

Г. С. ВЕКСЛЕР

ТЕОРІЯ І РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРИЧНОГО ДВОКАСКАДНОГО СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ НА КРЕМНІЄВИХ СТАБІЛІТРОНАХ

У численних роботах, присвячених параметричним стабілізаторам на кремнієвих стабілітронах, як правило, розглядається однокаскадна схема. Інженерний розрахунок її наведений в [1, 2]. Між тим, якщо добуток номінального значення струму, що тече через споживач $I_{2н}$, на інтегральний коефіцієнт стабілізації K_u дорівнює одиниці або вище за неї, то однокаскадна схема навіть при незмінному навантаженні вже непридатна. Тому в джерелах опірної напруги для транзисторних стабілізаторів низької напруги (менше 8 в) [3] використовують двокаскадну, а в джерелах еталонної напруги, які застосовують замість нормальних елементів [4, 5], як двокаскадну, так і трикаскадну схему стабілізатора.

У зв'язку з тим, що навіть у таких роботах, як [4, 5], де розглянуті двокаскадні стабілізатори на кремнієвих стабілітронах, не наведено ґрунтовного інженерного розрахунку, проектувальникам доводиться пристосовувати більш докладну методику розрахунку, призначену для однокаскадного стабілізатора.

В даній статті пропонується теорія та інженерний розрахунок двокаскадного стабілізатора напруги, що не вимагає багато часу і праці від проектувальника і виключає перерахунки.

§ 1. Загальні міркування

Принципова схема параметричного двокаскадного стабілізатора напруги на кремнієвих стабілітронах наведена на рис. 1. Наведемо деякі співвідношення для схеми стабілізатора.

Інтегральний коефіцієнт стабілізації напруги, що дає схема,

$$K_u = K'_u K''_u;^1 \quad (1)$$

¹ Штрих тут і далі свідчить про те, що каскад працює при незмінному навантаженні (див. вираз (11) і пояснення до нього).

$$\frac{a}{K_u} = e; \quad (2)$$

$$\frac{b}{K_u} = f; \quad (3)$$

$$\frac{a}{K_{u_1}} = a_1; \quad (4)$$

$$\frac{b}{K_{u_1}} = b_1; \quad (5)$$

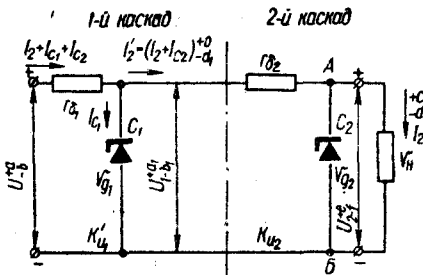


Рис. 1.

$$\frac{a}{K_{u_2}} = e; \quad (6)$$

$$\frac{b_1}{K_{u_2}} = f. \quad (7)$$

Позначимо відношення напруг

$$n_1 = \frac{U}{U_2}; \quad (8)$$

$$n_2 = \frac{U_1}{U_2}; \quad (9)$$

$$n = \frac{U}{U_2} = n_1 n_2. \quad (10)$$

Враховуючи, що опір $r_{б2}$ значно більше зміни опору в точках АБ (рис. 1), прийемо, що

$$c_1 = d_1 = 0. \quad (11)$$

Таким чином, наявність другого каскаду ставить перший каскад у режим роботи з практично постійним навантаженням. Це дозволяє одержати від першого каскаду збільшення значення $K_{u_1} I'_{2н}$ і дещо більший к. к. д. $\eta'_{1н}$, ніж при $c \neq 0$ і $d \neq 0$.

З виразів (4) і (5) випливає, що наявність першого каскаду значно зменшує зміни вхідної напруги на другому каскаді — a_1 і b_1 . При цьому номінальний струм $I_{с2н}$, що тече через стабілітрон C_2 , практично не залежить від величини b_1 і мало відрізняється від струму $I_{с2\text{мін. доп}}$. Це дозволяє одержати великий к. к. д. $\eta_{2в}$ (50% і більше). В результаті від схеми двокаскадного стабілізатора одержують значення $K_u I_{2н}$ вище за одиницю при к. к. д. приблизно у два рази менше, ніж у однокаскадного стабілізатора. Задача, яку потрібно розв'язати при проектуванні двокаскадного стабілізатора, зводиться до правильного вибору стабілітрона C_1 , визначення,

