

**В.А. Іщенко, к.т.н., доц.**  
 Житомирський державний технологічний університет  
**І.В. Колядюк, інж.**  
 Служба Безпеки України

**РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ РОБОТИ ТРАНЗИСТОРНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ І ПАРАМЕТРІВ ТРАНЗИСТОРА**

Розглянуто загальну схему реостатного підсилювача з елементами, які визначають режим роботи транзистора, та її спрощені варіанти. Розроблено методику розрахунку режиму роботи підсилювача при зміні характеристик транзистора і температури та оптимального вибору елементів схеми для стабілізації режиму роботи транзистора на основі методу еквівалентного генератора. Це дозволяє досягти оптимального використання напруги живлення, що особливо важливо для кінцевих ступенів транзисторних пристроїв. Запропонована методика може бути використана при інженерних розрахунках.

**Постановка проблеми.** Режим роботи транзистора залежить від його характеристик і визначається параметрами резисторів, які входять до складу підсилювача. Розрахунок параметрів резисторів для забезпечення оптимального режиму роботи транзистора з певними характеристиками при певній температурі не викликає ускладнень. Але при заміні транзисторів, параметри яких мають значний розкид, або при зміні температури режим роботи транзистора набуває значних змін. У зв'язку з відсутністю методики інженерного розрахунку режиму роботи транзисторів при зміні їх характеристик і температури та оптимального вибору параметрів резисторів для забезпечення необхідного динамічного діапазону сигналів створюється значний запас споживаних напруги та сили струму. У роботі пропонується методика розрахунку режиму роботи підсилювача при зміні характеристик транзистора і температури та оптимального вибору елементів схеми для стабілізації режиму роботи транзистора на основі методу еквівалентного генератора.

**Викладення основної частини.** Загальна схема реостатного підсилювача з елементами, які визначають режим роботи транзистора, наведена на рис. 1, а. В найбільш вживаній схемі підсилювача зі спільним емітером необхідними елементами забезпечення режиму роботи є резистори  $R_1$  і  $R_3$ , інші можуть бути відсутні ( $R_2 \rightarrow \infty, R_4 = 0, R_5 = 0$ ). Резистор  $R_1$  забезпечує проходження початкового струму бази  $I_{об}$ .

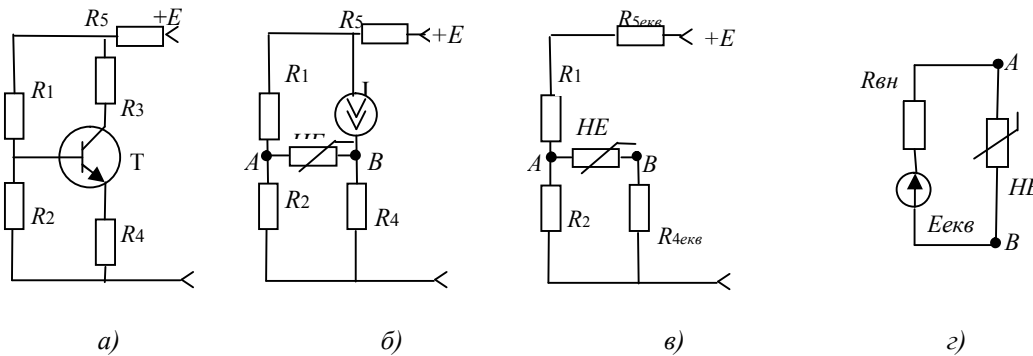


Рис. 1. Загальна схема реостатного підсилювача – а, еквівалентна їй схема із заміщенням транзистора – б, еквівалентна схема із заміщенням колом колектора – в, схема з еквівалентним генератором – г

Це схема А з фіксованим початковим струмом  $I_{об}$  бази. Оскільки початкова напруга  $U_{обe}$  незначна порівняно з напругою  $E$  живлення, початковий струм  $I_{об}$  практично не змінюється при зміні транзисторів або зміні температури:

$$I_{об} = (E - U_{обe}) : R_1; E : R_1.$$

Але початковий струм  $I_{ок}$  колектора, який пропорційний коефіцієнту  $H_{21e}$  підсилення, змінюється в 3–5 разів – він має великий розкид і залежить від температури:

$$I_{ок.max} : I_{ок.min} \approx H_{21e.max} : H_{21e.min}.$$

Для створення певного режиму роботи підсилювача використовують також:

- схему Б з фіксованою напругою  $U_{обe}$  на базі транзистора за допомогою дільника  $R_1 R_2$ , коли  $R_4 = 0, R_5 = 0$ ;
- схему В стабілізації з від’ємним зворотним зв’язком ВЗЗ за силою струму з резистором  $R_4$  – схему емітерної стабілізації, коли  $R_5 = 0$ ;
- схему Г стабілізації з ВЗЗ за напругою – схему колекторної стабілізації, коли  $R_2 \rightarrow \infty, R_u = 0$ ;
- схему Д стабілізації з комбінованим ВЗЗ за струмом і напругою.

