаження –  $P_H$ , Вт,
- Опір навантаження –  $R_H$ , Ом,
- Напруга на вході –  $U_{вх} = 2,0 \dots 2,5$  В.
- Смуга пропускання –  $f_H \dots f_B = 40$  Гц...16 кГц.
- Коефіцієнт частотних спотворень  $M_H = 1.1$

## Варіанти завдань

№ варіанта	Тип операційного підсилювача (ОП) та його іноземний аналог (параметри ОП – таблиця 1Д)	Параметри навантаження
1	<b>КР140УД7</b> <b>LM741H</b>	$P_H = 12 \text{ Вт}$ , $R_H = 4 \text{ Ом}$
2	<b>КР140УД14</b> <b>LM108H</b>	$P_H = 10 \text{ Вт}$ , $R_H = 8 \text{ Ом}$
3	<b>КР140УД608</b> <b>MC1456G</b>	$P_H = 18 \text{ Вт}$ , $R_H = 12 \text{ Ом}$
4	<b>К153УД</b> <b>LM101</b>	$P_H = 15 \text{ Вт}$ , $R_H = 8 \text{ Ом}$
5	<b>К553УД2</b> <b>LM709A</b>	$P_H = 25 \text{ Вт}$ , $R_H = 16 \text{ Ом}$

## Послідовність розрахунку

Згідно заданого значення потужності навантаження, прийняв коефіцієнт запасу  $k_3 = 1,15 \dots 1,2$ , отримаємо розрахункове значення  $P_{H.P}$ :

$$P_{H.P} = k_3 * P_H, \text{ Вт.}$$

Амплітуда напруги на навантаженні складає

$$U_{H.m} = U_{KE.m} = \sqrt{2 R_H P_{H.P}}, \text{ В.}$$

Розрахункові значення напруг джерел живлення всієї схеми підсилювача

$$U_{SI} = \left| -U_{S2} \right| = U_{KE.m} + U_{3AL}, \text{ В,}$$

де  $U_{3AL} = 1 \dots 1,5 \text{ В}$  – залишкова напруга на транзисторах VT3 та VT5.

Остаточні значення напруг джерел живлення приймаємо на підставі рекомендованих значень, що дорівнюють: 15, 18, 20, 24, 30, 36 В.

$$U_{SI} = \left| -U_{S2} \right|, \text{ В.}$$

Значення амплітуди напруги на колекторах транзисторів

$$U_{KE.m \text{ MAX}} = U_{SI} - U_{3AL}, \text{ В}$$

Коефіцієнти посилення:

- всього підсилювача

$$K = U_{ВИХ} / U_{ВХ}$$

де:

$$U_{ВИХ} = U_H = \sqrt{P_H * R_H}, B,$$

- першого передкінцевого ступеню (на ОП)

$$K_1 = U_{ВИХ. ОП МАХ} / U_{ВХ m}$$

де:

$$U_{ВХ m} = \sqrt{2} U_{ВХ}, B.$$

В формулу для  $K_1$  необхідно підставити  $U_{ВИХ. ОП. МАХ} = 10 B$  з урахуванням запасу  $K_3 \approx 1,2$  щодо найбільшої напруги на виході ОП ( $U_{ВИХ ОП МАХ} = 12 \dots 13 B$ ) - по паспорту для операційних підсилювачів (довідкові дані – таблиця 1Д).

- другого передкінцевого ступеню (на транзисторах VT2 ... VT5)

$$K_2 = K_U / K_1$$

На підставі виразу для коефіцієнта підсилення передкінцевого ступеню маємо:

$$R_{11} = (0,1 \dots 0,15) h_{21.3} * R_H$$

де:  $h_{21.3} = 20 \dots 25$  – мінімальне значення коефіцієнтів підсилення за струмом транзисторів VT3, VT5.

Обираємо резистори  $R_{11} = R_{13}$  зі стандартними (за рядом E24) значеннями опорів.