чи можна одержати задану величину $K_u I_{2H}$, і поділу K_u на такі значення K'_{u_1} і K_{u_2} , щоб

1) K_u згідно з (1) був не менше заданого;

2) n_1 не було надмірно великим (n_2 визначається вибором стабілітронів C_1 і C_2);

3) $I_{c.мін}$ дорівнював $I_{c.мін.доп}$ для кожного з стабілітронів, що забезпечить більші значення як K'_{u_1} та K_{u_2} , так і η'_{1H} та η_{2H} ;

4) $I_{c.макс}$ був менше ніж $I_{c.макс.доп}$ для кожного з стабілітронів;

5) η_n був якомога більшим.

Щоб задовольнити третій пункт цих вимог, у дальшому викладі будемо виходити з того, що для обох стабілітронів

$$I_{c.мін} = I_{c.мін.доп}^2. \quad (12)$$

§ 2. Інтегральні коефіцієнти стабілізації у двокаскадному стабілізаторі

Для однокаскадного стабілізатора

$$n_2 = \frac{1}{1 - b - \frac{\frac{I_{c.мін.доп}}{I_{2H}} + 1 + c}{\frac{U_{2H}}{r_g K_u I_{2H}} - \frac{c + d}{a + b}}}. \quad (13)$$

Ураховуючи позначення, наведені на рис. 1, та вирази (4) і (5), можна подати вираз (13) для другого каскаду стабілізатора у вигляді

$$n_2 = \frac{1}{1 - \frac{b}{K'_{u_1}} - \frac{\frac{I_{c_2.мін.доп}}{I_{2H}} + 1 + c}{\frac{U_{2H}}{r_{g_2} K_{u_2} I_{2H}} - \frac{c + d}{a + b} K'_{u_1}}}. \quad (14)$$

і аналогічно для першого каскаду стабілізатора, враховуючи вираз (11), — у вигляді

$$n'_1 = \frac{1}{1 - \frac{b}{K'_{u_1}} - \frac{\frac{I_{c_1.мін.доп}}{I'_{2H}} + 1}{\frac{U_{1H}}{r_{g_1} K'_{u_1} I'_{2H}}}}. \quad (15)$$

² Максимальні величини K_u , що їх одержують при виконанні умови (12), позначалися в [1] як $K_{u.макс}$. Для спрощення цей індекс нижче не наводиться.

де струм, що навантажує перший каскад,

$$I'_{2н} = I_{2н} + I_{с2н}. \quad (16)$$

Для однокаскадного стабілізатора [1] номінальний струм через стабілітрон

$$I_{сн} = \frac{(n-1)(I_{с.мін.доп} + I_{2нc}) + nI_{2нb}}{n(1-b) - 1}. \quad (17)$$

Ураховуючи позначення, що їх наведено на рис. 1, одержуємо для другого стабілітрона з формули (17)

$$I_{с2н} = \frac{(n_2 - 1)(I_{с2н.мін.доп} + I_{2нc}) + n_2 I_{2нb_1}}{n_2(1 - b_1) - 1}. \quad (18)$$

Як впливає з виразу (5) для величин, що трапляються на практиці, b (від 0,05 до 0,2) і K'_{u_1} (від 5 до 50) вираз (18) можна подати у вигляді

$$I_{с2н} = I_{с2н.мін.доп} + I_{2нc} + \frac{I_{2нb_1}}{1 - \frac{1}{n_2}}. \quad (19)$$

З виразів (15) і (16) дістаємо

$$I'_{2н} \approx I_{2н} \left(1 + c + \frac{b_1}{1 - \frac{1}{n_2}} \right) + I_{с2н.мін.доп}. \quad (20)$$

Для промислових типів стабілітронів n_2 не буває менше за 1,15—1,2, що при значеннях K'_{u_1} , які зустрічаються на практиці, дозволяє подати вираз (20) у вигляді

$$I'_{2н} \approx I_{2н} (1 + c) + I_{с2н.мін.доп}, \quad (21)$$

звідки впливає, що струм $I'_{2н}$ не залежить від величини b .

З порівняння виразу (15) з аналогічним виразом для однокаскадного стабілізатора [1] виходить, що якщо замінити $I_{2н}$ на $I'_{2н}$, то криві $n' = \varphi(K'_{u_1} I'_{2н})$ зліляються з кривими $n'_1 = \varphi(K'_{u_1} I'_{2н})$. Це дозволяє для вибору величини n'_1 скористатися з готових графіків, які наведені в [1].