Розрахунок параметрів елементів схеми для транзистора з відомою вхідною вольт-амперною характеристикою і заданим значенням коефіцієнта  $H_{21e}$  не викликає труднощів. Наприклад для розрахунку підсилювача, який використовує схему Д стабілізації з комбінованим ВЗЗ на основі транзистора КТ315В з середнім значенням коефіцієнта  $H_{21e} = 0,5(H_{21e.min} + H_{21e.max}) = 0,5(30 + 120) = 75$  при температурі  $t^\circ = 20^\circ\text{C}$  приймаємо довільні значення (на основі заданих параметрів сигналу і попереднього досвіду або з конструктивних міркувань) окремих параметрів схеми: напруги живлення  $E$ , початкового струму колектора  $I_{0к}$ , коефіцієнта  $a$  для визначення сили струму  $I_2 = aI_{0б}$  через резистор  $R_2$  дільника напруги, спаду напруги  $U_{0e}$  і  $U_{R5}$  на резисторах  $R_4, R_5$ .

Приймаємо:  $E = 12 \text{ В}; I_{0к} = 15 \text{ мА}; U_{0e} = U_{R5} = 0,1E = 1,2 \text{ В}; a = 1 - (I_2 = I_{0б})$ .

Обчислюємо інші величини:

$$U_{0R3} = 0,5(E - U_{зат} - U_{0e} - U_{R5}) = 4,3 \text{ В}; R_3 = U_{R3} : I_{0к} = 0,29 \text{ кОм};$$

$$I_{0б} = I_{0к} : H_{21e} = 0,2 \text{ мА}; I_{0e} = I_{0б} (1 + H_{21e}) = 15,2 \text{ мА}; R_4 = U_{0e} : I_{0e} = 79 \text{ Ом}.$$

Тут  $U_{зат} = 1 \text{ В}$  – напруга на колекторі в режимі насичення.

З вхідної вольт-амперної характеристики транзистора знаходимо за величиною струму  $I_{0б}$  напругу  $U_{0б} = 0,55 \text{ В}$  і обчислюємо значення параметрів інших елементів:

$$U_{0б} = U_{0e} + U_{0бe} = 1,75 \text{ В}; R_2 = U_{0б} : I_2 = 8,75 \text{ кОм};$$

$$R_1 = E - (U_{R5} + U_{0б}) : (I_2 + I_{0б}) = 22,6 \text{ кОм};$$

$$R_5 = U_{R5} : (I_{0к} + I_2 + I_{0б}) = 78 \text{ Ом}.$$

Розрахунок інших схем стабілізації режиму роботи транзистора є спрощеним варіантом приведеного розрахунку.

Обчислені значення опорів резисторів забезпечують вибраний режим роботи транзистора КТ315В з коефіцієнтом підсилення  $H_{21e} = 75$  при температурі  $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ . При зміні температури або коефіцієнта підсилення режим роботи транзистора змінюється. Визначити його можна методом послідовних наближень, що вимагає громіздких обчислень. Обчислення можуть бути спрощені при використанні метода еквівалентного генератора.

Схему рис. 1, а можна замінити для розрахунку режиму роботи еквівалентною схемою рис. 1, б. Нелінійний елемент НЕ має вольт-амперну характеристику переходу база-емітер – вхідну вольт-амперну характеристику транзистора. Джерело струму  $J = H_{21e} \cdot I_{0б}$  еквівалентне колу колектора транзистора, його можна вилучити, як показано на рис. 1, в, без зміни режиму нелінійного елемента НЕ шляхом заміни резисторів  $R_4$  і  $R_5$  резисторами  $R_{4екв}$  і  $R_{5екв}$ :

$$R_{4екв} = R_4 \cdot (1 + H_{21e}); R_{5екв} = R_5 \cdot (1 + a + H_{21e}) : (1 + a).$$