Опори  $R_{12}$  та  $R_{14}$  визначаються за формулою:

$$R_{12} = R_{11} / (K_2 - 1)$$

Обираємо значення  $R_{12} = R_{14}$  також за рядом E24.

При отриманих значеннях опорів коефіцієнт підсилення другого ступеню буде мати значення:

$$K_2 = (1 + R_{11} / R_{12}) / (1 + R_{11} / h_{21.2} * R_H)$$

### Обрання транзисторів VT3(VT5)

Максимальна потужність, що випромінюється на колекторах транзисторів VT3 та VT5:

$$P_{K3,5 max} = (2U_{SI})^2 / 4\pi^2 R_{HE}, Вт.$$

де:  $R_{HE}$  – значення еквівалентного опору навантаження:

$$R_{HE} = (1/R_H + 1/(R_{I1} + R_{I2}))^{-1}$$

Найбільше значення колекторних струмів цих транзисторів

$$I_{K3.max} = U_{Hm} / R_{HE}, A.$$

Прийнявши отримані значення  $P_{Kmax}$ ,  $U_{KE.m.max}$ ,  $I_{K.max}$ , та коефіцієнт запасу не менш 20% ( $K_3 = 1,2$ ) обираємо транзистори VT3 та VT5 за паспортними даними.

Рекомендовані комплементарні пари вказаних транзисторів наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Рекомендовані комплементарні пари потужних транзисторів та їх аналогів

	<i>p-n-p</i>	Можливий іноземний аналог	<i>n-p-n</i>	Можливий іноземний аналог
1	КТ814В	BD244В	КТ815Б,В	BD243В BD135, BD137,
2	КТ816В	BD534, BD536, BD538, 2N6727	КТ817В	BD535, BD539,
3	КТ818В	ZTX951, ZTX955 BDV65, BDW94,	КТ819В	ZTX851, BCP68, 2N6497

Зробивши вибір транзисторів за довідником, треба записати їх основні параметри:

$$P_{Kmax} = \dots Bm, \quad I_{K.max} = \dots A, \quad U_{KE.m.max} = \dots B,$$

$$h_{21.E} = \dots, \quad U_{BE} = \dots B.$$

### Обрання транзисторів VT2(VT4)

Потужність, що випромінюється на колекторах цих транзисторів:

$$P_{K2max} = P_{K3max} / h_{21.3}$$

Максимальна напруга на колекторах

$$U_{KE2.max} = U_{SI} * (1 + R_{I2} / (R_{I1} + R_{I2}))$$

Максимальний струм колектора

$$I_{K2 max} = I_{B3 max} + I_{R10} = I_{K3 max} / h_{21.3} + 0,1 I_{B3 max}, A.$$

Для забезпечення однакових значень струмів колекторів VT2 та VT4  $I_{K2} \approx I_{K4}$ , слід обрати транзистори з близькими значеннями параметрів  $h_{21E}$ .

Рекомендовані комплементарні пари транзисторів наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Рекомендовані комплементарні пари транзисторів середньої потужності та їх аналогів

	<i>p-n-p</i>	Можливий іноземний аналог	<i>n-p-n</i>	Можливий іноземний аналог
1	КТ361В	2N3905,	КТ315В	2N3903, 2N4123,
2	КТ3107В	2N3906,	КТ3102В	2N3904, 2N2712,
3	КТ502В	BC640, 2N5227,	КТ503В	BC639, 2N5551

Для обраних типів транзисторів також записуються їх параметри:

$$P_{Kmax} = \dots Bm, \quad I_{Kmax} = \dots A, \quad U_{KE.m.max} = \dots B,$$

$$h_{21.E} = \dots, \quad U_{BE} = \dots B.$$

Опори резисторів  $R_{10}$  та  $R_{15}$  визначаються за виразом:  $R_{10} = U_{BE3} / I_{R10}$

Можна прийняти  $U_{BE} = 0,7 \dots 0,8$  В, тоді

$$I_{R10} = 0,1 I_{K3 max} / h_{21.3}$$

Значення опорів резисторів  $R_{10}$  и  $R_{15}$  також приймаються за рядом E24.