У двокаскадному стабілізаторі, як і в однокаскадному, є обмеження для величин K'_{u_1} і K_{u_2} , які можна одержати від схеми. Знизу ці величини обмежують максимально допустимі струми $I_{с.макс.доп}$, а зверху — величини n , які при зростанні $K_{u_1} I_{2н}$ швидко прямують до безмежності.

Для того щоб $I_{с.макс}$ не перевищувало $I_{с.макс.доп}$, в однокаскадному стабілізаторі [1] треба, щоб

$$K_{u_1 \text{мін.доп}} = \frac{U_{2н} (a + b)}{I_{с1макс.доп} - I_{с1мін.доп}}. \quad (22)$$

З цього виразу виходить, що для першого каскаду

$$K'_{u_1 \text{мін.доп}} = \frac{U_{1н} (a + b)}{I_{с1макс.доп} - I_{с1мін.доп}}, \quad (23)$$

а для другого

$$K_{u_2 \text{мін.доп}} = \frac{U_{2н} (a + b)}{K'_{u_1} (I_{с2макс.доп} - I_{с2мін.доп})}. \quad (24)$$

Врахуємо, що для стабілітронів Д808 — Д813 $\frac{U_{2н}}{r_{g_2}} \approx 1 \div 3$ і $I_{с2макс.доп} - I_{с2мін.доп} (\approx 15 \div 30) \cdot 10^{-3}$, і прийемо, що $a + b \approx 0,1 \div 0,2$; тоді при $K'_{u_1} \approx 10 \div 50$ з виразу (24) одержимо величину $K_{u_2 \text{мін}} \leq 4$. Це значення $K_{u_2 \text{мін.доп}}$ звичайно не обмежує величини K_{u_2} , яка при наведених даних як правило, більше за 4.

Визначимо K_{u_2} з виразу (14), нехтуючи величиною $\frac{b}{K'_{u_1}}$ в порівнянні з одиницею,

$$K_{u_2} \approx \frac{\frac{U_{2н}}{r_{g_2} I_{2н}}}{\frac{I_{с2мін.доп}}{I_{2н}} + 1 + c} + K'_{u_1} \frac{c + d}{a + b} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{n_2}}. \quad (25)$$

Оскільки n_2 , яке визначається робочими напругами першого та другого стабілітронів, змінюється дискретно і не може бути довільним, то $K_{u_2 \text{мін}}$ визначається мінімально можливим значенням n_2 (ця величина дорівнює приблизно 1,15 — 1,2). Величина K_{u_2} , що її одержано з виразу (25), звичайно більша, ніж $K_{u_2 \text{мін.доп}}$; як правило, перевірки на мінімум вона не потребує.

Визначимо максимально допустимі значення K'_{u_1} і K_{u_2} .

Для того щоб n було менше за безмежність, в однокаскадному стабілізаторі треба дотримати [1]

$$K_{u_{\max}} < \frac{\frac{U_{2H}}{r_g I_{2H}}}{1 + c + \frac{I_{c_{\min. доп}}}{I_{2H}}} + \frac{c + d}{a + b} \quad (26)$$

Для першого каскаду стабілізатора, враховуючи вираз (11), дістанемо з формули (26)

$$K'_{u_{1\max}} < \frac{U_{1H}}{r_{g_1}} \cdot \frac{1 - b}{I'_{2H} + I_{c_{1\min. доп}}} \quad (27)$$

Звідси, враховуючи (21) і прийнявши, що

$$I_{c_{1\min. доп}} = I_{c_{2\min. доп}},$$

дістаємо

$$K'_{u_{1\max}} < \frac{U_{1H}}{r_{g_1}} \cdot \frac{1 - b}{I_{2H}(1 + c) + 2I_{c_{1\min. доп}}} \quad (28)$$

Для другого каскаду стабілізатора, урахувавши вирази (4) і (5) і нехтуючи b_1 у порівнянні з одиницею, дістаємо з формули (26)

$$K_{u_{2\max}} < \frac{\frac{U_{2H}}{r_{g_2} I_{2H}}}{1 + c + \frac{I_{c_{2\min. доп}}}{I_{2H}}} + \frac{c + d}{a + b} K'_{u_1} \quad (29)$$

Оскільки $n_2 > 1$, то $1 > 1 - \frac{1}{n_2}$, тому K_{u_2} , що його одержали з формули (25), завжди буде менше за $K_{u_{2\max}}$. Виходячи з цього, значення K_{u_2} , одержане з формули (24), можна не перевіряти і вважати його здійсненим. Треба відмітити, що чим ближче буде K_{u_2} до $K_{u_{2\max}}$, що його дістали з виразу (29) при умові рівності його правої та лівої частин, тим більше n_2 і менший η_{2H} .