Сукупність лінійних елементів схеми рис. 1, в з джерелом живлення  $E$  можна розглядати як еквівалентний генератор, навантаженням якого є нелінійний елемент НЕ, як показано на рис. 1, г. Внутрішній опір  $R_{вн}$  і електрорушійна сила  $E_{екв}$  еквівалентного генератора визначаються відповідно як опір лінійної схеми між точками А і В при замкнених затискачах джерела живлення  $E$  та як напругу  $U_{0б}$  в режимі холостого ходу, коли нелінійний елемент НЕ виключено:

$$R_{вн} = R_{4екв} + (R_1 + R_5) \cdot R_2 : (R_1 + R_{5екв} + R_2),$$

$$E_{екв} = U_{xx} = E \cdot R_2 : (R_1 + R_{5екв} + R_2).$$

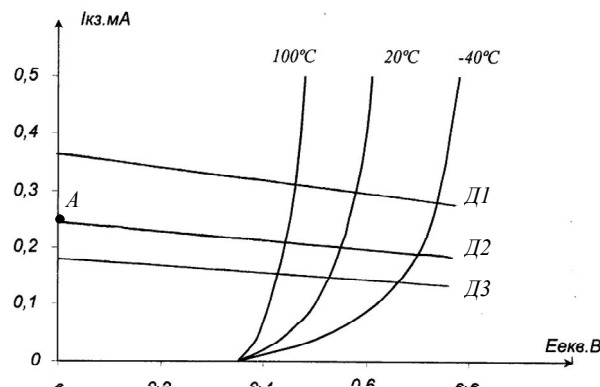


Рис. 2. Вхідні вольт-амперні характеристики транзистора і еквівалентного генератора для Д-схеми живлення – прямі Д1, Д2, Д3

Вольт-амперна характеристика еквівалентного генератора – відрізок прямої, проведеної через точку  $A(E_{екв}, 0)$  під кутом  $\alpha$  до горизонталі:

$$\alpha = \arctg(I_{кз} : E_{екв}).$$

Тут  $I_{кз}$  – струм короткого замикання еквівалентного генератора:

$$I_{кз} = E_{екв} \cdot R_{вн}.$$

Точки перетину прямої з вхідними вольт-амперними характеристиками транзистора на рис. 2 визначають початкові струми  $I_{0б}$ .

Для схеми рис. 1, а з обчисленими вище значеннями параметрів елементів схеми еквівалентний генератор має такі параметри:

$$R_{\text{вн}} = 12,5 \text{ кОм}; E_{\text{екв}} = 3,06 \text{ В}; I_{\text{кз}} = 0,245 \text{ мА}.$$

Вольт-амперною характеристикою такого генератора є пряма Д2. Значення початкових струмів  $I_{0б}$  бази визначають точки перетину прямої Д2 з вхідними вольт-амперними характеристиками транзистора.

Основні параметри режиму роботи схеми рис. 1, а при різних температурах наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

	$t = 100^\circ\text{C}$	$t = 20^\circ\text{C}$	$t = -40^\circ\text{C}$
$I_{0б}$	0,21	0,20	0,19
$U_{0б\text{е}}$	0,43	0,55	0,7
$I_{0к}$	15,7	15	14,2
$U_{0R3}$	4,6	4,3	4,1
$U_{0ке}$	5,1	5,3	5,9

З таблиці 1 випливає, що при зміні температури від  $100^\circ\text{C}$  до  $-40^\circ\text{C}$  значної зміни набуває тільки напруга  $U_{0б\text{е}}$  – близько 50 %. Інші параметри режиму роботи змінюються значно менше – близько 10 %.

Подібним способом можна визначити залежність режиму роботи підсилювача від значення коефіцієнта  $H_{21\text{е}}$ . Оскільки при зміні коефіцієнта  $H_{21\text{е}}$  підсилення транзистора змінюються параметри еквівалентного генератора  $R_{\text{вн}}$  і  $E_{\text{екв}}$ , то при зміні цього коефіцієнта змінюється положення вольт-амперної характеристики еквівалентного генератора – це прямі Д1 (при  $H_{21\text{е}} = 30$ ) і Д3 (при  $H_{21\text{е}} = 120$ ).

В таблиці 2 наведені значення параметрів еквівалентного генератора і режиму роботи підсилювача рис. 1, а при температурі  $t = 20^\circ\text{C}$  і різних значеннях коефіцієнта  $H_{21\text{е}}$ .