### Обрання елементів ланцюга зміщення та стабілізатора струму

Струм  $I_{ГСС}$  повинен в декілька разів перевищувати струм бази транзисторів VT2 та VT4:

$$I_{ГСС} = I_{R8} = (5 \dots 8) I_{B2max} = (5 \dots 8) I_{K2max} / h_{21.2}$$

Приймаємо  $I_{ГСС}$  з деяким запасом (при цьому він має бути менш паспортного значення  $I_{H OP max}$ ).

Напруга зміщення (для режиму спокою в класі **B**) –  $U_{3M} = U_{BE2} + U_{BE4}$ , кожний з яких складає  $0,5 \dots 0,6$  В.

Опір резистора  $R_8$ :

$$R_8 = (U_{3M} - U_{VD4}) / I_{ГСС}$$

де:  $U_{VD4} = 0,7$  В.

Обираємо змінний підстроювальний резистор з номінальним опором більшим розрахункового значення  $R_8$ , (обирається за рядом E6). Остаточного його значення встановлюється при налагодженні підсилювача.

Найменша напруга на колекторі транзистора VT1:

$$U_{K1 min} = U_{B4} = - U_{Hm} / K_2$$



при  $U_{S4} = -15$  В (напряга живлення ОП), та  $U_{KE1\ min} = 2$  В, знайдемо:

$$U_{R9} = U_{K1\ min} - U_{KE1\ min} - U_{S4}$$

Опір резистора  $R_9$ : (при  $I_{R9} \approx I_{CT} = 7 \dots 10$  мА):

$$R_9 = U_{R9} / I_{R9}$$

Приймаємо  $R_9$  за рядом Е24.

Напряга на стабілітроні VD3:  $U_{VD3} = U_{CT} = U_{BE1} + U_{R9}$

Для цього кола підходить стабілітрон з напругою стабілізації  $U_{VD3} = U_{CT}$  близькою до розрахункового значення – дивись таблицю 8Д.

Записати параметри обраного стабілітрона:

$$\begin{aligned} U_{CT} &= \dots \text{ В}, & I_{CT\ min} &= \dots \text{ мА}, & I_{CT\ max} &= \dots \text{ мА}, \\ P_{CT\ max} &= \dots \text{ Вт}, & T_{HC} &= \dots \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Опір резистора  $R_7$  при прийнятому  $I_{CT} = (7 \dots 10)$  мА.

$$R_7 = (|U_{S4}| - U_{CT}) / I_{CT}$$

Приймаємо значення  $R_7$  за рядом Е24.

### Розрахунок передкінцевого ступеню

Найбільше значення напруги і струму навантаження ОП:

$$\begin{aligned} U_{ВИХ.ОП.МАХ} &= U_{Hm} / K_2, \\ I_{ВИХ.ОП.МАХ} &= I_{ГСС} + I_{Б2.МАХ}, \end{aligned}$$

де:  $I_{Б2\ max} = I_{K2\ max} / h_{21.2}$

Приймається тип операційного підсилювача із варіанту завдання з урахуванням довідкових даних (таблиця 1Д) та записуються його основні параметри:

1. Напряга живлення:  $U_{S1} = | - U_{S2} |$ , В.
2. Струм споживання:  $I_{ен}$ , мА.
3. Частота одиничного підсилення:  $f_{e.y.}$ , МГц.
4. Коефіцієнт підсилення по напрузі:  $K_U$ .
5. Найбільше значення напруги на виході:  $U_{ВИХ.ОП.МАХ}$ , В.

Опір підстроювального резистора для забезпечення балансу ОП прийняти  $R_2 = 10$  кОм.

З виходу підсилювача потужності скрізь резистори  $R_3$  та  $R_4$  на вхід операційного підсилювача (ОП) подається сигнал від'ємного зворотного зв'язку, який забезпечує коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача (НІП) на ОП по напрузі

$$K = U_{ВИХ} / U_{ВХ} = 1 + R3 / R4$$

Обравши значення опору  $R_4 = (20 \dots 30)$  кОм, визначаємо

$$R3 = R4(K_1 - 1)$$

Приймаємо  $R_3$  також за рядом Е24.