§ 3. К. к. д. у двокаскадному стабілізаторі

Звернемось до виразу для к.к.д. однокаскадної схеми стабілізатора. Згідно з [1] у номінальному режимі роботи

$$\eta_H = \frac{1 - b - \frac{\frac{I_{c_{\min. доп}}}{I_{2H}} + 1 + c}{\frac{U_{2H}}{r_g K_u I_{2H}} - \frac{c + d}{a + b}}}{b \left(\frac{U_{2H}}{r_g K_u I_{2H}} - \frac{c + d}{a + b} \right) + \frac{I_{c_{\min. доп}}}{I_{2H}} + 1 + c} \quad (30)$$

Як це виходить з кривих $\eta_n = f(K_u I_{2н})$ та $\eta'_n = f'(K'_u I'_{2н})$, наведених в [1], η_n і η'_n мають оптимум. Визначимо причину цього явища, припускаючи при цьому, що $b = \text{const}$ і $K_u I_{2н} = \text{var}$.

К. к. д. у номінальному режимі [1]

$$\eta_n = \frac{1}{n \left(1 + \frac{I_{с.н}}{I_{2н}} \right)}, \quad (31)$$

де, враховуючи вираз (3),

$$I_{с.н} \approx I_{с.мін.доп} + I_{2н}c + \frac{U_{2н}b}{K'_u r_d}. \quad (32)$$

Розглянемо два режими роботи стабілізатора, прийнявши для спрощення, що $c = d = 0$,

1) $I_{2н} = \text{const}$, $K'_u = \text{var}$, $b = \text{const}$ і 2) $I_{2н} = \text{var}$, $K'_u = \text{const}$ і $b = \text{const}$ (можливий ще й третій режим, коли $I_{2н} = \text{var}$, $K'_u = \text{var}$ і $b = \text{const}$, який виходить з перших двох).

У першому режимі роботи, наприклад, зростання K'_u , з одного боку, згідно з формулою (32) приводить до можливості вибрати менший струм $I_{с.н}$ і, з другого боку, виходячи з того, що K'_u згідно з [1]

$$K'_u \approx \frac{1}{\frac{1}{r_{ст.н}} + \frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_b}}, \quad (33)$$

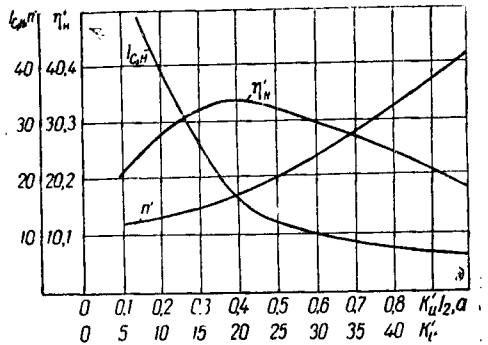


Рис. 2.

приходимо до висновку, що зростання K'_u можливе лише за рахунок збільшення r_b у схемі, що спричинить збільшення n' .

На рис. 2 наведені криві $I_{с.н}$, n' і η'_n в залежності від K'_u для стабілізатора Д808 при: $I_{2н} = 20 \text{ ма}$; $a = 0,05$; $b = 0,15$; $I_{с.мін.доп} = 2 \text{ ма}$; $c = d = 0$. Значення η'_n і $I_{с.н}$ підраховувалися відповідно за формулами (31) і (32), а величина n' з [1] згідно з формулою

$$n' = \frac{1}{1 - b - \frac{r_g K'_u I_{2н}}{U_{2н}} \left(\frac{I_{с.мін.доп}}{I_{2н}} + 1 \right)}. \quad (34)$$

З характеру кривих $I_{c.n}$ і n' , а також з формули (31) виходить, що зі зміною K_u' прирости η'_n від впливу $I_{c.n}$ і n' мають різні знаки, наслідком чого є оптимальні величини η'_n .