Таблиця 2

	$H_{21\text{е}} = 30$	$H_{21\text{е}} = 75$	$H_{21\text{е}} = 120$
$R_{4\text{екв}}, \text{кОм}$	2,45	6,00	9,56
$R_{5\text{екв}}, \text{кОм}$	1,25	3,00	4,76
$R_{\text{вн}}, \text{кОм}$	8,85	12,5	16,2
$E_{\text{екв}}, \text{В}$	3,22	3,06	2,91
$I_{\text{кз}}$	0,364	0,245	0,180
$I_{0б}$	0,30	0,2	0,147
$I_{0к}$	9,0	15	17,6
$U_{R3}$	2,6	4,3	5,1
$U_{0ке}$	8,1	5,3	4,4

При вибраних параметрах елементів схеми Д стабілізації режиму роботи підсилювача початковий струм колектора змінюється в  $17,6 : 9 \approx 2$  рази при зміні коефіцієнта підсилення  $H_{21\text{е}}$  в 4 рази.

Для порівняння ефективності різних схем живлення підсилювача проведено розрахунок параметрів еквівалентного генератора, коли елементи схеми забезпечують при середньому значенні коефіцієнта  $H_{21\text{е}} = 75$ , температурі  $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ , напрузі живлення  $E = 12 \text{ В}$ , початковому струмі колектора  $I_{0к} = 15 \text{ мА}$ . Розрахунок початкових струмів бази при відхиленні коефіцієнта  $H_{21\text{е}}$  від середнього значення і температури від  $20^\circ\text{C}$  виконано за допомогою вольт-амперних характеристик еквівалентного генератора.

В таблиці 3 наведені результати проведених розрахунків.

Таблиця 3

	А	Б	В	Г	1В	2В
$E_{екв}, B$	12	1,05	3,06	12	3,16	6,9
$R_{ен}(H_{21e} = 30), \kappa Ом$	57,3	2,51	8,85	53,7	6,2	15,75
$R_{ен}(H_{21e} = 75), \kappa Ом$	57,3	2,51	12,5	57,3	13,1	32,4
$R_{ен}(H_{21e} = 120), \kappa Ом$	57,3	2,51	16,2	63,3	20,2	49
$I_{ок}(t^{\circ} = 20^{\circ}C, H_{21e} = 120)$ $I_{ок}(t^{\circ} = 20^{\circ}C, H_{21e} = 30)$	4	4	2,4	3,4	1,22	1,28
$I_{ок}(t^{\circ} = 100^{\circ}C, H_{21e} = 75)$ $I_{ок}(t^{\circ} = -40^{\circ}C, H_{21e} = 75)$	1,03	1,69	1,11	1,03	1,11	1,04

Аналіз отриманих результатів показує:

– для зменшення температурної залежності режиму роботи підсилювача необхідно зменшувати кут  $\alpha$  нахилу вольт-амперної характеристики еквівалентного генератора, чого можна досягти при заданому значенні початкового струму бази  $I_{0б}$  збільшенням ЕРС  $E_{екв}$ ;

– для зменшення залежності режиму роботи від коефіцієнта  $H_{21e}$  необхідно мати близьку до пропорційної залежність внутрішнього опору  $R_{ен}$  еквівалентного генератора від коефіцієнта  $H_{21e}$ .

Найбільш сприятливою до цих вимог є схема В емітерної стабілізації. Ця схема може бути використана при будь-якому способі вмикання джерела підсилюваного сигналу і навантаження: зі спільним емітером СЕ, спільною базою СБ чи спільним колектором СК. Для схеми СК резистор  $R_3$  необхідно вилучити ( $R_3 = 0$ ), за рахунок чого збільшено опір резистора  $R_4$  на величину опору  $R_3$ .

При вмиканні транзистора за схемою СЕ або СБ коефіцієнт підсилення напруги  $K_u$  обмежується величиною відношення  $R_3:R_4$  через вплив ВЗЗ. У підсилювачів змінного струму це обмеження може бути знято вмиканням блокуючого конденсатора паралельного до  $R_4$ , або в схемі СБ паралельно до частини резистора  $R_4$ .