Ємність С1 знаходиться на підставі заданого коефіцієнта частотних спотворень (як правило в діапазоні  $M_H = 1.05 \dots 1.12$ ) із виразу:

$$C_1 = ((2\pi f_H R_4 * (((K - 1)/K)^2 / (M_H - 1)) - 1)^{0.5})^{-1}$$

Стандартизоване значення ємності конденсатора С1 обирається також за рядом Е24 – таблиця 2Д, а його тип – за таблицею 6Д.

### Вибір елементів для джерела живлення ОП з напругами $U_{S3}$ та $U_{S4}$ .

Стабілітрони VD1 та VD2 обираються по напрузі:  $U_{CT} = U_{S ОП}$  і струму  $I_{CT}$ .

При напрузі живлення ОП  $\pm 15$  В підходять стабілітрони **КС515А** з параметрами:

$$U_{CT} = \dots 15 \text{ В} \pm 5\%, \quad I_{CT \text{ мін}} = 1 \text{ мА}, \quad I_{CT \text{ макс}} = 53 \text{ мА}, \\ P_{CT \text{ макс}} = 15 \text{ Вт}, \quad T_{HC} = \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Можна прийняти  $I_{CT1} = I_{CT2} = (7 \dots 10) \text{ мА}$ .

Струм, який проходить через опори  $R_5$  та  $R_6$ :

$$I_{R5} = I_{CT1} + I_{cn} \\ I_{R6} = I_{CT2} + I_{cn} + I_{CT3} + I_{ГСС}$$

Значення опорів визначається з виразів:

$$R_5 = (U_{S1} - U_{S3}) / I_{R5}; \quad R_6 = (U_{S1} - U_{S4}) / I_{R6}$$

Стандартизовані значення  $R_5$  та  $R_6$  приймаються за рядом Е24.

Приклад моделювання схеми розрахованого підсилювача типу ПП4 в пакеті MULTISIM 11.0 наведено на рисунку 2.2