У другому режимі роботи, наприклад, зростання $I_{2н}$, що можливе лише при зменшенні навантажувального опору r_n , приведе до збільшення η'_n згідно з формулою (31). Але зменшення r_n , яке потрібне для збереження $K_u' = \text{const}$, повинно бути скомпенсоване згідно з виразом (33) за рахунок збільшення r_6 , а останнє спричинить зростання n' згідно з [1]

$$K_u' \approx \frac{r_6}{n'r_g}, \quad (35)$$

що викличе зменшення η'_n .

Таким чином, навіть при $c = d = 0$ і $I_{c.n} = \text{const}$ одночасне зростання $I_{2н}$ і n' приведе до оптимальності величини η'_n . Коли $c > 0$, то зростання $I_{2н}$ спричинить згідно з формулою (33) збільшення $I_{c.n}$, що в свою чергу зменшить η'_n .

Аналіз показав причини, що приводять до оптимальності величин η'_n при зміні $K_u I_{2н}$ в однокаскадному стабілізаторі. Розглянемо, як ці причини діють у двокаскадному стабілізаторі.

Умови роботи першого каскаду не вносять принципових змін у формулу для к. к. д. (31). Умова (11) приводить лише до зміни: n на n' , $I_{2н}$ на $I'_{2н}$ і $\eta_{1н}$ на $\eta'_{1н}$, а крива $\eta'_{1н} = f'(K_u' I'_{2н})$ зіллється з кривою $\eta_n = f(K_u I_{2н})$ [1]. Отже, $\eta'_{1н}$ має оптимальність при деякій величині $K_u' I'_{2н}$. Інакше буде у другому каскаді стабілізатора. Вираз (32) для другого каскаду матиме вигляд

$$I_{c_{2н}} = I_{c_{2н, \text{мін. доп}}} + I_{2н} c + \frac{U_{2н} b_1}{K_{u_2} r_{g_2}}. \quad (36)$$

Ураховуючи вирази (5) і (1), можна подати вираз (36) у вигляді

$$I_{c_{2н}} = I_{c_{2н, \text{мін. доп}}} + I_{2н} c + \frac{U_{2н} b}{K_u r_{g_2}}. \quad (37)$$

Оскільки величини b і K_u не залежать від перерозподілу величини K_u на K_{u_1} і K_{u_2} , то при зміні K_{u_1}' (коли $K_u = \text{const}$) на значення $\eta_{2н}$ впливатиме лише n_2 , а $I_{c_{2н}}$ лишатиметься незмінним. Якщо $I_{c_{2н}}$ не змінюватиметься, то і $r_{ст.н}$ залишиться без зміни, а тому, згідно з формулою (33), зростання K_{u_2} можливе лише при збільшенні r_{6_2} , що при $I_{2н} + I_{c_{2н}} = \text{const}$ приведе до зростання $U_{1н}$, тобто збільшення n_2 згідно з формулою (9). Але зростання

n_2 при $I_{c2н} = \text{const}$ і $I_{2н} = \text{const}$ згідно з формулою (31) спричинить падіння $\eta_{2н}$. Таким чином, оптимуму величини $\eta_{2н}$ при зміні K_{u_2} , коли

$$K_u = K_{u_1} K_{u_2} = \text{const}, \quad (38)$$

не спостерігають, а із збільшенням K_{u_2} значення $\eta_{2н}$ зменшується.

Враховуючи вираз (38), легко дійти до висновку, що зі збільшенням K_{u_1} величина $\eta_{2н}$ зростає, і чим менше K_{u_2} (інакше, чим менше n_2), тим більше $\eta_{2н}$.

Для однокаскадного стабілізатора [1]

$$\eta_n = \frac{1 - b - \frac{I_{c, \text{мін. доп}}}{I_{2н}} + 1 + c}{\frac{U_{2н}}{r_g K_u I_{2н}} - \frac{c + d}{a + b}}}{b \left(\frac{U_{2н}}{r_g K_u I_{2н}} - \frac{c + d}{a + b} \right) + \frac{I_{c, \text{мін. доп}}}{I_{2н}} + 1 + c}. \quad (39)$$