У схемі вмикання СЕ або СК джерело підсилюваного сигналу вмикається до бази транзистора, і резистори  $R_1, R_2$  дільника напруги відбирають частину підсилюваного струму і зменшують коефіцієнт  $K_t$  підсилення струму. Для зменшення цього ефекту необхідно вибирати резистори  $R_1, R_2$  за умови  $R_1, R_2 \gg R_{ex}$ . Вхідний опір  $R_{ex}$  тут визначається виразом (при відсутності блокуючого конденсатора):

$$R_{ex} = R_{ex. mp.} + H_{21e} \cdot R_4,$$

де  $R_{ex. mp.} = \Delta U_{be} : \Delta I_b$  – динамічний вхідний опір транзистора.

З урахуванням викладеного проведено розрахунок параметрів еквівалентного генератора і режиму роботи транзистора, коли  $U_{0e} = 0,2E, R_2 = 1,5 \kappa Ом$  (варіант 1В), і схеми СК, коли  $U_{0e} = 5,5B \approx 0,5E, I_2 = 3I_{0б}$ . (варіант 2В). Напруга живлення  $E = 12B$ , початковий струм колектора  $I_{0к} = 15 mA$ . Вольт-амперні характеристики еквівалентних генераторів даних варіантів показано на рис. 3. Для транзисторів з  $H_{21e} = 30$  – це відповідно прямі 1В1 і 2В1, для транзисторів з  $H_{21e} = 75$  – 1В2 і 2В2, для транзисторів з  $H_{21e} = 120$  – 1В3 і 2В3.

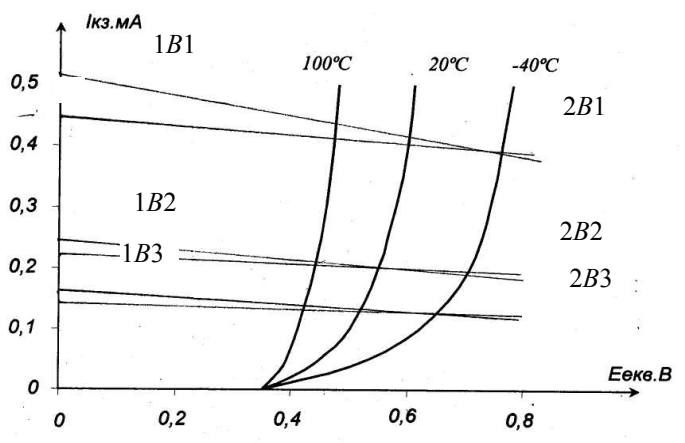


Рис. 3. Вхідні вольт-амперні характеристики транзистора і еквівалентного генератора для варіантів 1В і 2В схем живлення

Результати розрахунків наведені в Таблиці 3. Варіант 1В має зміну початкового струму колектора в  $K_u = 1,22$  раз при зміні коефіцієнта  $H_{21e}$  в 4 рази і  $K_t = 1,11$  раз при зміні температури від  $-40^{\circ}C$  до  $100^{\circ}C$ . Варіант 2В – відповідно  $K_u = 1,3$  і  $K_t = 1,04$  раз.

При одночасному впливі обох факторів у підсилювача за варіантом 1В струм колектора змінюється в межах від  $I_{0к.min}(-40^{\circ}C, H_{21e} = 30) = 11,0 mA$  до  $I_{0к.max}(100^{\circ}C, H_{21e} = 120) = 16,2 mA$  – в 1,5 раз; у

підсилювача зі СК за варіантом 2В струм емітера змінюється в 1,33 раз, від  $I_{0e.min} = 12,1$  до  $I_{0e.max} = 16,1$  мА. Напруги, які обмежують амплітуду сигналу на виході підсилювача за варіантом В1:  $U_{R3.min} = R_3 \cdot I_{0k.min} = 3,2$  В,  $U_{0ek.min} \approx E - I_{0k.max} (R_3 + R_4) = 4,7$  В; за варіантом В2:  $U_{0e.min} = 4,4$  В,  $U_{0ke.min} = 6,2$  В.

Найбільша амплітуда симетричного сигналу на виході підсилювача за варіантом 1В може бути  $U_m = I_{0k.min} \cdot (E - U_{зал}) : (I_{0k.min} + I_{0k.max}) = 4,45$  В, якщо збільшити опір резистора  $R_3$  в  $(U_m : U_{R3.min})$  раз до 0,40 кОм. Відповідно найбільша амплітуда симетричного сигналу на виході підсилювача за варіантом В2 може бути збільшена до  $U_m = 4,7$  В шляхом коректування розрахункової напруги  $U_{0e}$ , збільшення її в  $(U_m : U_{0e.min})$  раз.