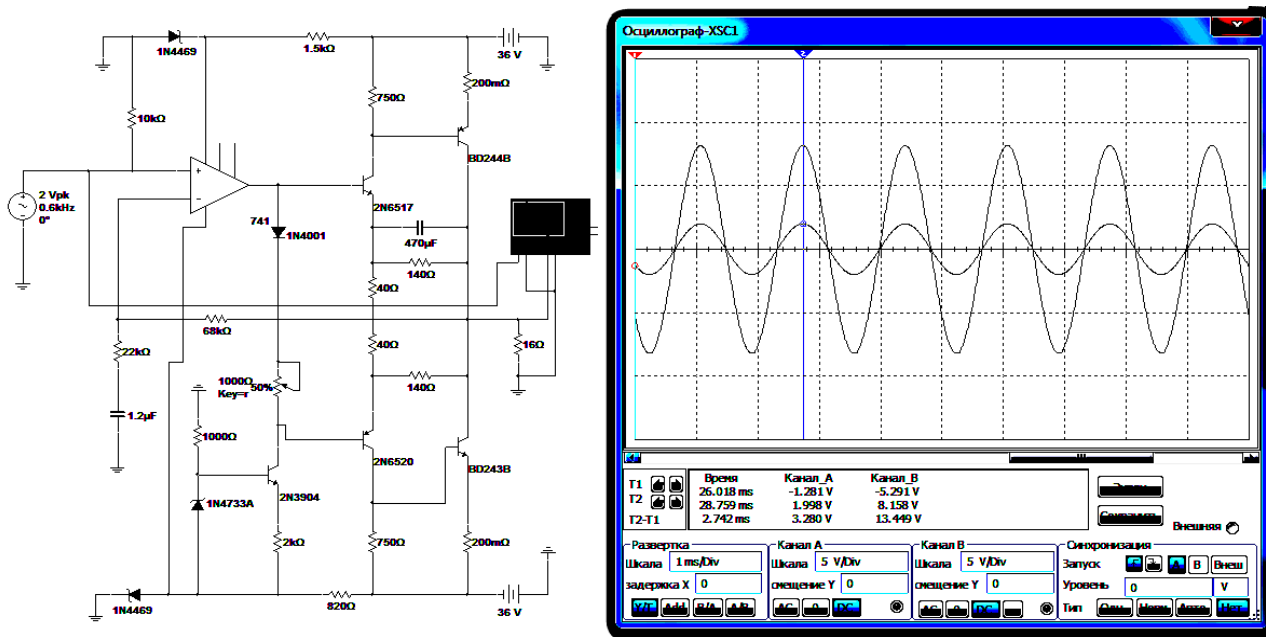


Рисунок 2.2. Приклад моделювання схеми ППЧ в пакеті MULNISISIM 11.0

### Перелік елементів

Позначення в схемі	Найменування	Кількість	Примітки (імпортний аналог)
<b>Резистори</b>			
R <sub>1</sub>		1	
R <sub>2</sub>		1	
R <sub>3</sub>		1	
R <sub>4</sub>		1	
R <sub>5</sub>		1	
<b>Конденсатори</b>			
C1			
<b>Транзистори</b>			
VT1		1	
VT2		1	
VT3		1	
<b>Діоди та стабілітрони</b>			
VD1		2	
VD2			
<b>Мікросхеми</b>			
DA1		1	

## Довідкові матеріали

### Параметри інтегральних операційних підсилювачів (ОП)

Таблиця 1Д

Тип ОП, імпортований аналог	$K_U$ ОП	$U_{S1,2}$ , В	$U_{ВНХ\max}$ , В	$f_1$ , МГц	$I_{сп}$ , мА	$R_{ВХ}$ , МОм	$R_{ВНХ}$ , Ом	$R_{Н\ доп}$ , кОм	$I_{Н\ max}$ , мА	$U_{ВХ\ диф}$ , В
КР140УД608	30000	±15	±12	1,0	4,0	1,0	150	1,0	6,0	±3,0
МС1456G	10000	±18	±15	1,0	3,0	2,5	150	1,0	6,0	±3,0
КР140УД7	30000	±15	±10,5	0,8	2,8	0,4	120	2,0	5,0	±2,0
LM741H	20000	±22 (15)	±21 (13)	1,5	1,7... 2,8	2,0	75	2,0	5,0	±2,0
КР140УД11	30000	±15	±12	15	8,0	0,4	150	2,0	6,0	±6,0-
LM318N	20000	±22	±18 (13)	10	5...10	3,0	75	1,0	12,0	±6,0
КР140УД14	50000	±15	±12	0,5	1,0	30	150	1,0	6,0	±8,0
LM108H	50000	±15	±13,5	-	0,6	30	150	1,0	5,0	±2,0
К153УД2	25000	±15	±11	1,0	3,0	0,3	150	2,0	5,0	±8,0
LM101	11000	±22	±20	1,0	1,8	4,0	75	1,0	10,0	±10,0
К553УД1	20000	±15	±10	1,0	6,0	0,2	150	2,0	5,0	±5,0
LM709A	47000	±20	±17	1,0	-	0,7	150	1,0	10,0	±5,0
КР544УД2 А/Б	50000	±15	±10	1,0	3,5		150	2,0	5,0	±6,0-
LF357AH	20000	±(15-18)	±13	2,0	5...10	1*10 <sup>6</sup>	75	1,0	12,0	±10,0

**Примітки:**  $U_{S1,2}$  – значення напруг різнополярних джерел живлення;

$U_{ВНХ\ max}$  – максимальне значення рівню сигналу на виході;  $I_{Н}$  – максимально допустимий струм навантаження;  $U_{ВХ\ диф}$  – максимально допустимий диференціальний сигнал на вході ОП;  $R_{Н\ доп}$  – мінімально допустимий опір навантаження.