Ураховуючи вираз (1) і те, що $\frac{b}{K_{u_1}} \ll 1$, дістаємо з (39) для другого каскаду стабілізатора

$$\eta_{2н} = \frac{1 - \frac{I_{c2\text{мін. доп}}}{I_{2н}} + 1 + c}{K'_{u_1} \left(\frac{U_{2н}}{r_{g_2} K_u I_{2н}} - \frac{c + d}{a + b} \right)}{b \left(\frac{U_{2н}}{r_{g_2} K_u I_{2н}} - \frac{c + d}{a + b} \right) + \frac{I_{c2\text{мін. доп}}}{I_{2н}} + 1 + c}. \quad (40)$$

З виразів (11) і (39) дістаємо для першого каскаду стабілізатора

$$\eta_{1н} = \frac{1 - b - \frac{I_{c1\text{мін. доп}}}{I_{2н}} + 1}{\frac{U_{1н}}{r_{g_1} K'_{u_1} I'_{2н}}}{\frac{bU_{1н}}{r_{g_1} K'_{u_1} I'_{2н}} + \frac{I_{c\text{мін. доп}}}{I_{2н}} + 1}. \quad (41)$$

З виразів (40) і (41) виходить, що графіки $\eta'_{1н} = f'(K'_{u_1} I'_{2н})$ і $\eta_{2н} = f(K'_{u_1} I_{2н})$ мають вигляд, наведений на рис. 3. На цьому рисунку на-

ведені результати розрахунку стабілізатора на такі дані: $I_{2н} = 25 \text{ ма}$.
 $U_{2н} = 8 \text{ в}$; $K_u = 50$; $c = d = 0,1$; $a = 0,05$; $b = 0,15$; $I_{c_{1\text{мін.доп}}} =$
 $= I_{c_{2\text{мін.доп}}} = 5 \text{ ма}$; перший стабілітрон — Д809, другий стабіліт-
 рон — Д808 (шкалу K'_{u_1} одержали діленням значень шкали
 $K'_{u_1} I'_{2н}$ на величину струму $I'_{2н} = 35 \text{ ма}$).

Виходячи з рис. 3, можна дійти до того, що схема стабіліза-
 тора матиме оптимальний к. к. д. при такому K'_{u_1} , для якого
 $K'_{u_1} I'_{2н}$ дає оптимум значення $\eta'_{1н}$. Цей оптимум не має різкого
 характеру, і тому відхилення величини $K'_{u_1} I'_{2н}$ на $\pm 50\%$ від оп-
 тимального значення не спричиняє відчутного зменшення $\eta'_{1н}$.

§ 4. Зразковий розрахунок

Задано: розрахувати режим роботи і параметри схеми стабілі-
 лізатора при: $K_u = 100$; $U_{2н} = 7,25 \text{ в}$; $I_{2н} = 25 \text{ ма}$; $a = 0,05$; $b =$
 $= 0,15$; $c = d = 0,1$.

1. Виходячи з величини $U_{2н}$, вибираємо стабілітрон C_2 типу
 Д808. Його параметри [1] $U_{2н} = 7,25 \text{ в}$; $I_{c_{2\text{мін.доп}}} = 5 \text{ ма}$; $I_{c_{2\text{макс.доп}}} =$
 $= 33 \text{ ма}$; $r_{g_2} = 2 \text{ ом}$.

2. У перший каскад ставимо стабілітрон C_1 якого завгодно
 типу, аби $U_{1н}$ було б більше за $U_{2н}$. Беремо, наприклад, Д810.
 Його параметри [1]: $U_{1н} = 9,34 \text{ в}$; $I_{c_{1\text{мін.доп}}} = 5 \text{ ма}$; $I_{c_{1\text{макс.доп}}} = 26 \text{ ма}$;
 $r_{g_1} = 7 \text{ ом}$.

3. З формули (23): $K'_{u_{1\text{мін.доп}}} = 12,8$.

4. З формули (28): $K'_{u_{1\text{макс.доп}}} < 30$.

З того, що $K'_{u_{1\text{макс.доп}}} > K'_{u_{1\text{мін.доп}}}$, приходимо до висновку, що
 $I_{2н} = 25 \text{ ма}$ можна здійснити. Якщо ця нерівність не виконується,
 то доводиться зменшити $I_{2н}$.

5. З формули (21): $I_{2н} \approx 32 \text{ ма}$.