Для порівняння, схема А з фіксованим початковим струмом бази при тих же умовах має загальну зміну струму колектора в 4,09 раз і дозволяє одержати найбільшу амплітуду сигналу на виході  $U_m = 2,1$  В, схема Б з фіксованою напругою на базі транзистора має зміну струму в 6,1 раз і дозволяє одержати амплітуду сигналу  $U_m = 1,55$  В.

**Висновки.** У роботі виконано розрахунок режимів роботи транзисторного підсилювача при зміні температури в межах робочого діапазону температур і зміні коефіцієнта підсилення транзистора в межах допуску на основі використання метода еквівалентного генератора. Проведено порівняння ефективності різних схем стабілізації режиму роботи транзистора. Найбільш ефективною є схема емітерної стабілізації з дільником напруги в колі бази, коли  $U_{0e} \approx 0,2E$  – для схем СЕ та СБ (варіант 1В), і для схеми СК –  $U_{0e} \approx 0,5E$ .

Запропонована методика відзначається помірним об'ємом розрахунків і може бути використана в інженерній практиці.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Виноградов Ю.В.* Основы электронной и полупроводниковой техники. – М.: Энергия, 1972. – 536 с.
2. *Колосов С.П.* Нелинейные двухполюсники и четырехполюсники. – М.: Высшая школа, 1981. – 224 с.
3. *Электроника и микросхемотехника. Ч. 1. Электронные устройства информационной автоматики: Учебник / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной.* – К.: Выща шк., 1989. – 431 с.
4. *Омельчук В.В., Соколов О.П.* Основы електроніки і мікроелектроніки: Навчальний посібник / За ред. В.П. Манойлова. – Житомир: ЖДТУ, 2004. – 346 с.

ЩЕНКО Василь Антонович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:  
– радіотехніка.

КОЛЯДЮК Ірина Василівна – інженер, головний спеціаліст підрозділу Департаменту спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби Безпеки України.

Наукові інтереси:  
– зв'язок.

Подано 27.03.2006

**Ищенко В.А., Колядюк І.В.** Розрахунок режиму роботи транзисторного підсилювача при зміні температури і параметрів транзистора.

**Ищенко В.А., Колядюк И.В.** Расчет режима работы транзисторного усилителя при смене температуры и параметров транзистора.

**Ischenko V.A., Kolyadyuk I.V.** Computation of the transistor amplifier's modes in case of changing the temperature and transistor's parameters.

УДК 621.375.4

**Розрахунок режиму роботи транзисторного підсилювача при зміні температури і параметрів транзистора / В.А. Ищенко, І.В. Колядюк**

В роботі розглянуто загальну схему реостатного підсилювача з елементами, які визначають режим роботи транзистора, і її спрощені варіанти. Розроблено методику розрахунку режиму роботи підсилювача при зміні параметрів транзистора і оптимального вибору елементів схеми для стабілізації режиму роботи транзистора на основі метода еквівалентного генератора. Це дозволяє досягти оптимального використання напруги живлення, що особливо важливо для кінцевих ступенів транзисторних пристроїв. Запропонована методика може бути використана при інженерних розрахунках.

УДК 621.375.4

**Расчет режима работы транзисторного усилителя при смене температуры и параметров транзистора / В.А. Ищенко, И.В. Колядюк**

В работе рассмотрено общую схему реостатного усилителя с элементами, которые определяют режим работы транзистора, и её упрощённые варианты. разработано методику расчёта режима работы усилителя при смене параметров транзистора и оптимального выбора элементов схемы для стабилизации режима работы транзистора на основе метода эквивалентного генератора. Это позволяет достигнуть оптимального использования напряжения питания, что особенно важно для оконечных каскадов транзисторных устройств. Предложенная методика может быть использована при инженерных расчетах.

УДК 621.375.4

**Computation of the transistor amplifier's modes in case of changing the temperature and transistor's parameters / V.A. Ischenko, I.V. Kolyadyuk**

General scheme of resistant amplifier with elements that define transistor's work modes and its simplified variants are shown. The methods of the computation of the amplifier's work modes in case of changing transistor's parameters and optimal choice of the scheme's elements for stabilization the transistor's work modes based on the method of equivalent generator is worked out. It makes possible to achieve the optimal use of the voltage that is especially important for the ends of the transistor's devices. The offered methods can be used in engineer's computations.