Стандартизовані ряди номінальних значень опору резисторів та ємності конденсаторів

Таблиця 2Д

Допустимі відхилення параметрів від номінального значення, %								
+5 E24	+10 E12	+20 E6	+5 E24	+10 E12	+20 E6	+5 E24	+10 E12	+20 E6
<b>Номінальні опори та ємності: Ом, десятки Ом, сотні Ом, кілоОмы, десятки кілоОм, сотні кілоОм, мегаОм; мікрофаради</b>								
1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7
			2,4			5,1		
	1,2		2,7	2,7		5,6	5,6	
			3,0			6,2		
	1,5	1,5	3,3	3,3	3,3	6,8	6,8	6,8
			3,6			7,5		
	1,8		3,9	3,9		8,2	8,2	
			4,3			9,1		

### Параметри постійних резисторів типу МЛТ

Таблиця 3Д

№	Номинальна потужність розсіювання, Вт	Діапазон номінальних значень опорів, Ом	Максимальна робоча напруга, В
1	2	3	4
1	0,125	1...3*10 <sup>6</sup>	200
2	0,25	1...5,1*10 <sup>6</sup>	250
3	0,5	1...5,1*10 <sup>6</sup>	350
4	1	1...10*10 <sup>6</sup>	500
5	2	1...10*10 <sup>6</sup>	700

### Параметри змінних резисторів

Таблиця 4Д

№	Тип	Діапазон номінальних значень опорів, Ом	Номинальна потужність розсіювання, Вт
1	2	3	4
1	СП2 - 2	22...4,7*10 <sup>6</sup>	0,5
2	СП3 - 4аМ	100...4,7*10 <sup>6</sup>	0,25
3	СП3 - 9а	1000...4,7*10 <sup>6</sup>	0,5
4	СП3 - 33	100...4,7*10 <sup>6</sup>	0,25
5	СП3 - 45а	47...10*10 <sup>6</sup>	0,5
6	СП5-16ВВ	47...33000	0,25
7	СП5 - 35А	68...22000	1
8	СП5 - 39 - 0,5	100...47000	0,5
9	СП5 - 44 - 1	1...47000	1
10	ППЗ - 40	4,7...20000	3

### Параметри неполярних конденсаторів

Таблиця 5Д

№	Тип конденсатора	Номинальна робоча напруга, В	Діапазон номінальних значень ємностей у відповідності зі стандартизованими рядами
1	К10-17а	25	910...15000 пФ
		25	0,015...1,5 мкФ
		50	75...22000 пФ
2	К10-47 А	100	0,01...0,68 мкФ
		250	0,0015...0,1 мкФ
		500	0,001...0,017 мкФ
3	К31-10	100	277...10000 пФ
		250	750...10000 пФ
4	К71-5	160	0,01...1,0 мкФ
		400	К73-17

### Параметри електролітичних конденсаторів

Таблиця 6Д

№	Тип конденсатора	Номинальна робоча напруга, В	Діапазон номінальних значень ємностей у відповідності зі стандартизованими рядами, мкФ
1	<b>К50-16</b>	25	2...2000
		50	2...500
		100	0,5...50
		160	1...20
2	<b>К50-24</b>	40	100...1000
		63	10...2200
		100	4,7...200
		160	1...220
3	<b>К50-32</b>	160	1000...4700
		250	100...2200
		350	47...1000
		450	47...470