6. З кривої $\eta'_{1н} = f'(K'_{u_1} I'_{2н})$, наведеної на рис. 4 для Д810
 (при $a = 0,05$; $b = 0,15$; $c = d = 0$; $I_{c_{\text{мін.доп}}} = 5 \text{ ма}$; $I_{c_{\text{мін.доп}}}/I'_{2н} =$
 $= 0,1$), дістаємо, що оптимальне значення $\eta'_{1н}$ відповідає величи-
 ні $K'_{u_1} I'_{2н} \approx 0,2 \div 0,4a$. Виходячи з цього, доцільно при $I'_{2н} =$
 $= 0,032a$ мати $K'_{u_1} \approx 6,3 \div 12,6$, але $K'_{u_{1\text{мін.доп}}} = 12,8$, і тому до-
 водиться вибрати $K'_{u_1} = 13$.

Якщо K'_{u_1} , обраний з умови $K'_{u_{1\text{мін.доп}}} < K'_{u_1} < K'_{u_{1\text{макс.доп}}}$, відпо-
 відає більшій величині $K'_{u_1} I'_{2н}$, ніж ті, що забезпечують високий
 к. к. д., то змінити нічого не можна; але коли K'_{u_1} буде менший
 за ці значення, то доцільно збільшити K'_{u_1} , що дасть змогу
 збільшити $\eta'_{1н}$ і η_n .

7. З формули (25) при $K'_{u_1} = 13$ дістаємо, що $K_{u_2} = 7,6$.

8. З формули (1) $K_u = 99$. Оскільки 99 практично не відрізняється від заданого 100, залишаємо K'_{u_1} і K_{u_2} відповідно рівними 13 і 7,6.

Якщо значення K_{u_2} і K'_{u_1} , що ми їх дістали з пунктів 6 і 7, не забезпечують $K_u = K'_{u_1} K_{u_2}$, який дорівнює заданому або більше нього, треба збільшити K'_{u_1} настільки, щоб (незважаючи на незначне зменшення K_{u_2} при цьому) досягти потрібного K_u .

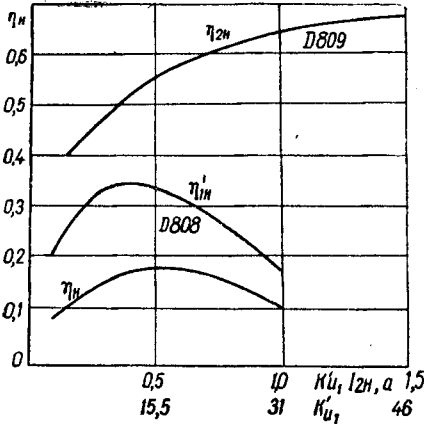


Рис. 3.

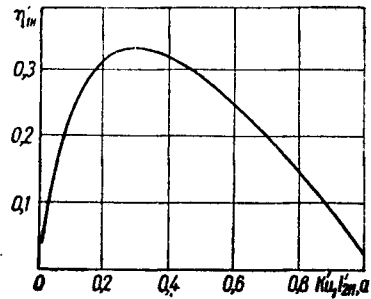


Рис. 4.

Цілком зрозуміло, що при цьому значно знизиться к. к. д. Якщо при K'_{u_1} , що близько підходить до $K'_{u_{1\text{макс.доп}}}$, величина $K_u = K'_{u_1} K_{u_2}$ все ж менша, ніж заданий K_u , то це свідчить про те, що здійснити стабілізатор при обраному стабілітроні C_1 не можна. Коли не можна погодитись з меншою величиною K_u , то треба спробувати використати інший стабілітрон C_1 .

9. $K_u I_{2H} = 2,5 a$.

10. $K'_{u_1} I'_{2H} = 0,42 a$.

11. З формули (41): $\eta'_{1H} = 0,3$.

12. З формули (40): $\eta_{2H} = 0,56$.

13. $\eta_n = \eta'_{1H} \eta_{2H} = 0,168$.

14. Щоб перевірити, наскільки влучно обрано Д810 замість C_1 , був розрахований режим роботи для Д809, Д811 і Д813 замість Д810 (таблиця на стор. 160).

Виходячи з цих даних, приходимо до висновку, що як стабілітрон C_1 можна при однакових к. к. д. застосувати як Д809, так і Д810. Дальший розрахунок проведено для стабілітронів C_2 —Д808 і C_1 —Д810.

Параметри \ Стабілітрон	Д 809	Д 810	Д 811	Д 813
$K'_{u_{1\text{мін. доп}}}$	14	12,8	13,3	14,6
$K'_{u_{1\text{макс. доп}}}$	30	30	27,6	25
K'_{u_1}	20,8	13	14	15
$K'_{u_1} I_{2\text{н}}, a^*$	0,66	0,42	0,45	0,49
K_{u_2}	4,8	7,6	8,0	7,9
K_u	100	99	112	118
$K_u I_{2\text{н}}, a$	2,5	2,48	2,8	3,0
$\eta'_{1\text{н}}$	0,23	0,3	0,27	0,23
$\eta_{2\text{н}}$	0,71	0,56	0,48	0,23
$\eta_{\text{н}}$	0,163	0,168	0,13	0,052

* $I'_{2\text{н}} = 32 \text{ ма}$ для всіх стабілітронів.

15. З формули (19): $I_{c_{2\text{н}}} = 7,5 \text{ ма}$.

16. $r_{\beta_2} = \frac{U_{1\text{н}} - U_{2\text{н}}}{I'_{2\text{н}}} = 65 \text{ ом}$ при потужності на ньому $\sim 0,7 \text{ вт}$.

17. Ураховуючи, що $1 \gg b_1$ [1],

$$I_{c_{2\text{мін}}} = \frac{U_{1\text{н}} - U_{2\text{н}}}{r_{\beta_2}} - I_{2\text{н}}(1 + c) = 5 \text{ ма} = I_{c_{2\text{мін. доп}}}$$

18. Ураховуючи, що $1 \gg a_1$ [1],

$$I_{c_{2\text{макс}}} = \frac{U_{1\text{н}} - U_{2\text{н}}}{r_{\beta_2}} - I_{2\text{н}}(1 - d) = 10 \text{ ма} < I_{c_{\text{макс. доп}}}$$

19. З формули 15: $n'_1 = 2,1$.

20. З формули (8): $U_{\text{н}} = 19,6 \text{ в}$.

21. Ураховуючи, що $c_1 \approx 0$, з формули (17): $I_{c_{1\text{н}}} = 19 \text{ ма}$.

22. $r_{\beta_1} = \frac{U_{\text{н}} - U_{1\text{н}}}{I'_{2\text{н}} + I_{c_{1\text{н}}}} = 202 \text{ ом}$ при потужності на ньому $\approx 0,5 \text{ вт}$.

23. Ураховуючи, що $c_1 \approx 0$ [1],

$$I_{c_{1\text{мін}}} = \frac{U_{\text{н}}(1 - b) - U_{1\text{н}}}{r_{\beta_1}} - I'_{2\text{н}} = 5 \text{ ма} = I_{c_{\text{мін. доп}}}$$

24. Ураховуючи, що $d_1 \approx 0$ [1],

$$I_{c_{1\text{макс}}} = \frac{U_{\text{н}}(1 + a) - U_{1\text{н}}}{r_{\beta_1}} - I'_{2\text{н}} = 24 \text{ ма} < I_{c_{1\text{макс. доп}}}$$

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Векслер Г. С. К расчету стабилизатора напряжения на кремниевых стабилитронах.— «Радиотехника», 1962, 8.
2. Labor und Berechnungsunterlagen. Gleichspannungsstabilisierung mit Zenerdioden, Radio und Fernsehen. 1965, 14, N. 10—12.
3. Векслер Г. С., Тетельбаум Я. И. Электропитание радиоустройств. Гостехиздат, 1964.
4. Додик С. Д. Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока. «Советское радио», 1962.
5. Chandler J. A. The characteristics and applications of Zener (voltage reference) diodes. Electronic Engineering, 1960, 11, N 2.

Г. С. ВЕКСЛЕР

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДВУХКАСКАДНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ НА КРЕМНИЕВЫХ СТАБИЛИТРОНАХ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Рассмотрены особенности двухкаскадного стабилизатора по сравнению с однокаскадным. Получены соотношения, позволяющие произвести инженерный расчет. Приведен пример расчета.

G. S. VEKSLER

THEORY AND CALCULATION OF TWO-STAGE VOLTAGE STABILIZER ON ZENER DIODES

S u m m a r y

Two-stage stabilizer is compared with one-stage. There have been got formulas, which give the possibility to make an engineering calculation. There is an example of the calculation.