### Параметри діодів та діодних збірок

Таблиця 7Д

№	Тип приладу	Максимально допустимий середній за період прямий струм, А	Максимальне значення зворотної напруги, В
1	<b>КД102Б</b>	0,1	300
2	<b>КД103Б</b>	0,1	50
3	<b>КД104А</b>	0,01	300
4	<b>КД105Б</b>	0,3	400
	<b>В</b>	0,3	600
	<b>Г</b>	0,3	800
5	<b>КД106А</b>	0,3	100
6	<b>КД202А</b>	<b>5,0</b>	50
	<b>В</b>	<b>5,0</b>	100
	<b>Д</b>	<b>5,0</b>	200
	<b>Ж</b>	<b>5,0</b>	300
	<b>К</b>	<b>5,0</b>	400
7	<b>КД206А</b>	10	400
	<b>Б</b>	10	500
	<b>В</b>	10	600
8	<b>КД210В,Г</b>	10	1000
9	<b>КЦ105В(стовб)</b>	0,1	6000
<b>Мости</b>			
10	<b>КЦ402А</b>	1	600
	<b>Б</b>	1	500
	<b>В</b>	1	400
11	<b>КЦ412А</b>	1	50
	<b>Б</b>	1	100
	<b>В</b>	1	200

Параметри стабілітронів

Таблиця 8Д

№	Тип приладу	Іноземний аналог	Напруга стабілізації, $U_{СТ}$ В	Мінімальний - $I_{СТ\ min}$ та максимальний - $I_{СТ\ max}$ струми стабілізації, мА
1	КС133А	1N4684	2,97...3,63	3; 81
2	КС139А	1N4730А	3,51...4,29	3; 70
3	КС147А	1N4732А	4,23...5,17	3; 58
4	КС156А	1N4690	5,04...6,16	3; 55
5	КС168А	1N4461	6,12...7,48	3; 45
	КС175Ж	1N4462	7,1...7,9	0,5; 17
	КС182Ж	1N4463	7,4...8	0,5; 18
	КС191Ж	1N4464	8,6...9,6	0,5; 14
	КС210Ж	1N4465	9...11	0,5; 14
	КС211Ж	1N4466	10,4...11,6	0,5; 14
	КС212Ж	1N4467	10,8...13,2	0,5; 11
	КС215Ж	1N4469	13,5...16,5	0,5; 8,3
	КС482А	1N4463	8,98...9,0	1...96
	КС515А	1N4469	12,3...16,5	1...53
	КС524Г	1N4474	22,8...25,2	3...19
	КС530А	1N4476	28...31	1...27

## Перелік літератури

1. Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков «Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум», К. «Каравела», 2-е вид. 2004, 432 с.
2. Воробйова О.М. Основи схемотехніки: підручник / О.М. Воробйова, В.Д. Іванченко. – [2-ге вид.]. – Одеса: Фенікс, 2009, 388 с.
3. В.І. Бойко, А.М. Гуржій, В.Я. Жуйков, А.А. Зорі, В.М. Співак, Т.О. Терещенко «Схемотехніка електронних систем», Книга 1, «Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої», Київ, «Вища школа», 2004, 366 с.
4. Аналоговые интегральные схемы: Справочник / А.Л. Булычев, В.И. Галкин, В.А. Прохоренко. – Мн.: Беларусь, 1995. – 388 с.
5. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник / Н.Н.Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Худоренок. – Мн.: Беларусь, 1994. – 591 с.
6. Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства. Справочник радиолюбителя. – К.: Наукова думка, 1988.



## ЗМІСТ

	Ст.
1. Розрахунок підсилювача потужності типу ПП3 з передкінцевим ступенем на операційному підсилювачі .....	3
2. Розрахунок підсилювача потужності типу ПП4 на три каскади з попереднім каскадом на операційному підсилювачі.....	9
3. Довідкові матеріали.....	18
4. Перелік літератури.....	22

Упорядники:

**Галушко Олег Михайлович**

**Рибальченко Юрій Петрович**

**РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ  
НА ТРАНЗИСТОРАХ ТА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ**

**Методичні рекомендації**

**до виконання курсового проекту**

**з дисциплін «Основи схемотехніки», «Електроніка та мікросхемотехніка»**

для бакалаврів галузей знань 17 Електроніка та телекомунікації,

15 Автоматизація та приладобудування

Видано в редакції упорядників

Комп'ютерний дизайн, верстка та обробка – О.М. Галушко

Підписано до друку 18.02.2019. Формат 30x42/4.

Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,3.

Обл.-вид. арк. 1,3. Тираж 6 пр. Зам. №

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.